

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

以耳石微化學解析台灣海峽烏魚的洄游環境史

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2611-M-002-019-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學漁業科學研究所

計畫主持人：曾萬年

共同主持人：沈川洲

計畫參與人員：王佳惠，張美瑜

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 4 日

## 摘要

為了瞭解台灣河口域烏魚 (*Mugil cephalus* Linnaeus 1758) 的生活史、入添動態、及其洄游環境史，首先驗證耳石鋇鈣 (Sr/Ca) 比與鹽度的關係，然後解析河口域的稚魚及不同棲地的成魚之耳石微細構造及其 Sr/Ca 比。

由實驗室飼養的稚魚耳石 Sr/Ca 比，與鹽度關係的實驗中發現，水體 Ca 與 Sr 的含量，隨著鹽度 (0-35‰) 呈直線性增加；但 Sr/Ca 比在 0‰淡水中平均為  $7.9 \pm 0.4 \times 10^{-3}$ ，5‰海水中為  $15.1 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ，其間增加約 2 倍，在 5-35‰海水中平均值無差異 ( $14.0 \pm 0.8 \times 10^{-3}$ )。耳石 Ca 含量，不受鹽度 (0-35‰) 的影響，平均值為  $38.6 \pm 0.4\%$ ；但耳石 Sr 含量及 Sr/Ca 比，與水體 Sr/Ca 比的變化一致，在 0‰淡水 (Sr  $0.1 \pm 0.01\%$ 、Sr/Ca 比  $3.2 \pm 0.4 \times 10^{-3}$ )，及 5-35‰海水中 (Sr  $0.2 \pm 0.03\%$ 、Sr/Ca 比  $6.4 \pm 0.7 \times 10^{-3}$ )，也相差約 2 倍。此外，5-35‰海水中的耳石 Sr/Ca 比，與成長率呈負相關。這表示烏魚耳石的 Sr/Ca 比，與鹽度及成長率的變化有關，可用來重建烏魚在淡水及海水間的洄游環境歷史。

關鍵字：烏魚，耳石，鋇鈣比，入添動態，洄游環境史。

## ABSTRACT

To understand the life history, estuarine recruitment dynamics, and migratory environmental history of the grey mullet *Mugil cephalus* in the coastal waters of Taiwan, I examined the relationship between Sr/Ca ratios and ambient salinity, and analysed otolith microstructures and Sr/Ca ratios in juveniles sampled in estuaries and in adults from various habitats.

A validation experiment indicated that the relationship between Sr/Ca ratios in otoliths of juvenile mullet and ambient salinity was non-linearly related. Ca and Sr contents in the rearing water increased linearly with salinities from 0-35‰. Sr/Ca ratios in the rearing water was non-linearly related to salinity; ratios increased approximately 2 fold from  $7.9 \pm 0.4 \times 10^{-3}$  in 0‰ freshwater to  $15.1 \pm 0.6 \times 10^{-3}$  in 5‰ seawater and remained constant of  $14.0 \pm 0.8 \times 10^{-3}$  in salinities from 5-35‰. In contrast, Ca content in the new increment of otoliths deposited during the 30 day rearing period did not change with salinities ranging from 0 to 35‰, averaging  $38.6 \pm 0.4\%$ . Sr content and Sr/Ca ratios in the otoliths increased approximately 2-fold from  $0.1 \pm 0.01\%$  (Sr) and  $3.2 \pm 0.4 \times 10^{-3}$  (Sr/Ca) in 0‰ freshwater to  $0.2 \pm 0.03\%$  (Sr) and

$6.4 \pm 0.7 \times 10^{-3}$  (Sr/Ca) in 5-35‰ seawater, which was consistent with the change in Sr/Ca ratios of the rearing water. In addition, Sr/Ca ratios in otoliths of fish reared in 5-35‰ seawater were negatively correlated with the otolith growth rate. These results indicate that Sr/Ca ratios in the otoliths were interactively affected by salinity and fish growth rate, which can be used to reconstruct environmental history of the mullet by differentiating fish migration between freshwater and seawater.

Key words: Grey mullet, *Mugil cephalus*, Otolith, Strontium:Calcium ratio, Recruitment dynamic, Migratory environmental history.

### 緣由及目的

耳石是時間及環境的記錄器，透過其微細構造及微化學分析，將有助於瞭解過去的烏魚生活史事件及洄游環境歷史。本研究的目的為(1)以稚魚為材料，設計不同鹽度的飼育實驗，直接驗證耳石鋇鈣比與鹽度的關係。(2)分析河口域仔稚魚耳石的微細構造、判讀日齡及測定其耳石鋇鈣比，來瞭解仔稚魚的入添機制，以及由耳石鋇鈣比反推其洄游環境，以便連結稚魚的時空分布，與成魚洄游環境之關係。(3)由成魚耳石的年齡判讀及鋇鈣比的時序列變化，重建每尾烏魚的生活史及其洄游環境史，以期瞭解不同系群的烏魚之生活歷程，及其利用淡水棲地的情形。

