

## 北西太平洋におけるマイワシ稚魚の水平分布の変化と黒潮続流の動態

高木香織<sup>1†</sup>, 高橋素光<sup>2</sup>, 木下貴裕<sup>3\*</sup>, 谷津明彦<sup>2</sup>, 本田 聡<sup>1</sup>, 西田 宏<sup>1\*\*</sup>Change in the horizontal distribution of juvenile Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) associated with the dynamics of the Kuroshio Extension in the western North PacificKaori TAKAGI<sup>1†</sup>, Motomitsu TAKAHASHI<sup>2</sup>, Takahiro KINOSHITA<sup>3\*</sup>,  
Akihiko YATSU<sup>2</sup>, Satoshi HONDA<sup>1</sup> and Hiroshi NISHIDA<sup>1\*\*</sup>

Distribution patterns of juveniles of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* in the Kuroshio–Oyashio transition region were examined in relation to the dynamics of the Kuroshio Extension. The juveniles were collected using a pelagic trawl during 1996–2009. Index for juvenile abundance estimated in the current survey showed decreasing trends during 1996–2000, extremely low levels during 2001–2004, and fluctuating trends during 2005–2009. Mean standard length (SL) and age in days of juveniles collected in May ranged from 33.5–43.6 mm and from 46.2–56.6 days after hatching, respectively. The May-caught juveniles during 1996–2000 had significantly larger body size and older age in days than those during 2001–2004 and 2005–2009. Juveniles <40 mm SL occurred predominantly in waters west of 150°E during the decreasing (1996–2000) and fluctuating (2005–2009) periods, meanwhile the small juveniles appeared in waters east of 150°E during the extremely low period (2001–2004). Previous studies have demonstrated that the axis of the Kuroshio Extension showed a meandering path (unstable state) during 1996–2000 and 2005–2009 but a non-meandering path (stable state) during 2001–2004. This suggests that since smaller and younger juveniles were swiftly transported to the downstream waters east of 150°E, they could not stay in the favorable environment for their growth and survival during 2001–2005 resulting in extremely low recruitment.

**Key words:** sardine, juvenile, horizontal distribution, recruitment, the Kuroshio Extension

## はじめに

マイワシ *Sardinops melanostictus* の資源量は、気候変動に伴い数十年周期で大きく変動することが知られている (Kawasaki, 1983)。日本の太平洋側におけるマイワシの漁獲量は1987年に290万トンに達したが、1988–1991年における連続的な資源への加入の失敗により激減した (Fig. 1; Wada and Jacobson, 1998; Watanabe et al., 1995; Yatsu et al.,

2005)。その後、漁獲量は1993年に100万トンを下回り、2002年以降には10万トンを下回る極めて低い水準にある。

太平洋沿岸の土佐湾や相模湾沖で産卵され孵化したマイワシ仔魚は、黒潮によって黒潮続流域および黒潮親潮移行域に輸送されると考えられる (Fig. 2; 黒田, 1991; 木下, 1998; Itoh et al., 2009)。黒潮親潮移行域は、5–6月において、100 m深の水温が5°Cの等温線で示される親潮前線と15°Cで

2011年11月25日受付, 2013年9月23日受理

<sup>1</sup> 水産総合研究センター中央水産研究所

National Research Institute of Fisheries Science, Fisheries Research Agency, 2–12–4 Fukuura, Kanazawa, Yokohama, Kanagawa 236–8648, Japan

<sup>2</sup> 水産総合研究センター西海区水産研究所

Seikai National Fisheries Research Institute, 1551–8 Taira, Nagasaki, Nagasaki 851–2213, Japan

<sup>3</sup> 水産総合研究センター日本海区水産研究所

Japan Sea National Fisheries Research Institute, 1–5939–22 Suido, Chuou, Niigata, Niigata 951–8121, Japan

\* 現所属：水産総合研究センター日本海区水産研究所 小浜庁舎

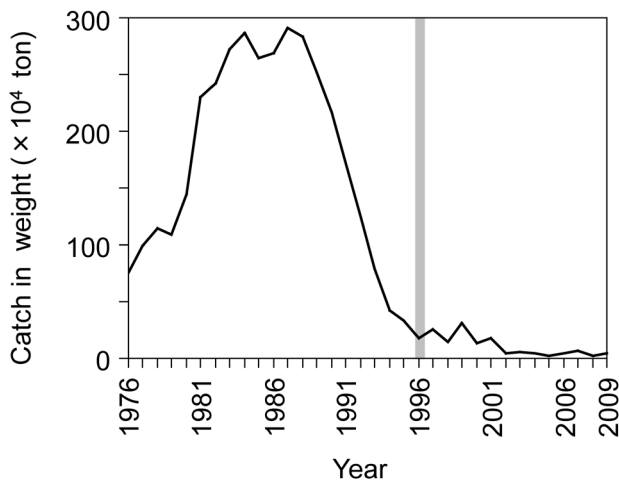
Present: Japan Sea National Fisheries Research Institute, Obama Station, 26 Tomari, Obama, Fukui 917–0117, Japan

\*\* 現所属：水産庁

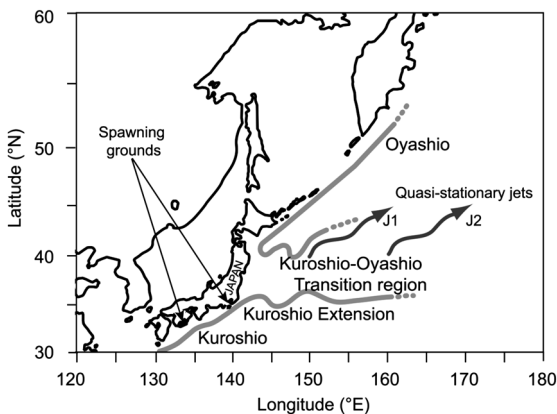
Present: Fisheries Agency, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 1–2–1 Kasumigaseki, Chiyoda, Tokyo 100–8907, Japan

† E-mail: takagik@affrc.go.jp

示される黒潮前線に挟まれた海域と定義されている(川合, 1972). この黒潮親潮移行域に輸送されたマイワシ仔魚は, 稚魚へと成長・発育して親潮域へ索餌回遊し, 秋季には南下して資源に加入すると考えられている(黒田, 1991; Kawabata et al., 2008). 1988–1991年の加入の失敗は黒潮親潮移行域における仔稚魚期の大量死亡が原因とされ(Watanabe et al., 1995), これに基づいて, 1996年から加入量の早期把握を目的として, 「黒潮親潮移行域における浮魚類並びにスルメイカの加入量早期把握調査」(以下, 加入量早期把握調査とする)が水産庁及び水産総合研究センターにより実施されている. この調査では, 1995年の予備調査の段階か



