

耳石微量元素分析による広島県太田川 サツキマスの回遊履歴の推定

海野 徹也,^{1*} 清家 暁,¹ 大竹 二雄,²
西山 文隆,³ 柴田 恭宏,⁴ 中川 平介¹

(2000 年 3 月 10 日受付, 2000 年 12 月 20 日受理)

¹広島大学生物生産学部, ²三重大学生物資源学部, ³広島大学工学部, ⁴広島大学理学部

Application of Otolith Microchemistry to Reconstruct for Migration History
of Amago Salmon *Oncorhynchus masou ishikawai*, Captured at the Ohta River

Tetsuya Umino,^{1*} Satoru Seike,¹ Tsuguo Otake,²
Fumitaka Nishiyama,³ Yasuhiro Sibata,⁴ Heisuke Nakagawa¹

¹Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, Hiroshima 739-8528, ²Faculty of Bioresources,
Mie University, Mie 514-8507, ³Faculty of Engineering, Hiroshima University, Hiroshima 739-8527, ⁴Faculty
of Science, Hiroshima University, Hiroshima 739-8526, Japan

To reconstruct migratory history of amago salmon *Oncorhynchus masou ishikawai*, captured in the Ohta River, the otolith Sr/Ca concentration ratios as life history transect in accordance with the migration pattern between sea and freshwater were analyzed by wave-length dispersive X-ray electron microprobe. Based on otolith Sr/Ca concentration ratios, 26 out of 27 individuals were categorized as belonging to an anadromous population. Of these anadromous individuals, two fish migrated between estuarine water and freshwater. Tracing the migratory history, a typical anadromous population migrated into the estuary in mid-January, then into the coastal water in mid-February and, subsequently, returned to the river in mid-June.

キーワード：サツキマス, アマゴ, 降海型, 耳石, 微量元素, 回遊履歴

アマゴは静岡県駿河湾以西, 本州および中国地方の分水嶺以南, 四国全域および九州の瀬戸内海側に面した河川に分布する¹⁻³⁾淡水有用魚種である。生態学的には一生を河川で過ごす陸封型と秋から晩秋にかけて降海する降海型, いわゆるサツキマスに大別される。サツキマスの分布域はアマゴ分布域とほぼ一致する。⁴⁾ 降海した個体は沿岸域でイカナゴ, シラウオ, カタクチイワシなどの小魚や甲殻類などを摂餌し大きく成長する。⁵⁻⁷⁾ 翌年の春, 産卵のため母川へ遡上した遡河サツキマスは美味で商品価値も高い。さらにサツキマスの性比は雌に偏り⁶⁾産卵期には陸封型の数倍の抱卵数を有する。⁵⁾ また, 強い母川回帰性を示す^{7,8)}ことから, 河川の資源増大を目的とした放流事業も盛んである。このような結果を反映してか, 現在では加藤⁴⁾が示したサツキマス分布域以外でもサツキマスが確認されている。^{9,10)} しかし,

その一方で, 放流河川によっては母川への回帰性が低いことが指摘されており,^{7,8,11)} 今後の問題点になっている。

農林省水産統計局によれば, 中国地方最大級の河川である広島県太田川における昭和初期のマス類の漁獲高は最大で年間 17 トンに達していたが, 現在の漁獲高は年間 4 トン程度まで激減している。このような背景のもと, 近年, 太田川ではサツキマスの資源回復を目的とした放流事業が実施されている。しかし, 広島湾でのサツキマスの有標識率が 50% 以上を示す場合がある一方で, 遡河サツキマスの有標識率が 20% まで低下するなどの問題も提起されている。¹²⁾ したがって, 太田川におけるサツキマス放流効果を向上させるためには, 瀬戸内海沿岸に降海するサツキマスの回遊履歴を把握することが必要である。

近年, 耳石のカルシウムに対するストロンチウム濃度

* Tel : +81-824-24-7944, Fax : +81-824-22-7059, E-mail : umino@hiroshima-u.ac.jp

比の挙動から, 通し回遊魚の回遊履歴を推定する技術が急速に発展しつつある。¹³⁻²¹⁾ これらの技術は, サツキマスの近縁種であるサクラマスにおいても応用可能であることが示唆されている。²²⁾ そこで本研究は広島県太田川で捕獲されたサツキマスの回遊履歴を解明するため, まず, 海面養殖されたサツキマス, 淡水養殖および釣獲陸封アマゴの耳石微量元素を電子線マイクロアナライザーで分析した。さらに, それらの分析結果をふまえ, 実際に太田川で捕獲された放流魚を含むサツキマス 27 個体の降海性の判定, 降海時期や遡河時期の解明を試みた。また, 比較のため山口県錦川で捕獲されたサツキマス 7 個体についても同様の調査を行った。

試料および方法

試料

1. 淡水養殖アマゴ, 海面養殖サツキマスおよび陸封アマゴ Table 1 に耳石微量元素分析に供したアマゴおよびサツキマスの由来, 個体番号, 捕獲日, 全長, 性別を示す。