### 材料與方法

2002年2月，採集自台灣西北部公司田溪河口域的天然稚魚，馴化之後，進行耳石 TC 螢光環的標識，當作鹽度實驗的起點 (Chang et al. 2000)。然後，將 160 尾稚魚平均分配至 8 種鹽度 (0、5、10、15、20、25、30、35‰)，各 2 重覆的條件下，分別飼養 30 天。存活的稚魚，利用 95%酒精固定後，以電動游標尺測量其全長 (Total length, TL)；經 60°C 乾燥 48 小時後，以電子天秤測量其乾重 (Dry weight, DW) 至精度 0.0001g。

利用原子吸收光譜儀 (Atomic absorption spectrophotometer, AAS; Z-5000, Hitachi)，以空氣-乙炔混合氣體之火焰分析法，測定水樣及魚體中的鈣與鋇離子濃度。稚魚耳石，以電子微探儀 (EPMA) 在 TC 螢光環後的耳石新增區域進行測定鈣及鋇離子的相對重量百分率 (wt%)。

## 結果

### 1. 存活率

不同鹽度條件 (S) 下的稚魚存活率 (SV)，可套用如下的二次多項式。稚魚存活率的理論最適鹽度為 15.4‰，表示烏魚適合生存的鹽度環境為半淡鹹水，而非在淡水或海水。

$$SV = -0.20Se^2 + 6.16Se + 36.23 \dots\dots\dots (4)$$

$$(r = 0.93, n = 16, p < 0.001)$$

### 2. 體成長及耳石成長

飼養在 8 種鹽度條件下的稚魚，其體長 (TL)、乾重 (DW) 及耳石半徑 (OR)，並沒有顯著的差異 (Nested-ANOVA,  $p > 0.05$ )。DW-TL 及 OR-TL 關係式，也沒有鹽度間的差異 (ANCOVA,  $p > 0.05$ )。因此，不分鹽度，合併分別計算如下：

$$DW = 1.58 \times 10^{-5} TL^{4.38} \dots\dots\dots (5)$$

$$(r = 0.95, n = 89, p < 0.001)$$

$$OR = 27.70TL - 271.91 \dots\dots\dots (6)$$

$$(r = 0.91, n = 89, p < 0.001)$$

稚魚經四環素浸泡後，在螢光顯微鏡下，耳石呈現一個明顯的黃色螢光標識環，自標識環至耳石邊緣的成長輪，約 30 輪，表示耳石成長輪的形成，具有日周性。鹽度及重覆間耳石成長率沒有顯著性差異 (Fig. 1)。耳石成長率並不因耳石大小而異 (Fig. 2)。

### 3. 飼育水中鈣、鋇離子的濃度及鋇鈣比

淡水 (0‰) 中的鈣離子濃度為  $8.28 \mu\text{g ml}^{-1}$ ，35‰海水中為  $539.56 \mu\text{g ml}^{-1}$ ，相差約 65 倍。鋇離子的濃度，淡水與海水約相差 108 倍 (0‰： $0.07 \mu\text{g ml}^{-1}$ ，35‰： $7.14 \mu\text{g ml}^{-1}$ )。鈣及鋇的濃度皆與鹽度 (S) 呈高度的線性關係 (Figs. 3a, b)：

$$[\text{Ca}]_{\text{water}} = 15.50S - 5.56 \dots\dots\dots (7)$$

$$(r = 0.998, n = 24, p < 0.001)$$

$$[\text{Sr}]_{\text{water}} = 0.21S + 0.03 \dots\dots\dots (8)$$

$$(r = 0.999, n = 24, p < 0.001)$$

飼育水中鋇鈣比的變化，與鈣或鋇離子的變化，明顯不同。其值由 0‰淡水中的  $7.9 \pm 0.4 \times 10^{-3}$ ，上升至 5‰的  $15.1 \pm 0.6 \times 10^{-3}$ ，5-35‰則持平於  $14.0 \pm 0.8 \times 10^{-3}$ ，其間只相差約 2 倍 (Fig. 3c)。

#### 4. 魚體及肌肉中鈣、鋇離子的濃度及鋇鈣比

鈣離子的濃度，在魚體及肌肉中，並沒有鹽度間的差異 ( $p > 0.05$ )。魚體中的鋇濃度，有顯著的鹽度間差異，但是並沒有規則性。肌肉中的鋇濃度，變異很大，因此其值並沒有鹽度間的差異。魚體及肌肉中的鋇鈣比，則皆有顯著的鹽度間差異，但是同樣沒有規則性。

#### 5. 耳石中鈣、鋇離子的濃度及鋇鈣比

由 89 尾存活的稚魚的耳石邊緣，共測得 864 個有效鋇鈣比值。迴歸分析結果發現，耳石鋇鈣比與鹽度呈正向關係，相關係數為 0.28 ( $p < 0.05$ )。然而，若移除 0‰淡水中的鋇鈣比，該迴歸式則無法成立，相關係數為 0.1 ( $p = 0.27$ )。

耳石鋇鈣比與耳石成長率 (G)，在 0‰淡水中，沒有顯著關係；但在 5-35‰海水中，則呈現顯著的負相關，迴歸關係式如下 (Fig. 5)：

$$[\text{Sr}/\text{Ca}]_{\text{otolith}} \times 10^3 = -0.23G + 6.95 \dots\dots\dots (9)$$

( $r = -0.45, n = 83, p < 0.001$ )