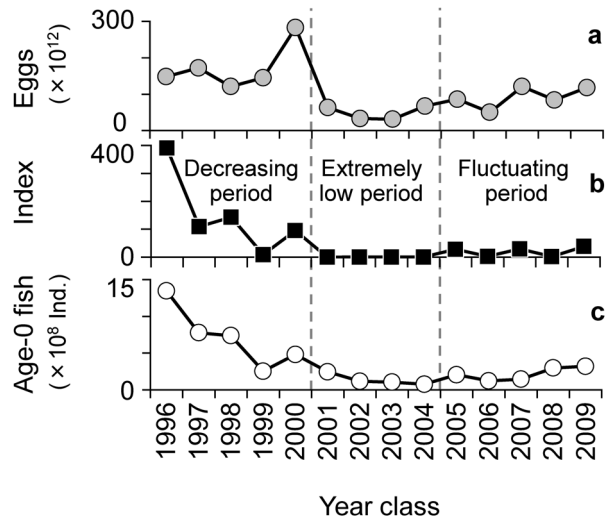
**Figure 1.** Annual catch in weight of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* in the Pacific waters off Japan during 1976–2009 based on Honda et al. (2010). Gray line indicates the year that trawl survey for recruitment of small pelagic fishes began.



**Figure 2.** Current structures in waters off central and northern Japan. The Kuroshio–Oyashio Transition region was defined based on Kawai (1972) as waters between fronts of the subtropical Kuroshio Extension and the subarctic Oyashio (see Methods). Gray arrows indicate the quasi-stationary jets of J1 and J2 (Isoguchi et al., 2006).

ら, 34–38°N, 142–154°Eの太平洋沿岸から沖合域にてマイワシ仔魚の分布が確認されている(木下, 1998). 従来マイワシは資源水準の低い年代には沿岸主体の小回遊型, 資源水準の高い年代には大回遊型の生態的特長を示すと考えられていたが(伊東, 1961; Nakai, 1962; 近藤, 1988; 黒田, 1991; 平本, 1991), この加入量早期把握調査結果では, 分布密度は極めて低いながら, 資源低水準期においても黒潮親潮移行域には沖合回遊経路が存続していることを示唆している.

加入量早期把握調査が実施された1996年以降のマイワシの太平洋沿岸域における産卵量は, 2000年まで120兆粒を上回ったが, 2000年までと同様に120兆粒の産卵量を示した2007および2009年を除き, 2001年以降は概ね90兆粒未満の比較的低い水準で推移した(Fig. 3-a). マイワシの加入量指数は, 加入量早期把握調査結果を基に算出され, 表面水温1°Cごとの各水温帯における稚魚の平均採集尾数に, 各水温帯が調査海域(35–40°N, 143–160°E)に占める面積割合を乗じて, 調査海域の水温範囲で積算したものと定義されている(西田ほか, 2001). この加入量指数は, 1996–1999年に39.1から9.0に急激に減少し, 2000年に増加したものの2001–2004年に0.2–0.5と極めて低い値を示したのち, 2005–2009年には1.9–38.2の間で増減した(Fig. 3-b; 本田ほか, 2010). マイワシ太平洋系群の資源評価で算出される当歳魚加入量(Fig. 3-c)との間で変動傾向が同調していることから, この加入量指数は初期減耗段階を経た稚魚の加入量の早期把握に有効とみなされ, 2003年



**Figure 3.** a: Interannual variations in egg production, b: index of the juvenile abundance, and c: the estimated number of age-0 fish of the Pacific stock of Japanese sardine during 1996–2009 based on Honda et al. (2010). The study years were divided into three periods: decreasing period (1996–2000), extremely low period (2001–2004), and fluctuating period (2005–2009) based on the index of the juvenile abundance.

度より資源量指標値のひとつとしてマイワシ太平洋系群の資源評価に用いられている(石田ほか, 2004)。

1996–2003年の加入量早期把握調査の結果から、黒潮親潮移行域における水温や餌環境が複合的要因としてマイワシ仔稚魚の成長・生残を規定していると考えられている(Takahashi et al., 2008, 2009)。調査海域の水温に関して、各年の調査観測点の平均海面水温(および平均海面水温の範囲)は平均16.6(15.1–17.2)°C、採集個体数で重み付けをした平均海面水温は16.8(15.8–18.4)°Cであったことから(Fig. 4)、2001–2004年に特異的に不適な水温条件が発生していたとは考え難い。また、黒潮親潮移行域における動物プランクトン年間の現存量は1950年代以降では1990年代半ばに最も増大した後に減少したが、マイワシの加入量調査を実施している5–6月における現存量は、2005–2006年にやや少ない傾向を示した他は、1990年代半ばの増大期以前と同水準を示しており(田所, 2007; Saitoh et al., 2010)、餌料環境の面で2001–2004年に特異的に不適な状況がみられたとは考えにくい。さらに、この2001–2004年の加入量指数変動等に関して西田ほか(2011)は、この2001–2004年を含む加入量水準の極めて低い年代には被食による初期減耗は小さく、変態期以降の減耗も加入量変動に反映されにくい状況にあると分析している。なお、稚魚の水平分布と資源変動との対応に関しては、不明な点が多い。

マイワシ稚魚は、黒潮統流および黒潮親潮移行域において、成長に伴い遊泳能力を向上させつつ東方沖へ分布域を拡大する(木下, 1998)。ただし、黒潮統流域に分布している段階では遊泳能力が十分に発達していないと考えられることから、黒潮統流の海洋物理環境が、黒潮親潮移行域における稚魚の分布様式に及ぼす影響は強いと考えられる。近年では黒潮親潮移行域付近の海洋環境に関して新たな知見が蓄積されており、移行域北部から親潮域にかけて存在する準定常流や(Quasi stationary Jet; Isoguchi et al., 2006)

(Fig. 2)、黒潮統流流軸の動態が新たに解明されてきた(たとえばQiu and Chen, 2010)。そこで本研究では、加入量指数の推移に基づき、1996–2000年を減少期、2001–2004年を低迷期、そして2005–2009年を変動期と区分し、稚魚の生態特性のうち主に水平分布の分析を行い、黒潮統流など沖合域の海洋環境や稚魚の加入機構との関連について検討した。