分析に供した淡水養殖アマゴ 6 個体 (FC#1-6) は, 広島県佐伯郡の民間養殖施設 (Fig. 1 中の FC) で 1996 年 12 月中旬に孵化, その後, 1998 年の 5 月 8 日まで同施設で淡水飼育された未成熟な 1 才魚である。

海面養殖サツキマス (個体番号 SC#1-7) の由来は, 高知県の民間養殖施設で 1996 年 12 月に孵化・飼育したアマゴを広島県内の民間養殖業者が 1997 年 10 月に購入し, 淡水飼育後, 銀毛魚を海面養殖したものである。海面養殖は 1997 年 12 月 1 日から 12 月 10 日までの 10 日間, 広島県水産試験場で海水馴致を行った後, 翌年の春まで同試験場地先 (Fig. 1 中の SC) の網生け簀で海面飼育を行った。このうち個体番号 SC#1 および SC#2 は 1998 年の 4 月 21 日に, 個体番号 SC#3-7 は 5 月 8 日に取り上げた。5 月 8 日に取り上げた 5 個体を調査したところ, 4 個体が雌で 1 個体が未成熟であった。なお, 広島県水産試験場による同地先の水質調査によれば, 海面養殖期間中の塩分は 32.1~32.6 ppt の範囲で大きな変動は観測されていない。

陸封型アマゴ 4 個体 (FR#1-4) は, 1998 年 4 月 13 日に太田川上流域の支流の一つである横川 (Fig. 1 中の FR) で釣獲したものである。釣獲地点より下流にはダムが存在することから, 釣獲アマゴが陸封されていたことは間違いない。同河川は人工生産アマゴの放流が盛んに実施されているため, これらの個体は放流魚の可能性もある。

2. 太田川および錦川のサツキマス 太田川は県西部を貫流し河口三角州上に広島市を有する, 流域面積 1,700 km² の一級河川である。山口県錦川は県東部を貫流する流域面積 900 km², の山口県最大の一級河川である。

Table 1. Fish ID, sampling date, and biometric parameters of amago salmon used for otolith microchemistry

Fish ID#	Sampling data	Total Length (mm)	Sex	GSI(%)
1 + Freshwater-cultured				
FC#1	May 8, 1998	239	IM ²⁾	—
FC#2	"	207	IM	—
FC#3	"	180	IM	—
FC#4	"	199	IM	—
FC#5	"	171	IM	—
FC#6	"	205	IM	—
		200 ± 23.8 (Mean ± SD)		
1 + Sea-cultured for 5 months				
SC#1	Apr. 21, 1998	285	N.O. ³⁾	—
SC#2	"	320	N.D.	—
SC#3	May 8, 1998	293	♀	—
SC#4	"	290	♀	—
SC#5	"	311	♀	—
SC#6	"	337	IM	—
SC#7	"	300	♀	—
		305 ± 18.6 (Mean ± SD)		
1 + Freshwater residents at the Ohta River				
FR#1	Apr. 13, 1998	153	IM	—
FR#2	"	160	IM	—
FR#3	"	155	IM	—
FR#4	"	153	IM	—
		155 ± 3.30 (Mean ± SD)		
Upstream migrants at the Ohta River				
O#1	Jun. 17, 1998	310	♀	0.3
O#2	"	340	♀	1.0
O#3	Jun. 10 or 17, 1998	332	♀	3.7
O#4* ¹⁾	"	353	♀	7.6
O#5*	"	340	♀	5.0
O#6	"	380	♂	0.4
O#7*	"	342	♀	3.7
O#8	"	311	♀	4.1
O#9	"	305	♀	4.1
O#10	"	297	♂	0.5
O#11	"	289	♀	2.6
O#12	"	324	♀	1.8
O#13	"	386	♂	0.6
O#14	"	287	♀	1.7
O#15	"	312	♀	3.5
O#16	"	298	♂	0.6
O#17	"	287	♀	4.5
O#18	"	312	♀	6.0
O#19	"	264	♀	0.2
O#20*	"	309	♂	0.4
O#21*	"	302	♀	4.2

Table 1. (continued)

Fish ID#	Sampling data	Total Length (mm)	Sex	GSI(%)
Upstream migrants at the Ohta River				
O#22	"	291	♀	4.8
O#23	"	319	♀	2.5
O#24	"	284	♀	1.9
O#25*	Jul. 7, 1998	343	♀	1.6
O#26	Jul. 10, 1998	287	♀	0.4
O#27	Jul. 17, 1998	391	♀	2.9
		318±32.5 (Mean±SD)	5:22 (♂:♀)	2.6±3.0 (Mean±SD)
Upstream migrants at the Nishiki River				
N#1	May 10, 1995	299	N.O.	—
N#2	May 20, 1995	332	N.O.	—
N#3	May 24, 1995	290	N.O.	—
N#4	"	292	N.O.	—
N#5	"	294	N.O.	—
N#6	"	305	N.O.	—
N#7	"	311	N.O.	—
		306±16.0 (Mean±SD)		

1) Mark-released.