#### 6. 飼育水、魚體及耳石中鈣、鋇濃度及鋇鈣比的相關性

相關分析顯示，耳石中的鈣含量，與飼育水中的鈣含量無關 ( $p > 0.05$ )，卻與魚體中的鈣含量有關，兩者間的相關係數為 0.50 ( $p < 0.01$ )。耳石中的鋇含量，與飼育水的鋇含量，呈正相關，兩者間的相關係數為 0.29 ( $p < 0.01$ )。耳石中的鋇鈣比，與飼育水及魚體的鋇鈣比，皆呈正相關，相關係數分別為 0.76 與 0.44 ( $p < 0.01$ )。這表示，飼育水鋇鈣比，為影響耳石鋇鈣比的主要因子。魚體則扮演調控鈣及鋇離子的輸送路徑的角色。

### 討論

#### 1. 鹽度對稚魚存活率的影響

本研究發現，烏魚稚魚適合存活在 5-25‰的鹽度環境中。這符合過去研究所觀察到的，烏魚稚魚的臨界死亡，發生在由鹽度 5-4‰，轉移至 0‰的淡水環境 (Mires et al. 1974)。上述結果也間接驗證，在烏魚的初期生活史中，仔魚由高鹽度的遠岸域，入添至河口域半淡鹹水，成為稚魚的必要性。

#### 2. 耳石鋇鈣比與鹽度關係之魚種間差異

目前已有數個研究證實，耳石鋇鈣比與鹽度之間的正向對應關係，然而其關係因種而異。Secor et al. (1995) 建立條紋鱸 (*Morone saxatilis*) 稚魚的耳石鋇鈣比，與鹽度的線性關係。Tzeng (1996) 則發現，飼養在 4 種鹽度條件下的日本鰻 (*Anguilla japonica*) 鰻線，耳石鋇鈣比可分為 0、10、25‰，及 25、35‰，兩個同質組。烏魚稚魚的耳石鋇鈣比，在淡水 (0‰) 與海水 (5-35‰) 間，有顯著差異，在海水 (5-35‰) 間，則沒有差異 (Fig. 4c)，與 Secor et al. (1998) 研究日本真鱸的結果類似。此外，0‰的烏魚耳石鋇鈣比值  $3.16 \pm 0.36 \times 10^{-3}$ ，低於日本鰻 ( $4.20-5.0 \times 10^{-3}$ ) 及條紋鱸 ( $4.26 \times 10^{-3}$ )；5-35‰的烏魚耳石鋇鈣比值  $6.35 \pm 0.70 \times 10^{-3}$ ，與日本鰻 ( $4.99-9.27 \times 10^{-3}$ ) 相似，卻高於日本真鱸 ( $4.91-5.56 \times 10^{-3}$ )。這表示，耳石鋇鈣比與鹽度的關係，具有魚種的特異性；兩者間的迴歸關係，在不同的魚種間並不通用。

### 3. 耳石鋇鈣比與飼育水鋇鈣比的對應性

本研究水中的鋇鈣比僅能分成二個等級，其一為淡水 (0‰)，其二為海水 (5-35‰) (Fig. 3c)。這表示，海水中的鋇鈣比不會因淡水的稀釋而改變，保持恆定。0‰淡水中的鋇鈣比 ( $7.9 \pm 0.4 \times 10^{-3}$ )，約只有 5-35‰海水鋇鈣比 ( $14.0 \pm 0.8 \times 10^{-3}$ ) 的一半 (Fig. 3c)。此等差異，也直接反應在稚魚耳石的鋇鈣比上 (Fig. 4c)。因此，烏魚耳石的鋇鈣比，重現水中的鋇鈣比。另外也可在其他魚類，如紅鮭 (*Oncorhynchus nerka*)、尼羅口孵魚 (*Oreochromis niloticus*) 及 spot (*Leiostomus xanthurus*) 中發現同樣的情形 (Rieman et al. 1994, Farrell and Campana 1996, Bath et al. 2000)。表示這些魚類，是以鋇鈣等比例的方式，自環境中吸收鈣與鋇，而沉積在耳石上。

### 4. 成長率對耳石鋇鈣比的影響

耳石上鋇與鈣的沉積，可能也會受到某些生物性因子，如遺傳、發育階段、成長率、餌料及生理狀況等的調控 (Kalish 1989, Radtke 1989, Sadovy and Severin 1992, Tzeng 1994, 1996, Hoff and Fuiman 1995, Limburg 1995, Mugiya and Tanaka 1995, Farrell and Campana 1996, Gallahar and Kingsford 1996)。本研究發現，5-35‰稚魚耳石的成長率，與耳石鋇鈣比則呈現顯著的負相關 (Fig. 5)。過去在其他魚種，如 white grunt (*Haemulon plumieri*) 及條紋鱸中，也曾被描述過 (Sadovy and Severin 1992, Secor et al. 1995)。當稚魚的成長加快，耳石形成所需的鈣與鋇應同時增加。然而，因為鋇的含量很少，所以當魚成長較快時，鋇的