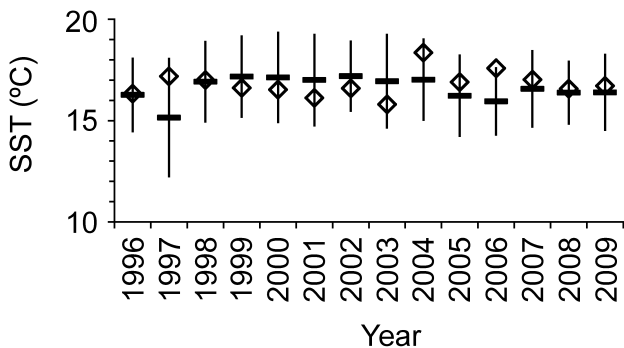
## 材料と方法

### 稚魚の採集と測定

1996–2009年5–6月に実施された加入量早期把握調査において、1996–2001年には兵庫県立香住高校実習船の但州丸(499トン)を、2002–2009年には北海道教育庁実習船の北鳳丸(664トン)を用船し、表中層トロール網(網口幅約27 m、網の高さ約27 m、コッドエンドの目合10 mm、コッドエンドの深度約14 m)を用いて夜間にマイワシ稚魚を採集した。曳網速度は対水3.5ノット前後で曳網時間は30分とし、一晚あたり2–3回曳網した。1997、1998年にはそれぞれ西経173、および170度まで調査を実施したがマイワシ稚魚が西経域では採集されなかったことから(木下, 1998)、180°以東のデータは解析から除外した。

トロール曳網前後において、海表面水温の計測とCTDによる海洋観測を行った。本研究では、川合(1972)に基づいて、100 m深の水温5°C以下の海域を親潮域、15°C以上の海域を黒潮域とし、5–15°Cの海域を黒潮親潮移行域と定義した。1調査当たりの調査点数は40–69(平均48)点であり、このうち34–63(平均43)点が黒潮親潮移行域に該当した(Table 1)。2002年における黒潮域内の2点を除き、マイワシ稚魚は黒潮親潮移行域で採集された(Table 1)。

採集されたマイワシ稚魚は、採集量に応じて全個体を計数、もしくは一部を抽出して船上で計数し全量に引き延ばして全個体数を推定した。採集されたマイワシ稚魚を冷凍保存して実験室に持ち帰り、標準体長Standard Length(SL, mm)を測定し、採集月別に各年の体長組成、平均体長と標準偏差を求めた。また、各調査点で採集されたマイワシ稚魚のうち、1996–2005年については調査点当たり最大30個体、2006–2009年標本については調査点当たり最大50個体の総計2158個体について、耳石(扁平石)輪紋による日齢査定から年齢構成を調べた(Table 2)。耳石処理はTakahashi et al. (2008)の手法に従い、スライドガラス上にエポキシ系樹脂で固定した後、耐水紙ヤスリ(#2000)およびラッピングフィルムシート(3M, #8000および#12000)を用いて耳石を研磨した。耳石日輪を光学顕微鏡下において100–500倍で観察し、耳石日輪計数システム(RATOCエンジニアリング社)を用いて計数・計測した。マイワシの摂餌は孵化後3日目に始まり(松岡, 2008)、摂餌開始と同期して耳石日輪における第1輪が形成されることが明らかにされていることから(Hayashi et al., 1989)、日輪数に3を加えて日齢とした。



**Figure 4.** Interannual variations in sea surface temperature (SST) measured in sampling stations. Horizontal bars and open diamonds are mean SST at all stations and weighted mean SST by the number of juveniles collected. Vertical bars indicate standard deviations of the mean at all stations.

**Table 1.** Number of sampling stations used for this study by oceanographic regions. Number of stations with positive catch of juvenile sardine is shown in parentheses. – : no data obtained.

Year	Survey date	Kuroshio–Oyashio transition region		Oyashio region		Kuroshio region		Total	
		Number of stations	(positive catch)	Number of stations	(positive catch)	Number of stations	(positive catch)	Number of stations	(positive catch)
1996	9–26 June	43	(23)	6	(0)	2	(0)	51	(23)
1997	24 May– 1 June, 18–25 June	43	(15)	0	–	0	–	43	(15)
1998	14–22 May, 5–14 June	50	(11)	0	–	1	(0)	51	(11)
1999	25 May–15 June	34	(12)	8	(0)	2	(0)	44	(12)
2000	15 May– 8 June	50	(23)	4	(0)	4	(0)	58	(23)
2001	12 May– 6 June	63	(3)	2	(0)	4	(0)	69	(3)
2002	8–28 May	38	(5)	0	–	7	(2)	45	(7)
2003	11–28 May	37	(1)	1	(0)	5	(0)	43	(1)
2004	12–30 May	42	(6)	3	(0)	4	(0)	49	(6)
2005	13–29 May	42	(2)	0	–	3	(0)	45	(2)
2006	11–28 May	39	(4)	1	(0)	2	(0)	42	(4)
2007	12–28 May	39	(14)	2	(0)	2	(0)	43	(14)
2008	10–27 May	40	(2)	0	–	0	–	40	(2)
2009	8–26 May	47	(25)	2	(0)	0	–	49	(25)

**Table 2.** Number of specimens for otolith analysis.

Year	Number of specimens
1996	174 *
1997	146 *
1998	127 *
1999	95 *
2000	342 *
2001	10 *
2002	18 *
2003	5 *
2004	43
2005	225
2006	79
2007	275
2008	53
2009	566
Total	2,158

\*: Data was cited from Takahashi et al. (2008).

