

# 水温が伊勢湾産イカナゴ初期生活史の成長と加入資源量に与える影響

富山 実<sup>†1</sup>, 小松輝久<sup>2</sup>

## Effects of temperature on growth and recruitment during early life history of the Japanese sandeel in Ise Bay

Minoru TOMIYAMA<sup>†1</sup> and Teruhisa KOMATSU<sup>2</sup>

Growth of Japanese sandeel *Ammodytes personatus* (23.7–38.4 mm body length) collected in Ise Bay, central Japan, was investigated. The growth trajectories of individual larvae were back-calculated by using the biological intercept method based on the allometric relationship between otolith radius and body length. Because the inner rings are obscurely visible when examined under a biological microscope, we used a scanning electron microscope to identify them. The number of inner rings is higher in years of low temperature (Av. 18.5°C) than in years of high temperature (Av. 16.6°C). To align temperature to a logistic growth curve, we assumed the linear relationship between growth rate and temperature while keeping the  $L_{max}$  constant. By doing so, the logistic growth curve provides a more accurate estimation. From the field data, it was analyzed that high temperature resulted in a high growth rate and a low recruit number.

**Key words:** growth rate, back-calculation, Japanese sandeel, Ise Bay, recruitment

### はじめに

水温は、変温動物である魚類にとっては、特に大きな環境要因であり (Werner, 2002), 個体レベルでも個体群レベルでも様々な生態的影響を与える (Brett, 1979; Kamler, 1992; Neill *et al.*, 1994). 伊勢湾周辺では、イカナゴは12月下旬~1月下旬に産卵し、伊勢・三河湾内に輸送され、両湾内で例年3月上旬頃から漁獲が始まる (Funakoshi, 1997; Tomiyama *et al.*, 2005). 伊勢湾のイカナゴでは、漁獲開始後の水温と成長については、水温が低い年ほど成長が遅い (石井, 1986) との報告があるが、明らかな傾向がない (糸川, 1978; Nagoshi and Sano, 1979) との報告もあり、研究者や調査対象期間により評価が異なっていた。さらに、水温と加入資源量については、水温が低い年ほど加入資源量が多いとの報告もあり (糸川, 1978; Nagoshi and Sano, 1979; 石井, 1986), 水温は加入資源量にも影響を与えている可能性が示唆されていた。また、冬季における伊

勢湾の水温は気象の影響を強く受けるため、地球温暖化により1990年以後は高水温化の傾向が著しい (久野ほか, 2002)。この伊勢湾の高水温化は、イカナゴの初期生活史での成長や加入資源量に影響を与えている可能性があり、近年のデータを用いて水温、成長および加入資源量の関係を再検討する必要がある。また、イカナゴは塩干加工用原材料としては、小型魚の方が単価が高いが、大型サイズで漁獲した方が漁獲量は多くなることから、漁獲の解禁時点での魚体サイズには最適解禁サイズが存在し (Funakoshi, 1997), 他魚種以上に正確な漁期前の成長予測が求められている。しかし、イカナゴの成長解析には体長組成モードの経時変化を用いていたため、採集方法が一つの大きな障壁となり、漁期前 (1~2月) の水温に、成長が影響を受けることは想定されいながら、定性的な扱いに留まっていた。

一方、近年には、魚類の耳石に見られる輪紋に日周性が証明され (例えば Campana and Neilson, 1985; Campana, 2005), 耳石に見られる輪紋間隔から主に仔稚魚について個体別の成長解析が行なわれるようになった (Campana, 1990; 渡邊, 1997)。イカナゴと同属の *Ammodytes marinus* では輪紋の日周性も確認されており (Wright, 1993), イカナゴの耳石にも輪紋が確認されている (山下, 1983; Tsukamoto *et al.*, 2002)。しかし、イカナゴの耳石は、光学

2005年8月26日受付, 2006年3月3日受理

<sup>1</sup> 愛知県水産試験場漁業生産研究所

Marine Resource Research Center, Aichi Fisheries Research Institute, Toyohama, Minamichita, Aichi 470-3412

<sup>2</sup> 東京大学海洋研究所

Ocean Research Institute, University of Tokyo, 1-15-1 Minamidai, Nakano-ku, Tokyo 164-8639

<sup>†</sup> minoru\_tomiya@pref.aichi.lg.jp

顕微鏡では中心部の輪紋が読みにくく、ふ化日からの日齢査定が出来ないことが、耳石輪紋を用いて仔稚魚期の成長を解析する上で障害となっていた。

本研究では、解禁日の目安となる体長である 35 mm (Funakoshi, 1997, Tomiyama *et al.*, 2005) までの成長を走査型電子顕微鏡を用いた耳石輪紋の読み取りから定式化することで、光学顕微鏡のみによる体長復元方法の確立を目的に研究を行った。さらに、水温は仔稚魚の成長に影響を及ぼすことから、成長式に水温をパラメータとして組み込み、成長式の高精度化を目的に研究を行った。また、水温の加入資源量への影響についても検討した。