相對吸收量，將較鈣少。或許就是這個緣故，導致當魚的成長較快時，耳石鋇鈣比反而較低。

## 5. 以耳石鋇鈣比作為洄游環境的指標

本研究以鹽度控制實驗驗證耳石鋇鈣比與鹽度環境之關係。很明顯地分出烏魚在 0‰淡水及 5-35‰海水間，耳石鋇鈣比的差異 (Fig. 4c)。5-35‰的稚魚耳石鋇鈣比 ( $6.4 \pm 0.7 \times 10^{-3}$ )，與河口稚魚的耳石鋇鈣比 ( $6.2 \pm 1.4 \times 10^{-3}$ )，非常一致。可以確認，烏魚耳石的鋇鈣比，的確反映環境鹽度的變化 (Fig. 6)。

本研究中，飼養在 0‰淡水的稚魚耳石鋇鈣比  $3.2 \pm 0.4 \times 10^{-3}$ ，因此鋇鈣比  $3 \times 10^{-3}$ ，可當成烏魚進入淡水的界限。本研究所設定的上、下限鋇鈣比與其他的研究非常類似：如 Tsukamoto and Arai (2001) 以  $2.5 \times 10^{-3}$  及  $6 \times 10^{-3}$  為界將日本鰻分類；Jessop et al. (2002) 也將美洲鰻分成淡水鰻 ( $< 4 \times 10^{-3}$ ) 及河口鰻 ( $> 5 \times 10^{-3}$ )；Tzeng et al. (2003) 則以耳石鋇鈣比  $4 \times 10^{-3}$  為界，將日本鰻分成淡水 ( $< 4 \times 10^{-3}$ ) 及海水 ( $> 4 \times 10^{-3}$ ) 兩個分散洄游群 (Contingent)。這些結果皆表示，利用耳石鋇鈣比，重建烏魚的洄游環境史是可信的。

## 結論

烏魚耳石的鋇鈣比，反映環境鹽度的變化，可用來重建個體的洄游環境史。烏魚入添到河口域之後的生活史，大致分為不進淡水及進淡水的兩種洄游型態。每一個洄游型態，又可分為本地群及洄游群。洄游型態與年齡及棲息環境有關。烏魚的產卵群中，可檢定出本地群及洄游群，但主要由不進淡水的個體所組成。烏魚的生活史及洄游模式，比過去所認知的降河產卵洄游型，更為多樣化。

## 引用文獻

- Bath GE, Thorrold SR, Jones CM, Campana SE, McLaren JW, Lam JWH (2000) Strontium and barium uptake in aragonitic otoliths of marine fish. *Geochim Cosmochim Acta* 64(10):1705-1714
- Chang CW, Tzeng WN (2000) Species composition and seasonal occurrence of mullets (Pisces, Mugilidae) in the Tanshui estuary northwest Taiwan. *J Fish Soc Taiwan* 27(4):253-262
- Farrell J, Campana SE (1996) Regulation of calcium and strontium deposition on the otoliths of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Comp Biochem Physiol*

115A:103-109

- Gallahar NK, Kingsford MJ (1996) Factors influencing Sr/Ca ratios in otoliths of *Girella elevata*: an experimental investigation. *J Fish Biol* 48:174-186
- Hoff GR, Fuiman LA (1995) Environmentally induced variation in elemental composition of red drum (*Sciaenops ocellatus*) otoliths. *Bull Mar Sci* 56(2):578-591
- Jessop BM, Shiao JC, Iizuka Y, Tzeng WN (2002) Migratory behaviour and habitat use by American eels *Anguilla rostrata* as revealed by otolith microchemistry. *Mar Ecol Prog Ser* 233:217-229
- Kalish JM (1989) Otolith microchemistry: validation of the effects of physiology, age and environment on otolith composition. *J Exp Mar Biol Ecol* 132:151-178
- Limburg KE (1995) Otolith strontium traces environmental history of subyearling American shad *Alosa sapidissima*. *Mar Ecol Prog Ser* 119:25-35
- Mires D, Shak Y, Shilo S (1974) Further observations on the effect of salinity and temperature changes on *Mugil capito* and *M. cephalus* fry. *Bamidgeh* 26(4):104-109
- Mugiya Y, Tanaka S (1995) Incorporation of water-borne strontium into otoliths and its turnover in the goldfish *Carassius auratus*: effects of strontium concentrations, temperature, and 17 $\beta$ -estradiol. *Fish Sci* 61(1):29-35
- Rieman BE, Myers DL, Nielsen RL (1994) Use of otolith microchemistry to discriminate *Oncorhynchus nerka* of resident and anadromous origin. *Can J Fish Aquat Sci* 51:68-77
- Sadovy Y, Severin KP (1992) Trace elements in biogenic aragonite: Correlation of body growth and strontium levels in the otoliths of the white grunt, *Haemulon plumieri* (Pisces. Haemulidae). *Bull Mar Sci* 50:237-257
- Secor DH, Henderson-Arzapalo A, Piccoli PM (1995) Can otolith microchemistry chart patterns of migration and habitat utilization in anadromous fishes? *J Exp Mar Biol Ecol* 192:15-33
- Secor DH, Ota T, Tanaka M (1998) Use of otolith microanalysis to determine estuarine migrations of Ariake Sea Japanese sea bass *Lateolabrax japonicus*. *Fish Sci* 64:740-743
- Tsukamoto K, Arai T (2001) Facultative catadromy of the eel *Anguilla japonica* between freshwater and seawater habitats. *Mar Ecol Prog Ser* 220:265-276