### 採集位置の解析

マイワシ稚魚の東西分布を明らかにするため、調査海域を経度10度間隔で4海区に(150°E以西, 150–160°E, 160–170°E, 170–180°E)区分した。調査海区*i*(西側の海区から

順番に;*i*=1, 2, 3, 4)における調査点数を*T<sub>i</sub>*, 採集個体数を*C<sub>i</sub>*として、以下の式で定義される調査海区ごとの出現率*P<sub>i</sub>*(%)を求め、その経年変化を調べた。

$$P_i = \frac{C_i}{T_i} \times 100 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^4 \frac{C_i}{T_i}$$

なお、本調査では、1996年は150–170°E主体に、1997–1998年には沖合の割合が多めながらも各区分でほぼ均等になるように調査点が配置された(Fig. 5)。ただし、1996–1998年にマイワシ稚魚が東経170°より東ではほとんど採集されなかったため、1999年以降には165°E以西の海域で実施されるようになった。この1999年以降では、毎年約40%は150°E以西に、約60%はこれより東方沖に調査点を配置している。

### 結果

#### 採集稚魚の体長組成の経年変化

採集された稚魚の体長組成と個体数および平均SL(±SD)をFig. 6に示した。1996–2000年の減少期における採集月別の稚魚の平均SLは45.4–76.0 mmであった。1997, 1999, および2000年の5月に採集された稚魚の平均SLは6月に採集された稚魚より有意に小さかった(Mann–Whitney



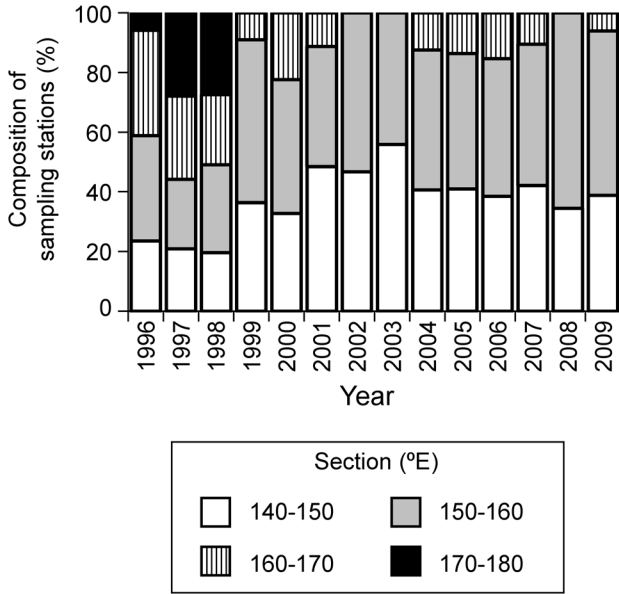


Figure 5. Longitudinal compositions of number of sampling stations during 1996–2009.

*U*-test,  $p < 0.05$ ). 2001–2004年の低迷期と2005–2009年の変動期におけるマイワシ稚魚の平均SLは、それぞれ33.5–43.6 mmおよび31.5–47.0 mmであり、これらは1997, 1999および2000年の5月に採集された稚魚の平均SLよりも有意に小さかった (Mann–Whitney *U*-test,  $p < 0.05$ ). 1996–2000年には体長組成の幅が広い傾向にあり、採集月ごとの体長の変動係数は、1996–2000年5月では0.11–0.16, 同6月では0.09–0.21, 2001–2004年では0.06–0.14, 2005–2009年では0.07–0.16であった。また、2006年の稚魚標本は最も小さく、最大SLは39.5 mmであり、2001年および2003–2006年の5年間に於いて採集された稚魚の出現頻度分布図では、40 mm SL以下にピークを示した (Fig. 6)。これらのことから、本研究では40 mm SL以下の個体を小型稚魚とし、小型稚魚の水平分布様式を別途解析した。

#### 採集稚魚の日齢組成の経年変化

1996–2009年の耳石日輪解析に用いた合計2158個体の標準体長 (SL) は、耳石半径 (OR) に対して直線式で表された ( $SL = 0.11 OR + 2.57, r^2 = 0.93$ )。1996–2000年の5月と6月に採集されたマイワシ稚魚の各年における平均日齢は、それぞれ59.9–71.4日齢と61.9–76.3日齢であった (Fig. 7)。このうち、5月と6月の両月に採集された年 (1997, 1999および2000年) において、6月に採集された稚魚の平均日齢は5月に採集された稚魚よりも有意に高かった (Mann–Whitney *U*-test,  $p < 0.05$ )。2001–2004年と2005–2009年の5月に採集された稚魚の平均日齢は、それぞれ46.2–56.6日齢と43.6–58.7日齢で (Fig. 7)、1996–2000年の5月に採集された稚魚の平均日齢より有意に低かった (Mann–Whitney *U*-test,  $p < 0.05$ )。減少期の1996–2000年においては他期間

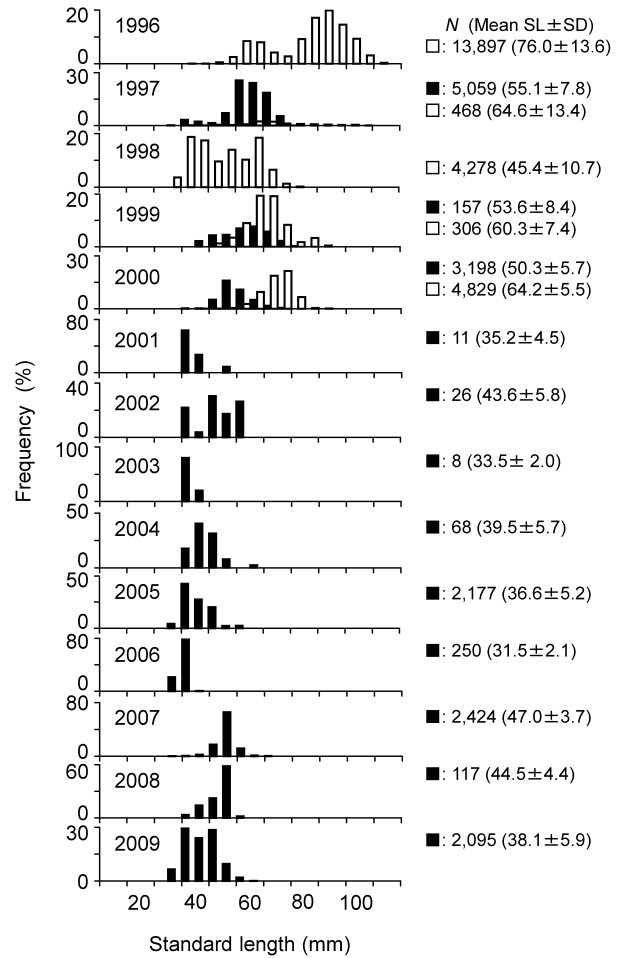


Figure 6. Frequency distribution of standard length (SL) in juveniles collected in May (solid) and June (open) during 1996–2009.