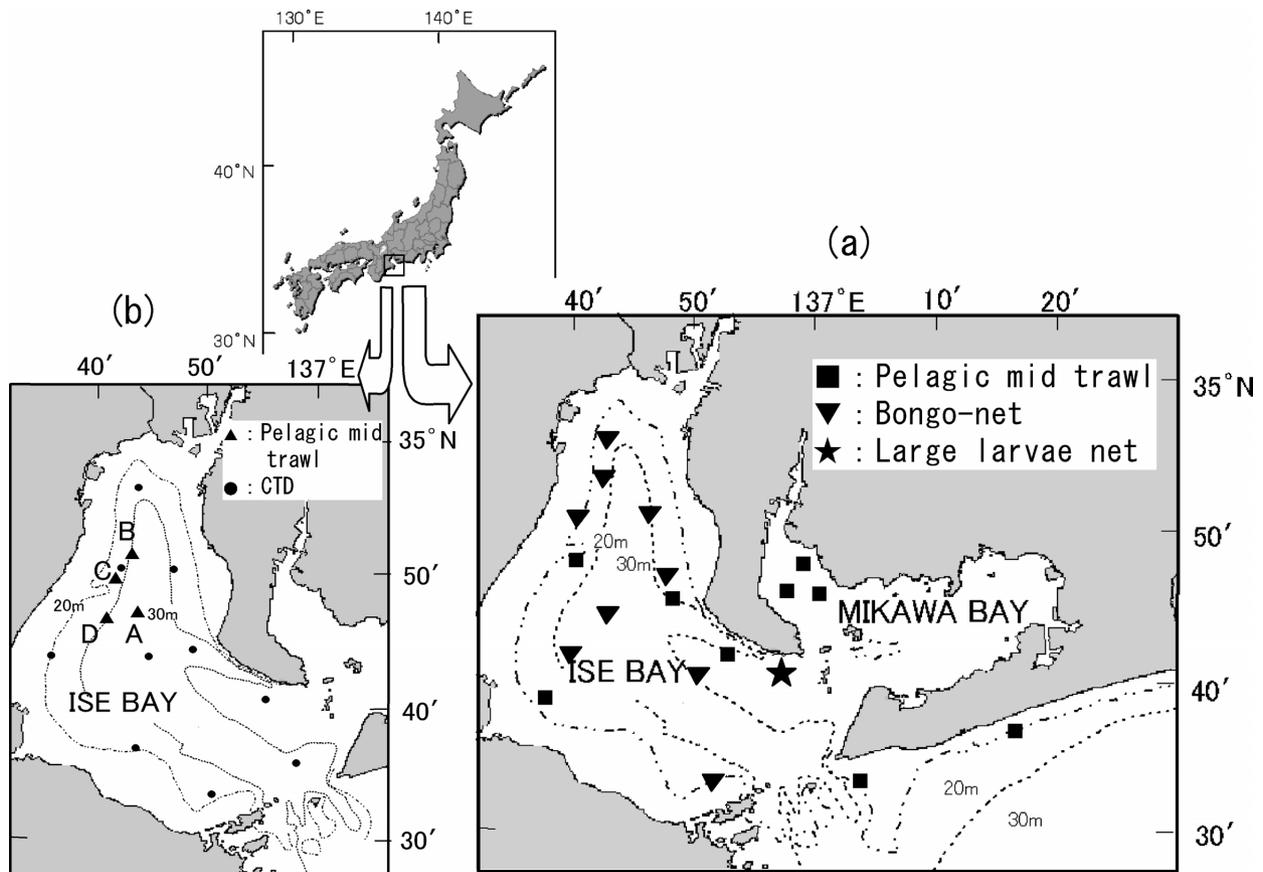
## 材料と方法

### 仔稚魚サンプリング

伊勢湾周辺のイカナゴの分布範囲が遠州灘西部から伊勢湾・三河湾であること(橋本, 1991)を考慮に入れ、耳石半径と標準体長(以下体長)の関係の解析のためには、遠州灘西部、三河湾および伊勢湾から広くサンプルを得るこ

ととし、1996年の漁期中に市場調査により採集した。海域別内訳は、遠州灘西部から2月20日に採集された40個体、伊勢湾から2月21日~3月26日に採集された80個体、三河湾から2月20日~3月15日に採集された80個体である。また、より小型のイカナゴについて、耳石半径と体長の関係を解析するため、仔魚については1998年2月5~6日に伊勢湾内9点で実施したボンゴネット調査で採集したサンプル(体長8.3~21.0mm; 24個体)を用いた。ボンゴネットは口径60cm、網目合0.335mm、海底近くから表層までの傾斜びきを行った。さらに、ボンゴネットからは逃避し、漁業者の船びき網の目合からは抜け出してしまう体長範囲のイカナゴを採集するために、富山(2002)によるサヨリ網型稚魚ネットを用いて1998年1月28日に伊勢湾豊浜沖で近表層を曳網して採集したサンプル(体長8.3~23.2mm; 30個体)も使用した。耳石半径と体長の関係解析に用いたサンプルの採集場所をFig. 1aに示す。

耳石輪紋観察を行ったサンプルは1996~1998年の2~3月の漁期中に船びき網により漁獲されたイカナゴを市場で



**Figure 1.** Maps of the study area and the sampling positions. Sampling locations of larvae for analyzing relationship between the maximum otolith radius and body length are shown in map (a). Sampling locations of larvae for back-calculating the body length are shown in map (b). A, B, C and D indicate the sampling locations of larvae for otolith daily ring analysis described in Table 1. The closed circles indicate the conductivity, temperature and density (CTD) survey stations.

**Table 1.** Sampling date, location, number and body length of specimens

Date	Area	N	Body length (mm)
3 Mar. 1996	A	11	31.2–34.5
26 Mar. 1996	B	9	23.7–26.9
6 Mar. 1997	C	23	27.0–36.6
22 Feb. 1998	D	22	29.6–38.4

採集した。また、採集場所は3年とも主漁場である伊勢湾北部 (Tomiyama *et al.*, 2005) とした。耳石輪紋観察に用いたサンプルの採集日、漁場位置、個体数、体長範囲を Table 1 および Fig. 1b に示す。

**耳石処理および輪紋計測**

漁獲物については、原則として90%アルコールで保存後、魚体長を0.1 mm精度で測定した。1996年3月26日採集の9個体のみは、冷凍保存標本から耳石を摘出したので、イカナゴ類の *Ammodytes marinus* で用いられている90%アルコール固定標本への収縮率 (0.9; Wright, 1993) を適用して補正した。10%ホルマリンと90%アルコール固定標本間では収縮補正は必要ない (Theilacker, 1980) とされており、伊勢湾でのイカナゴ仔稚魚調査では、10%ホルマリンまたは90%アルコール固定標本で体長を測定しているの、過去の成長データと比較するために、以下の計測値は収縮後の値のみで表示した。イカナゴの耳石は、実体顕微鏡下で扁平石を摘出し、プレパラート上に封入した。封入剤は、ペトロポキシ154 (米国パルース・ペトロ・プロダクツ社製) を使用した。