- Tzeng WN (1994) Temperature effects on the incorporation of strontium in otolith of Japanese eel *Anguilla japonica*. J Fish Biol 45:1055-1066
- Tzeng WN (1996) Effects of salinity and ontogenetic movements on strontium:calcium ratios in the otoliths of the Japanese eel, *Anguilla japonica* Temminck and Schlegel. J Exp Mar Biol Ecol 199:111-122
- Tzeng WN, Iizuka Y, Shiao JC, Yamada Y, Oka HP (2003) Identification and growth rates comparison of divergent migratory contingents of Japanese eel (*Anguilla japonica*). Aquaculture 216:77-86

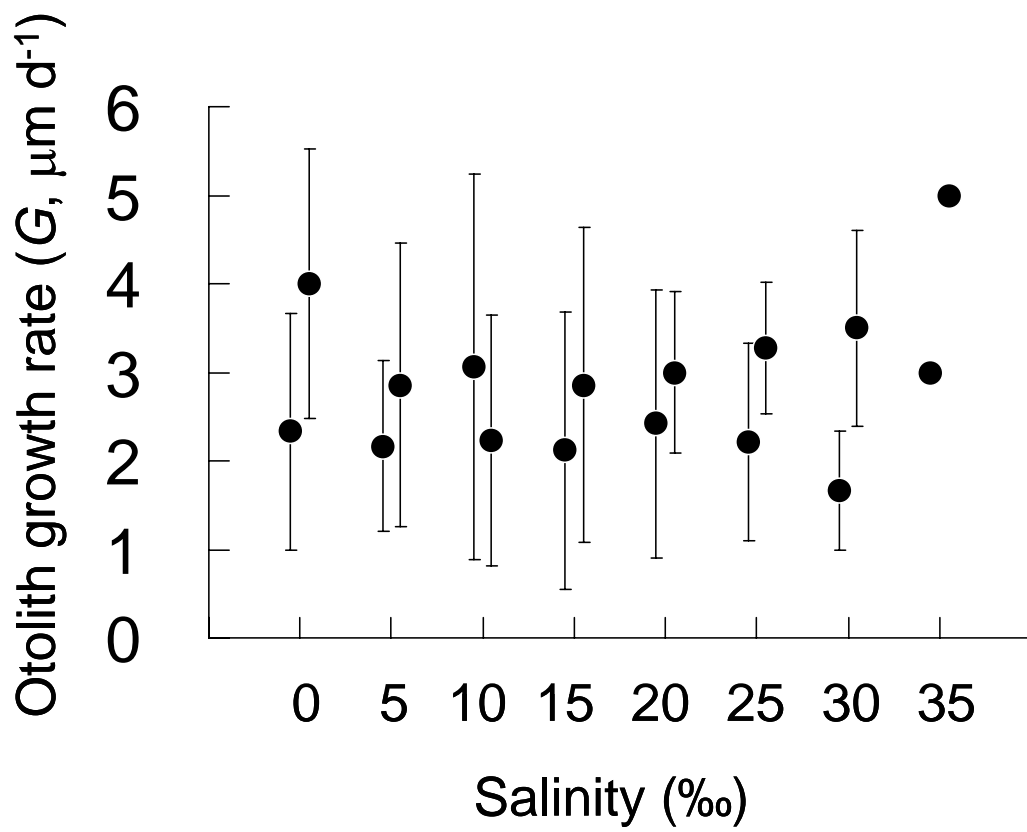


Fig. 1. Comparison of mean otolith growth rates of juvenile grey mullets among 8 different salinities with 2 replicates.