と比べて日齢組成の幅が広い傾向を示し、採集月ごとの日齢の変動係数は、1996–2000年5月では0.12–0.17, 同6月では0.09–0.21, 2001–2004年では0.09–0.13, および2005–2009年では0.12–0.15であった。

日齢から推定された孵化月組成を、採集月別に Fig. 8 に示す。5月に採集されたマイワシ稚魚の孵化月は、1996–2000年の減少期と2005–2009年の変動期には、3月に孵化した個体の占める割合が比較的高かったが、2001–2004年の低迷期には、2002年を除いて4月に孵化した個体の割合が高かった (Fig. 8-a)。6月に採集された稚魚の孵化月は、1997–1998年には4月以降に孵化した割合が高く、逆に1999–2000年には3月以前に孵化した個体の占める割合が高かった (Fig. 8-b)。5–6月を通して、稚魚標本の孵化月は2–5月と推定され、このうち3・4月に孵化した個体の占める割合が90%以上を占めた (Fig. 8-c)。

#### 採集海区と採集稚魚の出現率の分析

マイワシ稚魚が採集された海区数は、1996–2000年の減少

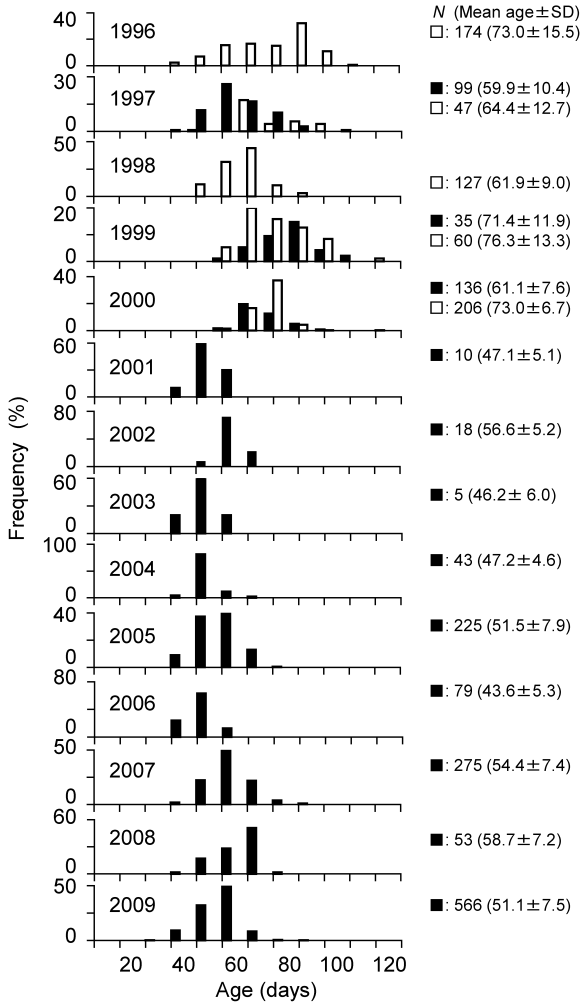


Figure 7. Frequency distribution of age in days of juveniles collected in May (solid) and June (open) during 1996–2009.

期には3–4区, 2001–2004年の低迷期には1–2区, そして2005–2009年の変動期には2–3区であった (Fig. 9). 2005年以降の変動期において, 2000年以前の減少期のように採集海区数が3区以上を示したのは, 2009年のみであった. 採集位置に関する特徴として, 2001–2005年に連続して150°Eより西の海区においてマイワシ稚魚が採集されなかったことが挙げられた. また, 調査年を通じてマイワシ稚魚の出現率が高いのは主に150–160°Eの海区であり, 150°E以西の海区で出現率が最も高かった年は1998, 2006, および2008年であった. ただし, 小型稚魚 ( $\leq 40$  mm SL) に限定すると, 減少期のうち1996–1998年には, 稚魚全体に占める小型稚魚の採集割合は40%以下と低かったが, 小型稚魚のうち90%以上の個体が150°E以西の海区で採集された. 低迷期における小型稚魚の採集割合は, 2002年を除いて60%以上に増加したものの, 150°E以西の海区において小型稚魚は採集されなかった (Fig. 10). 変動期の

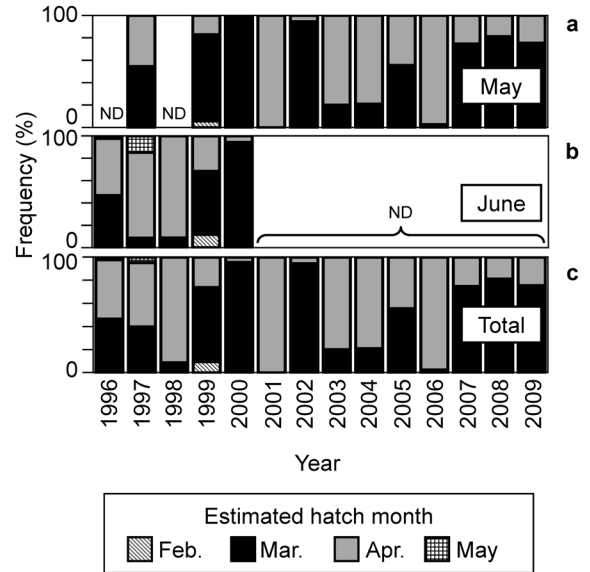


Figure 8. Hatch month compositions of number of juveniles collected in a) May, b) June, and c) total during 1996–2009. Data during 1996–2003 were referred from Takahashi et al. (2008) and ND indicates no data available.