光学顕微鏡では、耳石の中心周辺の輪紋が不明瞭となるため、1996年採集の20個体、1998年採集の22個体については、光学顕微鏡に接続した耳石解析装置 (ラトック社製, ARP/W Version3.20) により輪紋を計測・計測した後に、走査型電子顕微鏡で得られた画像から中心周辺の輪紋を計数・計測し、同一サンプルでデータを接合した。走査型電子顕微鏡の輪紋観察には、研磨板上で耐水研磨紙、ラッピングフィルム、アルミナ懸濁液を用い、耳石を封入剤とともに研磨し、0.5Nの塩酸で耳石表面をエッチング後、白金蒸着し、走査型電子顕微鏡 (トプコン社製 ABT-55) を用いて、光学顕微鏡では輪紋の判別が不能な耳石中心部を1000倍で写真撮影した。撮影した写真は、スキャナーにより画像ファイルとして取り込み、耳石解析装置 (同上) により、輪紋を計数・計測した。耳石半径の測定軸は、最長軸上とした。なお、1997年採集分については、光学顕微鏡で観察可能な範囲でのみ輪紋の計数・計測を行った。

**体長復元法**

輪紋の日周性については飼育実験から検証されている (大美 私信)。Tsukamoto *et al.*, (2002) に従い、ふ化日に走査

型電子顕微鏡で観察される第1輪が形成されると仮定した。日別、個体別の体長復元には、ふ化時の体長が判明していて、体長と耳石最大半径との関係が数式化できる場合に適用可能な Biological intercept法 (Campana, 1990) を用いた。走査型電子顕微鏡による観察を行った1996、1998年についてはふ化日から体長復元を行った。光学顕微鏡による観察のみを行った1997年については、光学顕微鏡で観察可能な第1輪 (LM-1) より内側の輪紋数を推定した。その際、光学顕微鏡で最長軸上に中心方向へ、輪紋間隔が急激に増大するか、中心まで確認できなくなるまで輪紋位置を確認し、最も内側のものを LM-1 と規定した。推測方法は、1996年、1998年に採集され、走査型電子顕微鏡で観察した個体から、中心からの輪紋半径と輪数の関係を導出することで、LM-1 より内側の輪紋数を推測するという手順を取った。さらに、イカナゴではふ化日における個体間の体長差は小さい (山田, 1998) ことを考慮に入れ、伊勢湾産イカナゴについての既往知見から、始点であるふ化時体長は津本・山田 (1997) により3.72 mmに、ふ化時耳石半径は Tsukamoto *et al.*, (2002) により8.67 μm とした。走査型顕微鏡観察と光学顕微鏡観察での体長復元法を統一するために、体長復元の始点は共通の値を用いた。パラメータの推定には、JMP Ver.5.1 (SAS institute, 2004) を用い、非線型最小二乗法により求めた。

**水温情報を組み込んだ成長式の算出**

稚魚の成長速度は一般に初期に遅く、その後加速し変曲点で最大に達し、成長が進むと低下するため、成長曲線はS字型を示すことが特徴である (Bartsch, 2002; Jones, 2002)。そこで、ふ化日からの成長履歴を定式化する際は、成長式としては、多くの稚魚の成長表現に用いられているS字型成長曲線の一つである Logistic式を用いた。Logistic式は一般に次のように表される。

$$BL = L_{max} / (1 + \exp(-rt + c)) \tag{1}$$

ただし、BLは体長、 $L_{max}$ は最大体長、rは成長係数、tはふ化後日数、cはパラメータである。

環境変数である水温を成長式に組み入れる際には、Bartsch (2002) の方法に準じ、Logistic式の  $L_{max}$  を体長漸近値として固定し、成長係数を温度の関数とした。パラメータの推定には、JMP Ver.5.1 (SAS institute, 2004) を用い、非線型最小二乗法により求めた。

**加入資源量の算出**

愛知、三重県の共通資源である伊勢湾のイカナゴの1995年漁期~2000年漁期の加入資源量の値は山田・富山 (2001) を用い、2001年漁期分については同一法により本論文で追加した。算出法の概略を以下に記す。先ず、市場調査により愛知県、三重県別日平均体重を算出し、次に両県別々の日別漁獲重量を平均体重で除し、県別日別漁獲尾数を求めた後、合計して両県日別合計漁獲尾数を算出した。これ

を海域全体の出漁統数で除してCPUE（尾／統／日）を算出した後、一般化Delury法 (Phiri *et al.*, 1999) を適用して加入資源量を求めた。

**水温**

イカナゴ仔魚の分布中心水深は5~10m (石田, 1984; 日下部ほか, 2000) であることを考慮し、鉛直的には水深10m層の水温をイカナゴ仔魚の生息域の代表値とした。また、湾口部でふ化したイカナゴ仔魚は漁期開始まで主に伊勢湾に広く分布する (Tomiya *et al.*, 2005) ことから、水平的には伊勢湾全域の平均水温をイカナゴ仔魚の生息域の代表値とした。そして、1994年12月上旬~2001年3月下旬まで、原則として毎年12月から3月の間、旬毎に、伊勢湾内10点 (Fig. 1a) で、CTD (Neil Brown製, Model1150 Mark3B) により水温を測定し、10m層の平均水温を算出した。ただし、2001年1月上旬は荒天のため欠測したため、1995年から2000年までの、1月上旬から1月中旬の間での水温の平均変化率を用い、2001年1月中旬の水温から補完して求めた。水温と加入資源量の線形モデルで、どの時期の水温が最も加入資源量の変動に寄与していくかを調べるために、複数モデル間におけるモデル比較を行ったが、基準としては、小標本の場合にパフォーマンスがよい (庄野, 2004) とされるc-AIC (finite correction of AIC) を用いた。c-AICの算出には、Kyplot 4 (Kyence, 東京) を用いた。