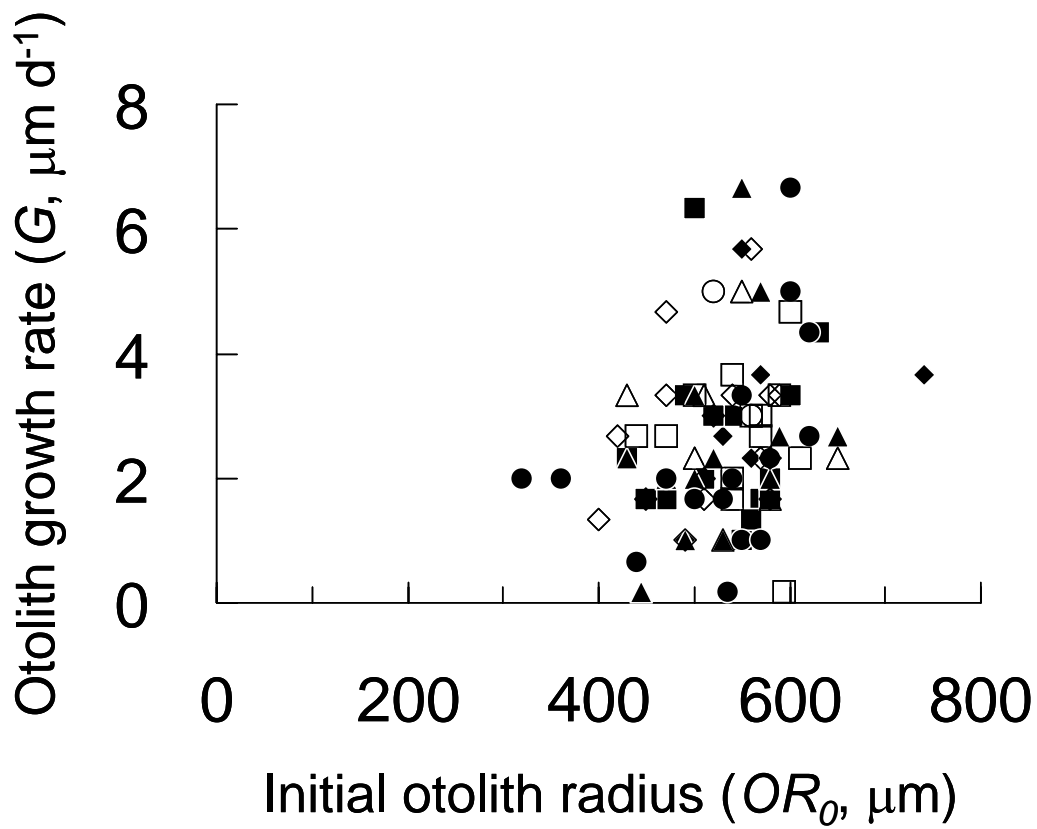


Fig. 2. The relationship between initial otolith radius ( $OR_0$ ) and growth rate ( $G$ ) of new increments of the otoliths of juvenile grey mullet reared in salinities of 0‰ (○), 5‰ (□), 10‰ (△), 15‰ (◇), 20‰ (○), 25‰ (■), 30‰ (▲) and 35‰ (●).  $OR_0$  and  $G$  were defined in the text.

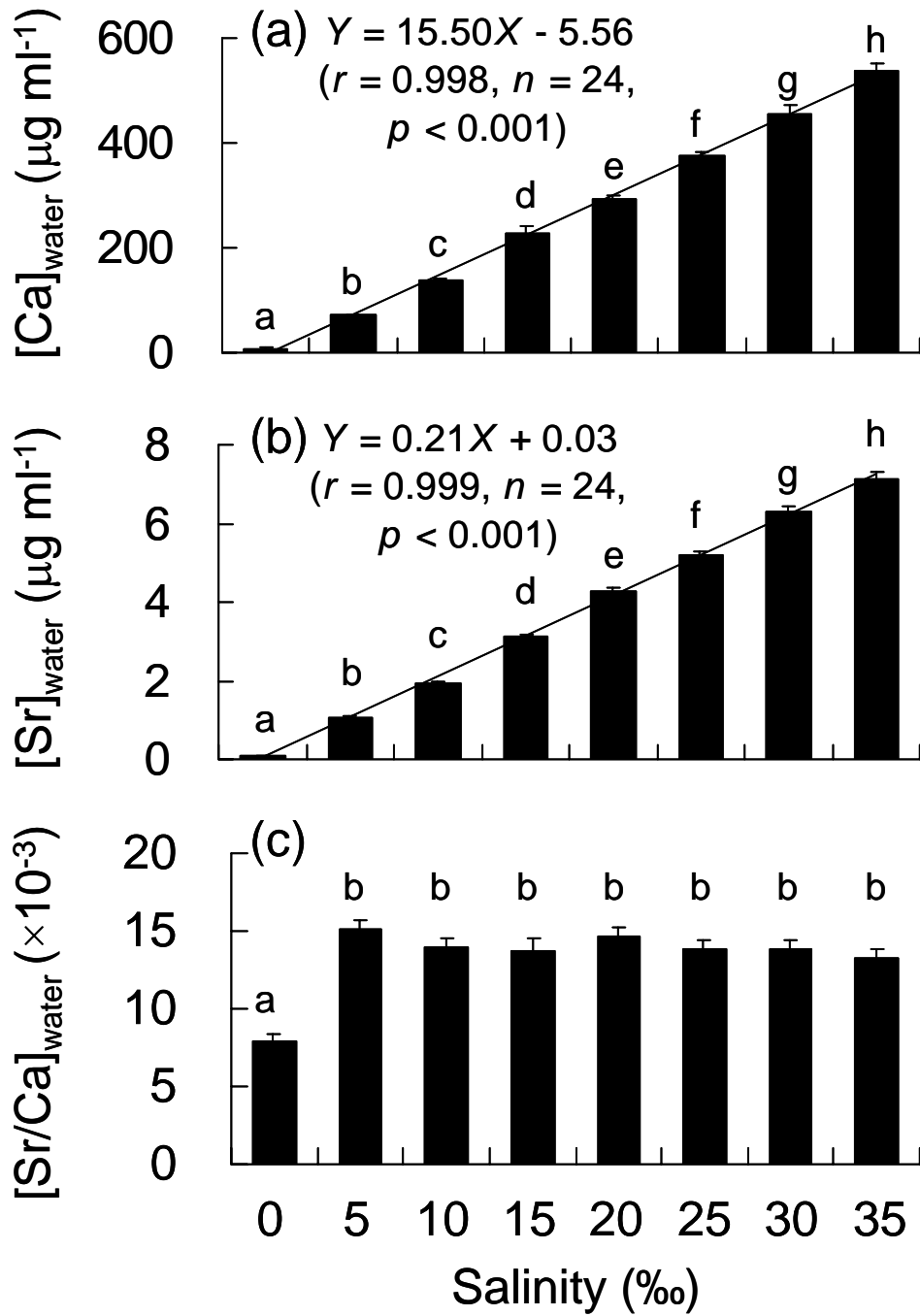


Fig. 3. Comparison of mean Ca contents (a), Sr contents (b) and Sr:Ca ratios (c) among rearing water of salinities from 0-35‰. Similar characters indicate homogenous groups; Vertical line, SD.