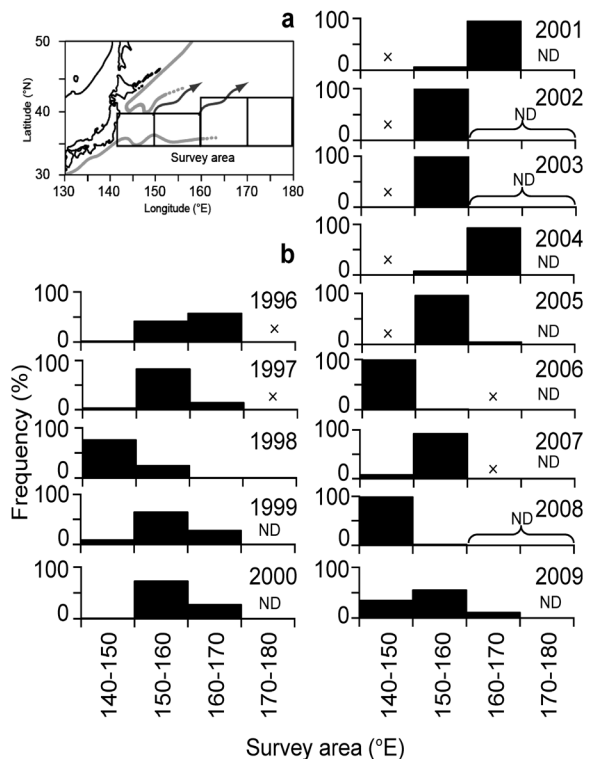
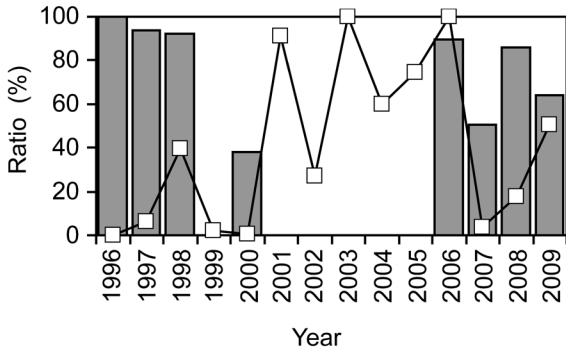


Figure 9. Occurrences of juveniles in longitudinal areas during 1996–2009. a) diagrams of longitudinal areas and b) frequency distribution of the occurrences. Crosses and ND indicates longitudinal areas without catch and samplings, respectively.



**Figure 10.** Proportions of individual numbers of small juveniles ( $\leq 40$  mm SL) to total juveniles (open squares) and occurrence of the small juveniles in waters west of  $150^\circ\text{E}$  to the entire survey area (shaded bars) during 1996–2009.

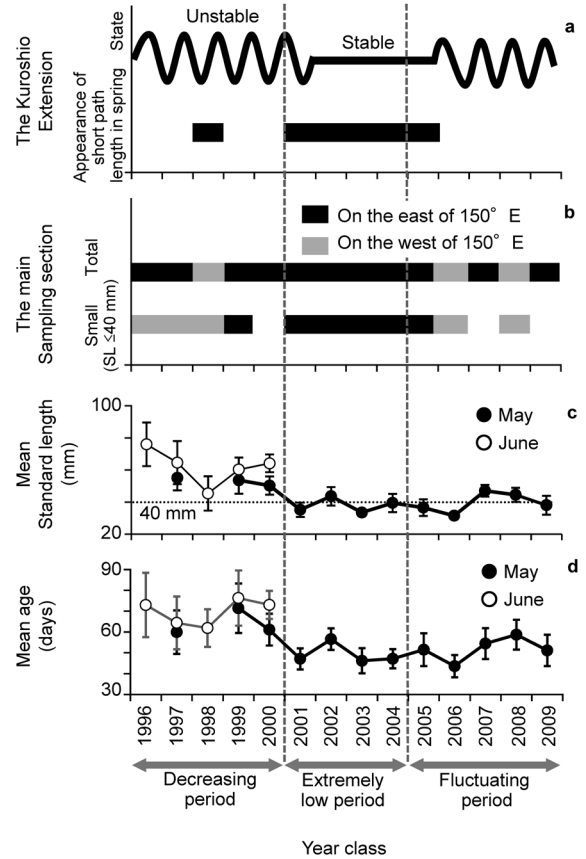
うち2006年以降には、小型稚魚の50%以上が $150^\circ\text{E}$ 以西の海区で採集された (Fig. 10).

### 考察

#### マイワシ稚魚の水平分布と海洋物理環境

黒潮親潮移行域におけるマイワシ稚魚の東西分布は、産卵場である太平洋沿岸域から常磐・三陸の東方沖へと流れる黒潮統流の影響を受けると考えられる。Qiu and Chen (2010) は、1993–2009年の海面高度データをもとに $141\text{--}153^\circ\text{E}$ における黒潮統流の流路を解析し、黒潮統流の流路は、1996–2001年には蛇行期にあったが、2002–2005年には比較的直線的に流れる収束期にあり、2006年以降再び蛇行期になったことを示した (Fig. 11-a)。黒潮統流流路の長さは、1998年と2000年冬季から2005年まで、 $2,000$  km以下で他年の $2,000\text{--}4,000$  kmよりも短かった (Qiu and Chen, 2010)。また、収束期には $150^\circ\text{E}$ 以西で再循環渦が強く海面高度が高い傾向にあることから (Qiu and Chen, 2010)、 $150^\circ\text{E}$ 以西では比較的強い統流の流れにより、本研究で5–6月に黒潮親潮移行域で採集されたマイワシ稚魚 (特に小型稚魚) は2001–2005年の間にはすみやかに東方沖へ輸送され、 $150^\circ\text{E}$ より東でのみ採集されたと考えられる。

マイワシ稚魚の体長と体形成に関しては、 $34$  mm SLでイワシラス型変態を完了し (松岡, 2008)、 $50$  mm SL以降で脂肪蓄積の指標となるC/N比が増加傾向に転じ (木下, 1998)、 $60\text{--}70$  mm SLで成魚と同じ骨格系となることが知られている (松岡, 2008)。また稚魚については、成魚と同じ骨格系になる前は稚魚相、それ以降は若魚相と区別されている (松岡, 2008)。本研究における小型稚魚は骨格が成魚と同じ骨格系になっていない稚魚相に相当するため、若魚相と比べて遊泳能力はまだ充分には高まっていないと考えられる。さらに資源低水準期ゆえに沖合域での分布密度が極めて低いため、海洋物理環境がマイワシ稚魚の分布に及ぼす影響が顕著に現れたものと考えられる。



**Figure 11.** Diagrams summarizing the results of the present study with the three periods based on the index of juvenile abundance. a: dynamic state of the Kuroshio Extension and periods shown short ( $<2,000$  km) path in the axis (Qiu and Chen, 2010). b: diagrams of the main sampling section of juveniles. Total and small ( $\text{SL} \leq 40$  mm) indicates sections of the highest frequency in Fig. 9 and of occurrence ratio exceeding 70% according to Fig. 10, respectively. c: mean standard length (SL) of juveniles collected in May (solid) and June (open) as shown in Fig. 6, respectively. Vertical bars indicate standard deviations of each sample. d: mean age of juveniles collected in May (solid) and June (open) as shown in Fig. 9, respectively. Vertical bars indicate standard deviations of each sample.