**結果**

**体長 (BL) と耳石半径 (OR) との関係および中心周辺の輪紋の計測**

耳石半径と体長の関係を走査型電子顕微鏡観察を行った1996年、1998年ともにアロメトリー式で近似したところ以下の様になった (Fig. 2).

$$BL = 2.85OR^{0.4890} \quad (1996)$$

$$BL = 1.43OR^{0.6144} \quad (1998)$$

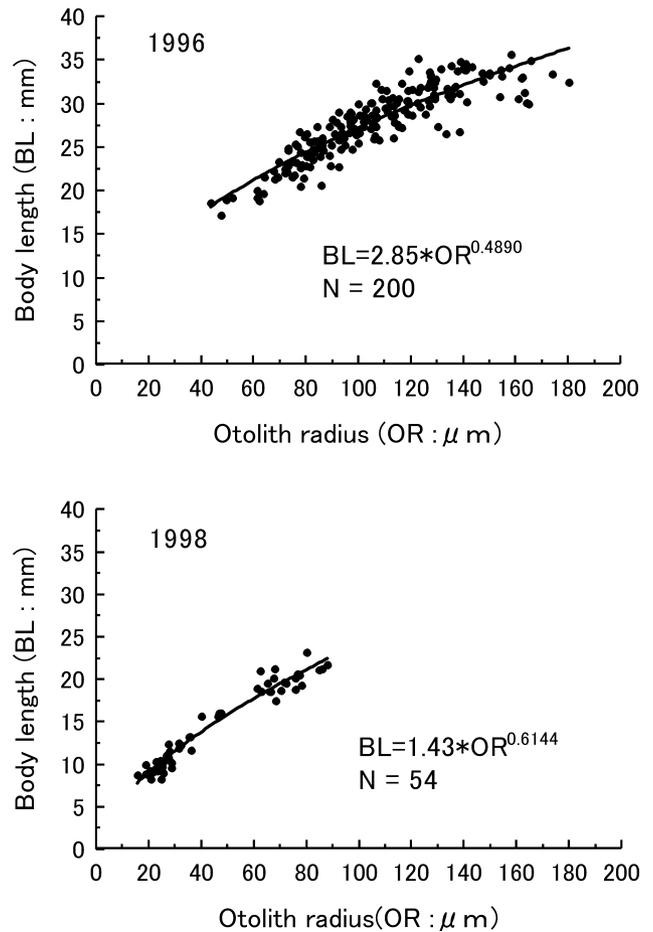
同一の耳石を光学顕微鏡で観察した後で、走査型電子顕微鏡で観察すると、LM-1の内側にはさらに輪紋が観察された (Fig. 3)。この輪紋数は、1996年は12~25 (Av.; 18.5, SD; 3.32), 1998年は13~21 (Av.; 16.6, SD; 2.42) となり、この2年で有意差が認められた (個々の分散を用いたt検定;  $p < 0.1$ )。また、LM-1の輪紋径をDとすると、内側に走査型電子顕微鏡で観察される輪紋数 (Nr) は1996年、1998年採集のデータをあわせて

$$Nr = 21.32 \ln(D) - 52.13 \quad (2)$$

で表された (Fig. 4)。

**成長式の算出**

光学顕微鏡による計測しか行っていない1997年のデータについては、(2)式を用いてLM-1の形成された時点のふ化



**Figure 2.** Allometric relationship between the maximum otolith radius (OR) and body length (BL) in 1996 (top) and 1998 (bottom). BL is measured as standard length.

後日数を決定した。次に3年分のデータをまとめ、最大体長を制限せずに、(1)式に非線形最小二乗法で回帰したところ成長式は、

$$BL = 45.15 / (1 + \exp(-0.06315t + 2.439)) \quad (3)$$

となった。

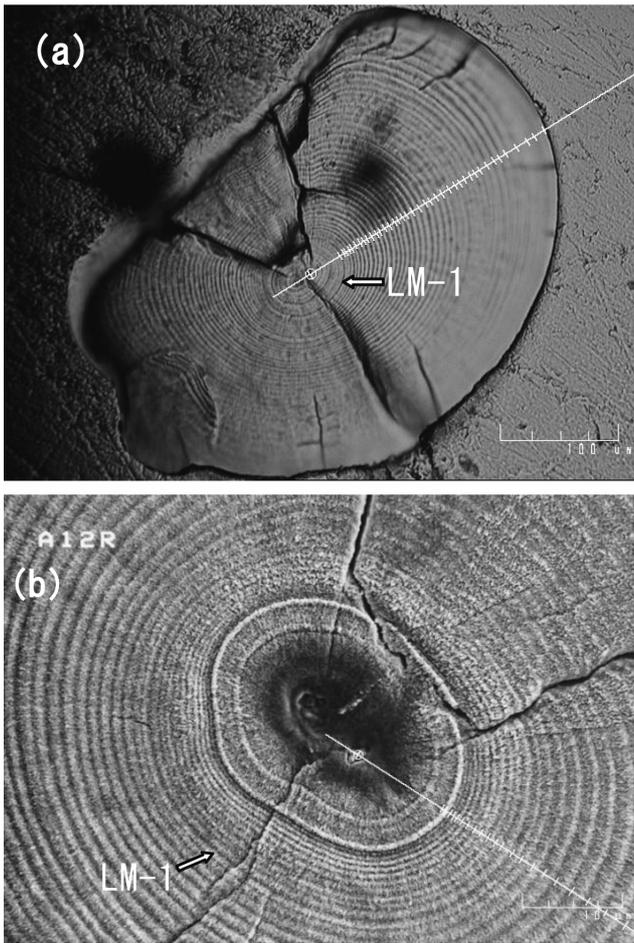
次に1996, 1997, 1998年の各年について、式(1)の $L_{max}$ を45に設定して、Logistic式に非線形最小二乗法で近似した成長式を実線で示す (Fig. 5)。水温が低い方から1996, 1997, 1998年の順に成長係数rは大きくなっていった (Table 2)。ここで、rとcの関係は、