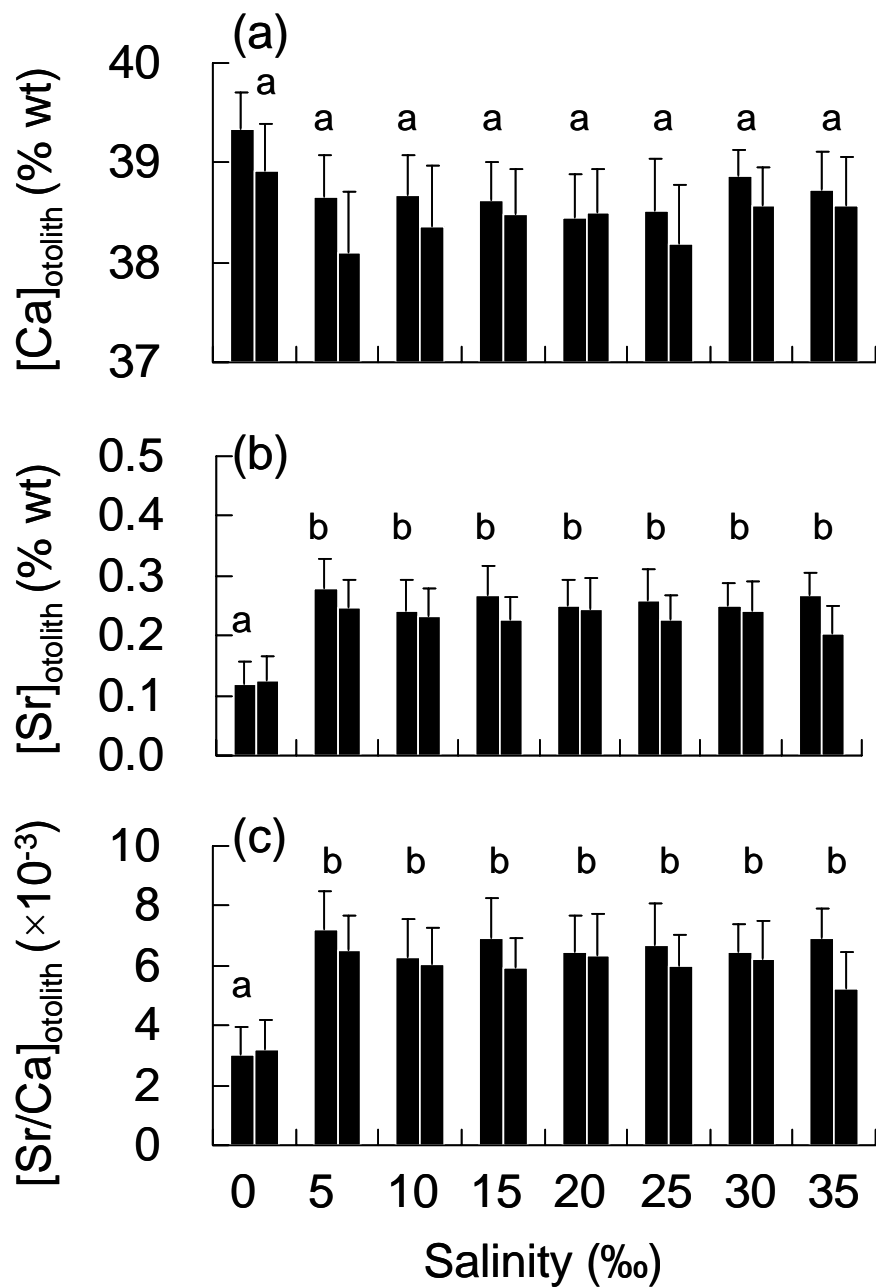


Fig. 4. Comparison of mean Ca contents (a), Sr contents (b) and Sr:Ca ratios (c) in the otoliths of juvenile grey mullets reared in salinities from 0-35‰. Similar characters indicate homogenous groups; Vertical line, SD.