黒潮親潮移行域北部には、黒潮統流から派生した北東方向に向かう安定した流れ (準定常流) が存在しており、高温・高塩分水の供給が冬季混合層の形成に寄与している (Isoguchi et al., 2006)。この準定常流は、移行域北部から親潮域における生物生産を活発化し、生物的ホットスポットを形成するとともに (伊藤, 2010)、生物の北方への輸送にも寄与している可能性が示唆されている (Isoguchi et al., 2006)。海面高度分析から確認された2つの準定常流 (J1, J2) は、Fig. 2に模式的に示したとおり、J1は $40^\circ\text{N}$ ,  $150^\circ\text{E}$ から $45^\circ\text{N}$ ,  $160^\circ\text{E}$ へ向けて、J2は $40^\circ\text{N}$ ,  $160^\circ\text{E}$ から $45^\circ\text{N}$ ,  $170^\circ\text{E}$ へ



向けて流れている (Isoguchi et al., 2006). したがって、2001–2005年の低迷期に150°Eより東に速やかに輸送された小型稚魚はJ1の流れを利用して北上する可能性は低いと考えられ、基点が160°E付近にあるJ2に従うことで、準定常流のない海域と比べてより効率的に親潮域(亜寒帯域)まで到達することができると考えられる。

ここで黒潮統流軸の状態 (Fig. 11-a) と稚魚の分布特性 (Fig. 11-b, c, d), および加入量指数 (Fig. 11-e) を併せて示し、期間ごとにマイワシ稚魚の分布の変動を考察する。

#### 減少期 (1996–2000年)

減少期には主に東方沖合で、比較的大型で高齢の稚魚が採集された (Fig. 11-b, c). 減少期を含む1996–2001年には黒潮統流が蛇行しており、141–153°Eの経路が2,000 km以上に及ぶ、Qiu and Chen (2010) の定義による蛇行期であった。更に、他期間と比較して体長と日齢の変動係数が大きいことは体長や日齢の異なる複数の稚魚群の存在を示唆するものであり、この期間には5月よりも6月に採集された稚魚の日齢が高く体長も大きいことから、稚魚は黒潮親潮移行域において黒潮統流に沿って東方へ輸送される間に成長してJ2の流れに従い北上する可能性が考えられた。小型稚魚の採集位置は、1996–1998年には主に150°E以西の海域で採集されていたが1999年には東方沖で採集されるようになり (Fig. 11-b), 2000年にも約6割が東方沖で採集されていた (Fig. 10). これは黒潮統流南側の再循環渦が強まったこと (Qiu and Chen, 2010) により、黒潮統流の流路は蛇行しているものの部分的に流速が速まったことが影響したと考えられる。

#### 低迷期 (2001–2004年)

加入量指数の値が極めて低い2001–2004年には、マイワシ稚魚は150°Eより東でしか採集されておらず、採集された稚魚の平均SLは40 mm以下と小型で、平均日齢は2002年を除き50日齢よりも若齢であった (Fig. 11-b, c, d). また、採集された稚魚の体長と日齢の変動係数は小さく稚魚群の構成は減少期と比べて単純であり、黒潮統流の強く直進的な流れによって、40 mm SL以下の小型稚魚が150°Eより東の沖合まで速やかに輸送されたと考えられる。このような状況において、J2の流れに従い低水温の海域へ北上するまでの間に脂肪を蓄積できず、また骨格系の面からまだ十分な遊泳能力が得られていないと考えられるため、その後の生残には不利に作用すると考えられる。

#### 変動期 (2005–2009年)

黒潮統流の流路は、2005年までは収束していたが、2006年から再び蛇行するようになり (Qiu and Chen, 2010), マイワシ稚魚が黒潮親潮移行域においてゆるやかに輸送される状況に転じた。これに対応して、変動期における稚魚は150°E以西の海域でも採集されようになり (Fig. 9, Fig. 11-b), 特に小型稚魚の主な採集位置は150°E以西に移行した (Fig. 10). ただし、東西に亘り広範囲に採集され、かつ体長と日齢の

変動係数が1996–2000年と同様に比較的高かったのは、2009年のみである (Fig. 9). したがって、黒潮統流の流路は蛇行に転じたものの、1996–2000年の黒潮統流蛇行期と同様の稚魚の分布状況にはまだ至っていないと推測される。

#### 加入量指数変動と黒潮統流の動態

小型稚魚の採集位置は、低迷期の直前から起こった黒潮統流の流路の収束と再循環渦の強化に伴い、150°E以西から以東海域へと移動し、小型で若齢のまま東方沖へ速やかに輸送される状況が2000年以降継続的に起きていた。黒潮親潮移行域において、マイワシ稚魚の成長速度は水温よりも餌環境に強く影響され、1996–1998年には成長に好適な環境条件が160°E付近まで広がっていたのに対し、1999年以降には150°E以西に縮小したことが報告されている (Takahashi et al., 2009). つまりこれは、マイワシ稚魚が150°E以西に形成された好適な餌料環境条件を利用することなく速やかに黒潮統流によって150°Eより東に輸送されていたことを意味する。黒潮親潮移行域内に滞留し成長する機会を逸する状況にあったことが、2000年以降黒潮親潮移行域における加入量指数が低水準であった要因として関与したものと考えられる。

日本の太平洋側海域におけるマイワシ資源の長期変動は、気候や海洋環境変動に強く影響されることが指摘されてきた (Kawasaki, 1983; Watanabe et al., 1995; 海老沢・木下, 1998; Wada and Jacobson, 1998; Noto and Yasuda, 1999; Yatsu et al., 2005). また最近の研究では、冬季の黒潮および黒潮統流域における混合層深度がマイワシの生産速度と正の相関関係にあることが示された (Nishikawa et al., 2011). 本研究の結果は、黒潮統流の動態が黒潮親潮移行域におけるマイワシ稚魚の分布様式や好適環境条件との遭遇に影響を与えることを示唆した。マイワシの産卵場や回遊経路などの生態的特性は資源水準に伴い変化するため (伊東, 1961; Nakai, 1962; 近藤, 1988; 黒田, 1991; 平本, 1991; Watanabe et al., 1995), 資源量変動機構を解明するためには、黒潮親潮移行域におけるモニタリング調査を継続することによって、海洋環境変化に対する分布や成長・生残様式の変化を把握することが重要と考える。