$$c = 8.279r + 1.925 \quad (R^2 = 0.87) \quad (4)$$

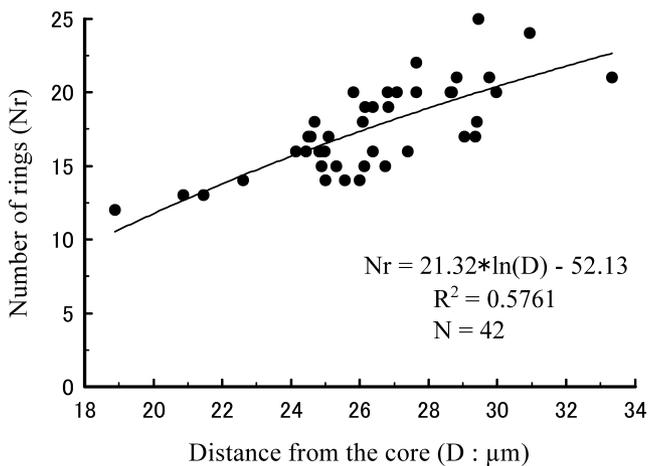
と表せる。

次に、1996, 1997, 1998年の1, 2月の10m層平均水温をTとした時、水温を組み込んだ成長係数r(T)は、

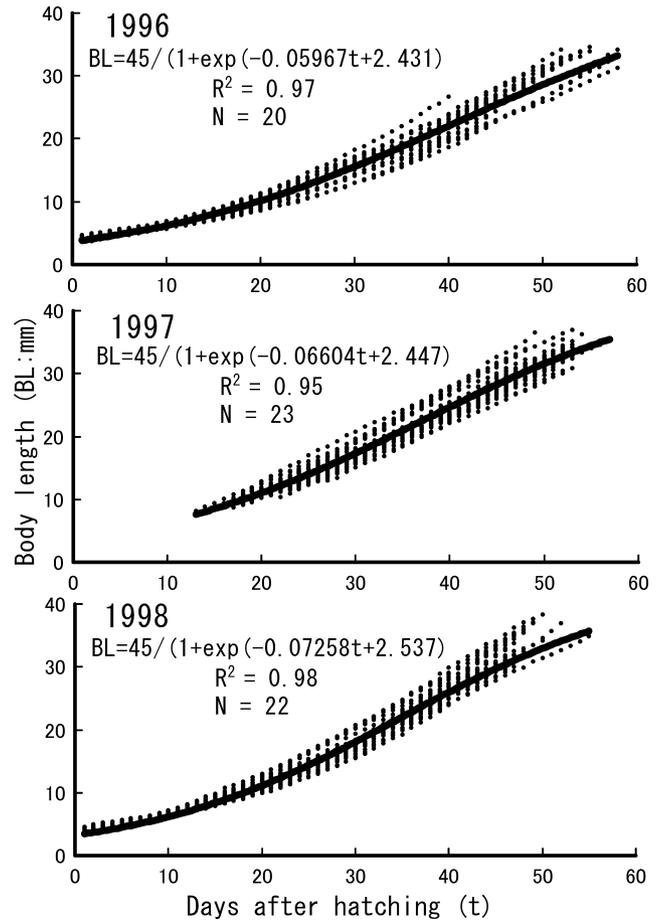
$$r(T) = 0.006033T + 0.008689 \quad (R^2 = 0.97) \quad (5)$$



**Figure 3.** Photographs of sagittal otolith of juvenile sandeel. Both photographs are of the same specimen (body length (BL): 31.5 mm). (a) Light micrograph, and (b) scanning electron microscopy (SEM) photograph, LM-1: first countable increment observed by light micrograph.



**Figure 4.** Relationship between the number of inner rings (Nr) of LM-1 observed by SEM and the distance (D) from the core to LM-1.



**Figure 5.** Back-calculated body length and the fitted growth curve in 1996 (top), 1997 (middle) and 1998 (bottom). The closed circles indicate the back-calculated body length measured by the biological intercept method (Campana, 1990). Solid lines indicate the lines fitted to the logistic model.

**Table 2.** Fitted parameters of  $L_{max}$  fixed ( $L_{max} = 45$ ) logistic model.

Year	T	r	c	N	$R^2$
1996	8.62	0.05967	2.431	20	0.97
1997	9.26	0.06604	2.447	23	0.95
1998	10.67	0.07258	2.537	22	0.98

$$BL = 45 / (1 + \exp(-rt + c))$$

T shows the average water temperature during January and February.

と表せる. (4), (5) 式を  $L_{max}$  を 45 に設定した (1) 式に代入すると

$$BL = 45 / (1 + \exp((0.006033T + 0.008689)(8.279 - t) + 1.925)) \quad (6)$$

となり、体長による成長式に水温を組み込むことができる。

ただし、 $t$ はふ化後日数である。

ここで、水温を組み込まない成長式 (3) と本研究で得られた1, 2月の水温データを組み込んだ成長式 (6) の2つのモデルの適合度を、1996, 1997, 1998年の復元体長データについて比較した。モデル適合度は、残差平方平均 (残差平方和/自由度) を用いて評価した (Table 3)。その結果、3年とも水温データを組み込んだ方が残差平方平均が減少した。このことから、水温を組み込んだ成長式を用いた方が、成長予測の精度が向上することが明らかになった。