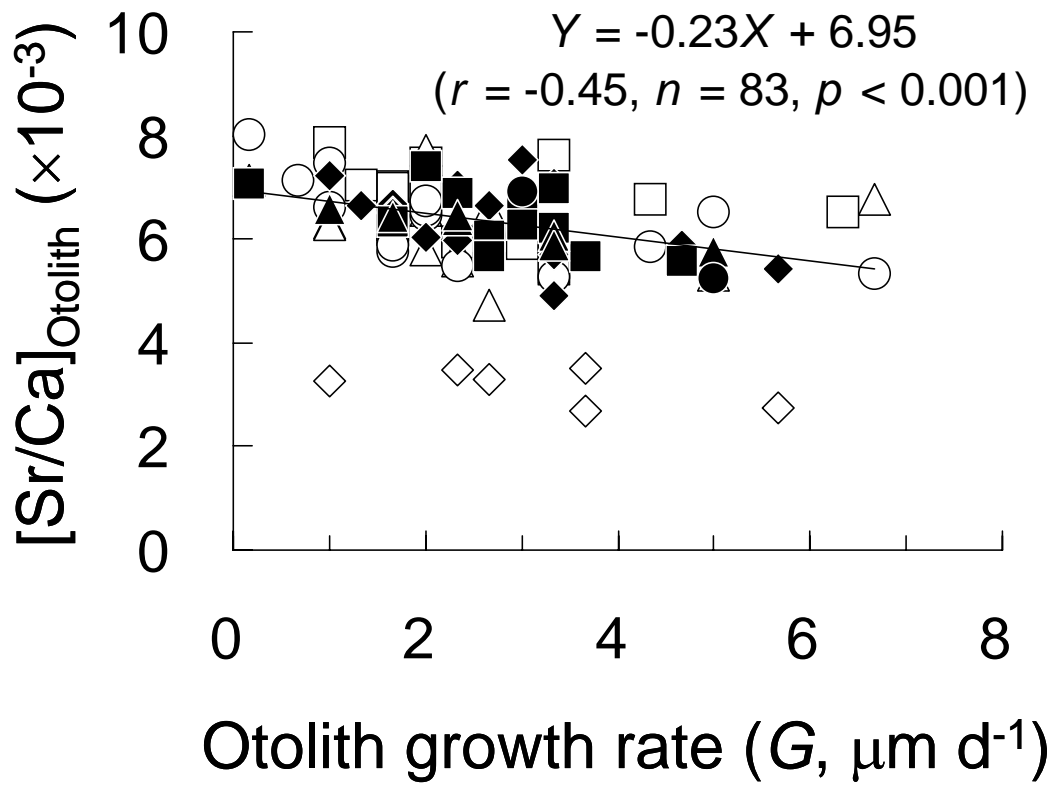


Fig. 5. The relationship between growth rate and Sr:Ca ratios of the otoliths of juvenile grey mullets reared in salinities of 0‰ (○), 5‰ (□), 10‰ (△), 15‰ (◇), 20‰ (○), 25‰ (■), 30‰ (▲) and 35‰ (●). The data of 0‰ was excluded in the calculation of regression of Sr:Ca ratios on salinity.

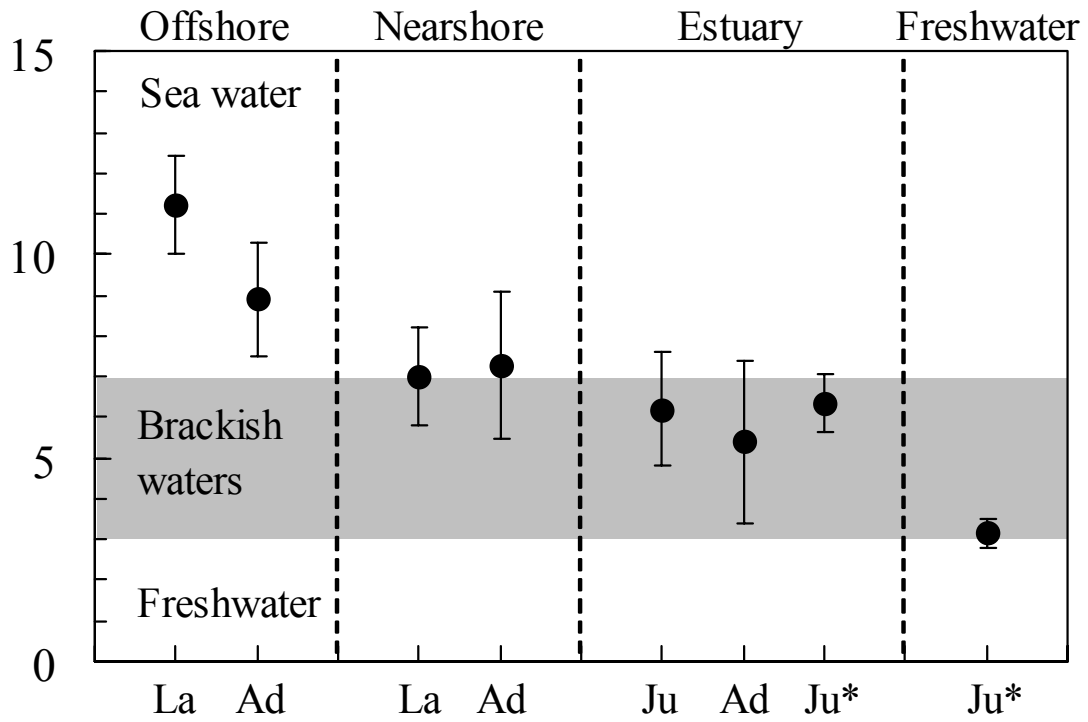


Fig. 6. Mean Sr:Ca ratios in the core area (offshore La) and at edges (all others) of otoliths of the grey mullets collected in the offshore, nearshore, estuary and freshwater. The shadow area between Sr:Ca ratios  $3-7 \times 10^{-3}$  indicates that mullets migrated in the brackish waters. La, larvae; Ju, juvenile, Ju\*, juvenile for salinity experiment; Ad, adult; Vertical line, SD.