#### 謝辞

小型浮魚類加入量早期把握調査を遂行するにあたりご協力いただいた、兵庫県立香住高校実習船 但州丸の丹生孝道前船長をはじめとする乗組員の皆様、および北海道教育庁実習船 北鳳丸の吉野 威 前船長をはじめとする乗組員の皆様に厚く御礼申し上げます。水産総合研究センター北海道区水産研究所の森 賢博士、山下紀生博士には、調査の実施にご協力いただきました。同中央水産研究所資源管理研究センターの皆様、同海洋・生態系研究センターの杉崎宏哉博士より貴重なご助言を頂きました。記して深謝の意を表します。なお、本研究は平成18–22年度に水産庁受



託事業の資源動向要因分析調査のもとで行なわれた。

## 引用文献

- 海老沢良忠・木下貴裕 (1998) 房総～三陸海域の水温環境とマイワシの再生産指数について. 茨城県水産試験場報告, **36**, 49–55.
- Hayashi, A., Y. Yamashita, K. Kawaguchi and T. Ishii (1989) Reading method and daily otolith ring of Japanese sardine larvae. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **55**, 997–1000.
- 平本紀久雄 (1991) 私はイワシの予報官. 草思社, 東京, 277 pp.
- 本田 聡・西田 宏・川端 淳・能登正幸 (2010) 平成22年度我が国周辺水域の漁業資源評価. 平成22年度マイワシ太平洋系群の資源評価報告書, 水産庁, 15–66.
- 石田 実・三谷卓美・上原伸二・本田 仁 (2004) 平成15年度我が国周辺水域の漁業資源評価. 平成15年度マイワシ太平洋系群の資源評価報告書, 水産庁, 11–39.
- Isoguchi, O., H. Kawamura and E. Oka (2006) Quasi-stationary jets transporting surface warm waters across the transition zone between the subtropical and the subarctic gyres in the North Pacific. *J. Geophys. Res.*, **111**, C10006, doi:10.1029/2006JC003628.
- Itoh, S., I. Yasuda, H. Nishikawa, H. Sasaki and Y. Sasai (2009) Transport and environmental temperature variability of eggs and larvae of the Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) and Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific estimated via numerical particle-tracking experiments. *Fish. Oceanogr.*, **18**, 118–133.
- 伊藤進一 (2010) 北太平洋のモード水と水産資源. *海洋と生物*, **32**, 232–236.
- 伊東祐方 (1961) 日本近海におけるマイワシの漁業生物学的研究. 日本海区水産研究所報告, **9**, 1–227.
- Kawabata, A., M. Nakagami and S. Suyama (2008) Distribution of juvenile Japanese sardine in the recent low biomass level: Using the feeding ground off the Kuril Islands. Program & Abstracts. 5th World Fisheries Congress, 1c\_024.
- 川合英夫 (1972) 黒潮と親潮の海況学. 「海洋物理II」海洋物理基礎講座編集委員会編, 東海大学出版会, 東京, 129–320.
- Kawasaki, T. (1983) Why do some pelagic fishes have wide fluctuations in their numbers? Biological basis of fluctuation from the viewpoint of evolutionary ecology. *FAO Fish. Rep.*, **291**, 1065–1080.
- 木下貴裕 (1998) 黒潮統流域の北上稚魚. 「マイワシの資源変動と生態変化, 水産学シリーズ119」渡邊良朗・和田時夫編, 恒星社厚生閣, 東京, 84–92.
- 近藤恵一 (1988) 資源高水準期における日本産マイワシの分布・回遊について. 東海区水産研究所報告, **124**, 1–33.
- 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. 中央水産研究所研究報告, **3**, 25–278.
- 松岡正信 (2008) 日本産マイワシの初期発育と産卵生態に関する研究. 水産総合研究センター研究報告, **22**, 87–183.
- Nakai, Z. (1962) Studies relevant to mechanisms underlying the fluctuation in the catch of the Japanese sardine, *Sardinops melanosticta* (Temminck & Schlegel). *Jpn. J. Ichthyol.*, **9**, 1–115.
- 西田 宏・渡邊千夏子・谷津明彦 (2001) 黒潮親潮移行域における稚魚採集結果に基づくマイワシ・マサバの加入量水準予測. 黒潮の資源海洋研究, **2**, 77–82.
- 西田 宏・高木香織・本田 聡 (2011) 資源低水準期におけるマイワシ太平洋系群の加入量変動要因の探索. 水産海洋研究, **75**, 92–94.
- Nishikawa, H., I. Yasuda and S. Itoh (2011) Impact of winter-to-spring environmental variability along the Kuroshio jet on the recruitment of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*). *Fish. Oceanogr.*, **20**, 570–582.
- Noto, M. and I. Yasuda (1999) Population decline of the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, in relation to sea surface temperature in the Kuroshio Extension. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**, 973–983.
- Qiu, B. and S. Chen (2010) Eddy-mean flow interaction in the decadal modulating Kuroshio Extension system. *Deep-Sea Res.*, **57**, 1097–1110.
- Saitoh, H., Y. Okazaki, K. Tadokoro and K. Takahashi (2010) Zooplankton. In: *Marine Ecosystems of the North Pacific Ocean, 2003–2008. PICES special publication 4*, ed. S. M. McKinnell and M. J. Dagg, 317–320.
- 田所和明 (2007) 北太平洋におけるレジームシフトとメソ動物プランクトン. 「レジームシフト理論と生物資源管理」川崎 健・谷口 旭・花輪公雄・二平 章編, 成山堂, 東京, 69–78.
- Takahashi, M., H. Nishida, A. Yatsu and Y. Watanabe (2008) Year-class strength and growth rates after metamorphosis of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific Ocean during 1996–2003. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **65**, 1425–1434.
- Takahashi, M., Y. Watanabe, A. Yatsu and H. Nishida (2009) Contrasting responses in larval and juvenile growth to a climate-ocean regime shift between anchovy and sardine. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **66**, 972–982.
- Wada, T. and L. D. Jacobson (1998) Regimes and stock-recruitment relationships in Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*), 1951–1995. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **55**, 2455–2463.
- Watanabe, Y., H. Zenitani and R. Kimura (1995) Population decline of the Japanese sardine *Sardinops melanostictus* owing to recruitment failures. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **52**, 1609–1616.
- Yatsu, A., T. Watanabe, M. Ishida, H. Sugisaki and L. D. Jacobson (2005) Environmental effects on recruitment and productivity of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* and chub mackerel *Scomber japonicus* with recommendation for management. *Fish. Oceanogr.*, **14**, 263–278.