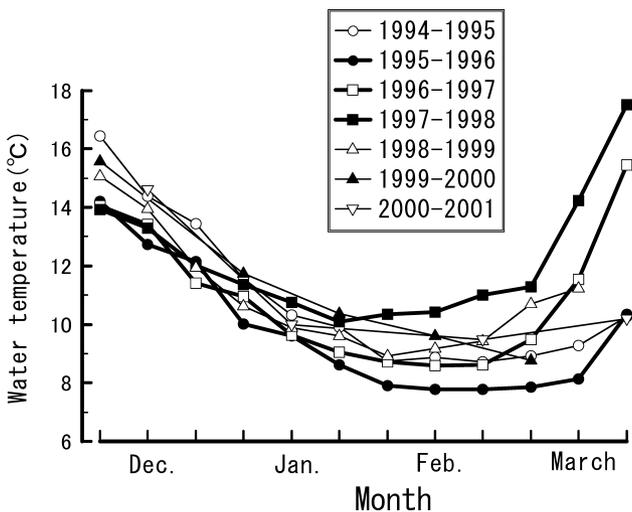
**水温と加入資源量の関係**

イカナゴのふ化時から体長35 mm 前後 (解禁サイズ) にあたる1~2月について見ると、1月は水温低下期にあたり、比較的年較差が小さい。一方、2月は年間最低水温期から上昇期にあたり、年較差が大きい (Fig. 6)。1~2月の間では、1996年が最低、1998年が最高を示し、他の5年はその

**Table 3.** Comparison of the non-temperature-mediated model (NTM model) and the temperature-mediated model (TM model) with mean square error.

Year	Non-temperature mediated model	Temperature mediated model
1996	2.30	1.93
1997	3.47	2.74
1998	5.24	1.75

NTM model: fitting to  $BL = 45.15 / (1 + \exp(-0.06315t + 2.439))$   
 TM model: fitting to  $BL = 45 / (1 + \exp((-0.006033T + 0.008689)(8.279 - t) + 1.925))$



**Figure 6.** Seasonal variation in the water temperature in Ise Bay between December to March. The water temperature represents the average value in 10 stations with a depth of 10 m.

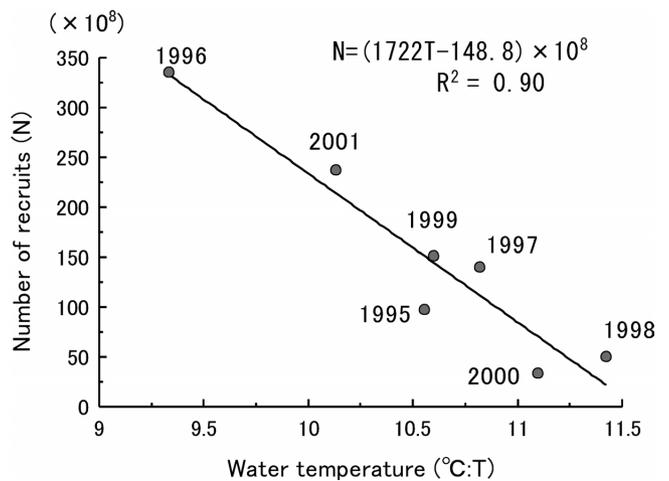
間で変動していた。

水温 (T) の加入資源量 (N) に与える影響を評価するために、線形回帰を行った。水温は旬別に1月上旬から2月下旬までの6旬と、1月3旬の平均、2月3旬の平均、1~2月6旬の平均の9通りで回帰を行い、複数モデル間におけるモデル比較を行ったところ、c-AICの値が最小だったため (Table 4)、1月3旬の平均水温を代表値とした。その結果、1月平均水温 (T) と加入資源量(N)の間には、負の相関が見られた Fig. 7,  $p < 0.001$ 。また、加入資源量を1996, 1997, 1998年の3年で比較すると、成長係数 (Table 2のr) が最小の1996年が最多で332億尾、成長係数が最大の1998年が最小で51億尾、中間の1997年が152億尾と、加入資源量が多いほど成長係数が小さかった。

**Table 4.** Fitted parameters of linear model ( $N = A1 + A2 \times T$ ) and c-AIC values.

Period	A1	A2	c-AIC
E-January	1470	-116.9	84.56
M-January	1649	-142.0	87.62
L-January	1539	-141.2	88.02
E-February	1147	-107.7	91.79
M-February	947	-86.0	93.30
L-February	880	-80.6	94.86
Av-January	1722	-148.8	81.71
Av-February	1032	-95.9	93.13
Av-Jan.-Feb.	1416	-128.1	88.95

T shows the average water temperature at 10 m depth in Ise Bay at every ten days of month during January and February. N shows the number of recruits. A1 and A2 show parameters.



**Figure 7.** Relationship between the average water temperature at 10 m depth in January in Ise Bay (T) and the number of recruited sandeel (N) estimated by the generalized Delury method (Phiri *et al.*, 1999).

**Table 5.** Daily growth rate (mm/day) by the linear regression model and the fitted duration.

Year	Growth rate (mm/day)	Fitted duration (days)
1996	0.68	30–58
1997	0.72	30–57
1998	0.85	26–55

**考 察**

**電子顕微鏡による耳石輪紋の解析**

今回の研究では、光学顕微鏡によって観察可能なイカナゴ耳石輪紋の第1輪の内側の不明瞭帯には、走査型電子顕微鏡により、さらに12~25個の輪紋が観察された (Fig. 3)。これにより、光学顕微鏡観察の際に、輪紋が不明瞭で判読できなかった、中心部付近の輪紋数を式 (2) を用いて推定することができるようになった。走査型電子顕微鏡を用いた成長解析は、試料の作成に多大な労力を要し、多くの個体数を処理することが困難で、迅速なデータ処理には適していない。しかし、今回の研究で、光学顕微鏡のみを用いた耳石輪紋観察のデータからも卵黄吸収後の成長やふ化日を推定する手法が確立したので、今後は、卵黄吸収後の成長やふ化日と生残率の関係など、今まで検討が遅れていた分野への適用が可能になった。イカナゴ仔魚耳石の中心部付近で輪紋が不明瞭であることは、山下 (1983)、Tsukamoto *et al.*, (2002) によっても報告されており、同属近縁種 (*Ammodytes marinus*) の耳石を光学顕微鏡により観察した Wright (1993) は、卵黄吸収時に初めて明瞭な輪紋が入ると推察している。イカナゴ類は卵黄を保持しながら、摂餌することが知られており (Yamashita and Aoyama, 1986; Wright, 1993)、この期間には明瞭な摂餌日周性がないことから輪紋が不明瞭になると推定される。次に今回の天然環境下でのLM-1より内側の輪紋数と山田 (1998) による飼育実験による卵黄吸収までの日数を比較してみる。山田 (1998) の飼育実験では、ふ化後30日後で体長11.3mmに成長していたが、今回の結果と比較を可能とするために収縮率0.9で補正 (Wright, 1993) すると10.2mmとなる。これは今回の結果のうち、平均年に近かった1997年の30日令における復元体長 (Fig. 5, 中央: 平均15.6mm) よりかなり成長が遅く、山田 (1998) の餌料環境は本研究での平均的な天然環境下よりも悪かったと推定される。LM-1より内側の走査型電子顕微鏡でしか判別できない輪紋数の最低値は、1996年が12、1998年が13と、山田 (1998) の飼育条件下での卵黄吸収までの日数 (13日) とほぼ一致したことから、卵黄保持期間にLM-1より内側の輪紋が形成されたことが推察される。さらに、LM-1より内側の輪紋数は1998年に比べ1996年の方が多かったが、伊勢湾産イカナ

ゴを用いた飼育実験では、無給餌区より給餌区で卵黄吸収の終了期間が遅い (山田, 1998) ことが示されている (山田, 1998)。これらのことから、1996年には1998年より天然プランクトンも多かったと推定される。これは、中心からLM-1までの輪紋数や輪紋径が、初期餌料環境の指標となる可能性を示唆している。ただ、観測例が少ないことから、プランクトン調査結果 (中田, 2001) とも符合させ、今後さらに検討する必要がある。

**水温が成長と加入資源量に与える影響**

本研究では、イカナゴの加入資源量水準は低水温年に高い傾向が明瞭であったが (Fig. 7)、漁期前の仔稚魚の成長係数は高水温年に高かった (Table 2)。冬季の伊勢湾では、水温が低いほどイカナゴ仔稚魚の主餌料である *Acartia omorii* や *Paracalanus* sp. の現存量が多いことから (中田, 2001)、低水温年の好適な餌料環境が高い加入資源量につながったことが考えられる。一方、漁期中の体長組成の経時変化から、加入資源量が少ない年には成長速度が速いことが報告されている (糸川, 1978; Nagoshi and Sano, 1979; 石井, 1986)。このことから、高水温年には初期の生残率は低いが、生き残った個体については餌生物に対する競争が緩和され、高い成長速度が得られた可能性も考えられる。伊勢湾における浮魚類の成長速度に関しては、マイワシ当歳魚においても密度効果が報告されている (船越, 1996)。しかし、伊勢湾産イカナゴ資源における高水温-高成長-低加入資源量水準の関係を構成するメカニズムについては、今後、成長および環境条件に関する仔魚期からの詳細な研究が必要である。

これまで、イカナゴ仔魚の成長は、経験的にある程度の体長まではべき乗関数で近似し、それ以後は一次式で近似していた (向井, 1988)。今回の研究結果 (Fig. 5) においても、ふ化後日数と体長の関係は、体長15~35mmの間ではほぼ直線で回帰出来る。耳石輪紋からの日別復元体長データを線形回帰し、日成長速度を算出すると、1996年は0.66 mm/day、1997年は0.72 mm/day、1998年は0.85 mm/dayとなった (Table 5)。これは1957~1977年までの漁獲物から求めた成長速度、0.21~0.97の範囲 (糸川, 1978) に入る。1976~1985年の漁獲物から求めた成長速度は0.78~1.07 (石井, 1986) と、今回の結果よりやや速い成長速度の年も見られているが、1978~1982年は、5年に及ぶ大不漁期 (Funakoshi, 1997; Tomiyama *et al.*, 2005) であり、低資源水準であったため、前述の密度効果などにより高い成長速度になった可能性がある。

**高水温化にともなうイカナゴ漁業への影響**

今回の研究で明らかになったように (Fig. 7)、イカナゴではふ化後1~2ヶ月間の高水温化により、加入資源量が減少することが明らかになった。さらに、高水温化すると、ふ化後の仔魚の成長が早く、ふ化から漁獲解禁までの期間が短縮されることとなり、既往のモニタリング調査の時期

(富山, 2004) の見直しが必要となる。また、漁獲解禁後の成長速度の増加は、塩干加工適期の短縮となり、加工業者への影響が大きくなる。この様に、イカナゴ仔魚期の高水温化は、イカナゴ漁業にとって悪影響を及ぼすことが推察された。

## 謝 辞

本研究を行うに当たり、標本魚採集をはじめ、多くのご協力をいただいた三重県科学技術振興センター水産研究部、山田浩且主幹研究員に感謝します。さらに走査型電子顕微鏡の標本作成に当たり、瀬戸内海区水産研究所、銭谷弘博士および(株)日本エヌ・ユー・エス、斎藤真美研究員に大変お世話になり感謝します。また、多くの貴重な助言をいただいた愛知県水産試験場、鈴木輝明博士、船越茂雄博士および三重県科学技術振興センター水産研究部、久野正博主任研究員に感謝します。なお、本研究は、水産庁委託事業「漁場生産力モデル開発基礎調査」の成果であり、研究の一部は、東京大学海洋研究所共同研究(採択No.30平成15年度および採択No.25平成17年度)として行われた。

## 引用文献

- Bartsch, J. (2002) Modelling the temperature mediation of growth in larval fish. *Fish. Oceanogr.*, **11**, 310–314.
- Brett, J. R. (1979) Environmental factors and growth. In: *Fish Physiology*, eds. W. S., Hoar, D. J. Randall and J. R. Brett, Academic Press, New York, 599–675.
- Campana, S. E. (1990) How reliable are growth back-calculations based on otolith? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **47**, 2219–2227.
- Campana, S. E. (2005) Otolith science entering the 21st century. *Mar. Freshw. Res.*, **56**, 477–483.
- Campana, S. E. and J. D. Neilson (1985) Microstructure of fish otoliths. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **42**, 1014–1032.
- 船越茂雄 (1996) 伊勢・三河湾における動物プランクトンの変動—マイワシ来遊量との関係—. *月刊海洋*, **28**, 142–147.
- Funakoshi, S. (1997) Case study of reproduction-oriented stock management in governor-licensed fisheries: sand lance stock management. In: *Towards Sustainable Fisheries*, eds. W. Emerson and L. Shettle, OECD, Paris, 338–348.
- 橋本博明 (1991) 日本産イカナゴの資源生態学的研究. *広大生物資源研報*, **30**, 135–192.
- 石田基雄 (1984) 伊勢湾におけるイカナゴ稚魚の分布と海洋環境. 昭和59年度沿岸重要資源委託調査成果報告書, 12–19.
- 石井克也 (1986) 伊勢湾産イカナゴの再生産関係と、水揚金額からみたイカナゴ漁の解禁日の決定. 昭和61年度沿岸重要資源委託調査成果報告書, 63–80.
- 糸川貞之 (1978) 伊勢湾産イカナゴの資源研究—I 当歳魚の成長について. 昭51三重伊勢湾水試事報, 151–156.
- Jones, C. M. (2002) Age and growth. In: *Fishery Science*, eds. L. A. Fuiman and R. G. Werner, Blackwell Science, Oxford, 33–63.
- Kamler, M. (1992) Early Life History of Fish: An Energetics Approach, Chapman & Hall, London, 267 pp.
- 久野正博・藤田弘一・西村昭史・山田浩且・山田二久次・関口秀夫 (2002) 伊勢湾の海況とプランクトン量の変動. *日本プランクトン学会報*, **49**, 122–127.
- 向井良吉 (1988) 伊勢湾におけるイカナゴの漁況予測. *水産海洋研究会報*, **52**, 380–383.
- 日下部敬之・中嶋昌紀・佐野雅基・渡辺和夫 (2000) 大阪湾におけるイカナゴ *Ammodytes personatus* 仔魚の鉛直分布と摂餌に対する水中照度の影響. *日本水誌*, **66**, 713–718.
- Nagoshi, M. and M. Sano (1979) Population studies of sand eel, *Ammodytes personatus*, in Ise Bay I. Growth and its relation to population density. *Japan. J. Ecol.*, **29**, 1–10.
- 中田 薫 (2001) 動物プランクトンと魚の関係—魚類の加入量変動要因としての動物プランクトン—. *月刊海洋号外*, **27**, 238–243.
- Neill, W. H., J. M. Miller, H. W. Van der Veer and K. O. Winemiller (1994) Ecophysiology of marine fish recruitment: a conceptual framework for understanding interannual variability. *Neth. J. Sea Res.*, **32**, 135–152.
- Phiri, H., K. Shirahara and T. Yamakawa (1999) A generalized Delury's method based on Taylor's power law and its application to a pelagic species in southern Lake Tanganyika. *Fish. Sci.*, **65**, 717–720.
- 庄野 宏 (2004) CPUE標準化に用いられる統計学的アプローチに関する総説. *水産海洋研究*, **68**, 106–120.
- Theilacker, G. H. (1980) Changes in body measurements of larval northern anchovy, *Engraulis mordax*, and other fishes due to handling and preservation. *Fish. Bull. US*, **78**, 685–692.
- 富山 実 (2002) 加入後のイカナゴ仔稚魚を対象とした3タイプの稚魚採集用ネットの開発. *愛知水試研報*, **9**, 33–38.
- 富山 実 (2004) 伊勢湾におけるイカナゴの加入・生残に関するモニタリング. *月刊海洋*, **36**, 26–30.
- Tomiyama, M., C-M. Lesage and T. Komatsu (2005) Practice of sandeel fisheries management in Ise Bay toward responsible and sustainable fisheries. *Global Environmental Research*, **9**, 139–150.
- Tsakamoto, Y., H. Yamada and H. Zenitani (2002) Microincrements of otoliths of the Japanese sand lance *Ammodytes personatus* during early life stages. *Fish. Sci.*, **68**, 1158–1160.
- 津本欣吾・山田浩且 (1997) 伊勢湾産イカナゴの卵発生と仔稚魚の形態. 漁場生産力モデル開発基礎調査(伊勢・三河湾)平成6–7年度研究報告, 36–38.
- 渡邊良朗 (1997) 年齢形質の有効性検討. 水産動物の成長解析, 赤嶺達郎・麦谷康雄編, 恒星社厚生閣, 東京, 17–27.
- Werner, R. G. (2002) Habitat requirements. In: *Fishery Science*, eds. L. A. Fuiman and R. G. Werner, Blackwell Science, Oxford, 161–182.
- Wright, P. J. (1993) Otolith microstructure of the lesser sandeel, *Ammodytes marinus*. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **73**, 245–248.
- 山田浩且 (1998) 伊勢湾産イカナゴのふ化特性と外部栄養への転換. *日本水誌*, **64**, 440–446.
- 山田浩且・富山 実 (2001) 2000年漁期におけるイカナゴの再生産状況. 漁場生産力モデル開発基礎調査(伊勢・三河湾)平成11年度研究報告, 35–40.
- 山下 洋 (1983) 三陸大槌湾周辺におけるイカナゴの資源加入に関する初期生態の研究. 東京大学学位論文, 256 pp.
- Yamashita, Y. and T. Aoyama (1986) Starvation resistance of larvae of the Japanese sand eel *Ammodytes personatus*. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* **52**, 635–639.