2) Immature.

3) Not observed.

両河川の河口間（広島市と岩国市間）の直線距離は約 30 km である（Fig. 1）。

広島県太田川のサツキマスは、1998 年度の建設省太田川工事事務所による捕獲調査で捕獲したもので、捕獲地点は河口より約 13.5 km 上流にある高瀬堰（Fig. 1）である。高瀬堰は長さ 273 m の可動堰で左右岸に幅 6 m の階段式・起伏式ゲートの魚道を備えている。捕獲は左右岸側魚道最上流部に捕獲カゴ（網口 30×50 cm, 目合い 25 mm）を 1 日間仕掛けることによって行った。捕獲調査は、1998 年の 6 月 10 日、6 月 17 日、7 月 3 日、7 月 7 日、7 月 9 日、7 月 15 日に実施した。捕獲状況は 6 月 10 日が 22 尾、6 月 17 日が 5 尾、7 月 3 日が 0 尾、7 月 7 日、7 月 9 日および 7 月 15 日が各々 1 尾の合計 30 尾で、このうち 27 個体を耳石微量元素分析に供した。Table 1 に分析に供したサツキマスの個体番号、全長、性別、生殖腺指数（以下 GSI）を示した。6 月 10 日に捕獲した O#1、6 月 17 日の O#2、7 月 7 日の O#25、7 月 9 日の O#26 および 7 月 15 日の O#27 は捕獲直後に凍結して分析に供した。その他の 22 個体（O#3～24）は 6 月 10 日および 6 月 17 日に捕獲されたもので、7 月 22 日まで太田川漁協の陸上水槽で蓄養後、研究室に持ち帰り分析したものである。捕獲魚の全

長範囲は 264～391 mm で（平均 318 mm）で、鱗相による年齢査定²³⁾を行ったところ、全ての個体が 1+ であった。捕獲したサツキマスの雌雄比は 22:5 で、性比が雌に偏る傾向は加藤⁶⁾の報告と一致する。雄 5 尾のうち、比較的小型の魚体番号 O#10 は、いわゆる鼻曲がり個体ではなかったことから、外見から雌雄を判定するには注意が必要であろう。生殖腺指数の平均値は、2.6 であった。さらに、供試魚の中には脂鱗もしくは腹鱗を切除された個体が 8 尾（O#4, 5, 7, 14, 15, 20, 21 および 25）含まれたが、これらの個体は 1997 年度に太田川漁協により安佐大橋付近に放流された放流魚約 1000 尾もしくは温井ダム工事建設所により太田川と丁川の合流付近に放流された放流魚約 2000 尾の一部である。これらの標識放流魚は、先に述べた淡水養殖アマゴと同様、広島県佐伯郡の民間養殖施設で飼育されたものである。

一方、山口県錦川のサツキマスは 1995 年に勸島県環境保健協会が捕獲調査で捕獲した 7 尾で、分析まで凍結保存した。錦川は岩国市内の下流域（河口より 3 km）で門前川と今津川に分岐するが、個体番号 N#1 および 2 は 1995 年 5 月 10 日および 5 月 20 日に門前川の牛野谷堰直下で刺し網により捕獲したもので、個体番号 N#3-7 は、1996 年 5 月 24 日に今津川の八幡頭首工直下で刺し網により捕獲した。平均全長は 306 mm で、分析に供した全ての個体が銀毛魚であったが、性別については不明である。

電子線マイクロアナライザー分析 魚体から摘出した耳石（扁平石）はアルコール中で付着物を完全に除去し、100% エタノールに浸漬して、超音波洗浄後、真空デシケーター中で真空乾燥した。耳石の凸面が上になるように樹脂（Struers, Epofix）に包埋後、包埋試料を市販のエポキシ系接着材によりスライドガラスに貼り付けた。耳石の核が露出するまで凸面からカーボランダム（#600～3000）で研磨し、1 および 0.25 μm のダイヤモンドペーストで研磨面を鏡面仕上げした。さらに表面にカーボン蒸着を施し波長分散型電子線マイクロアナライザー（JCMA-733 II, 日本電子, 広島大学機器分析センター, 以下 EPMA 分析）の試料とした。全ての耳石について耳石中心から縁辺に至る線上で線分析を行い、発育に伴う耳石のカルシウムとストロンチウムの濃度変化を調べた。また、一部の個体については、耳石研磨面全体の両元素の濃度分布をみるために面分析を行った。線分析は、一ポイント当たりの分析時間を 10 秒、ビーム径 5 μm, 加速電圧および照射電流値はそれぞれ 15 Kv および 10 nA とし、測定間隔は 5 μm とした。カルシウムとストロンチウムの X 線強度の濃度変換（重量%）は、それぞれ CaSiO₃ および SrTiO₃ を標準試料に用い、²⁴⁾カルシウムに対するストロンチウムの濃度比を 10³ 倍し表記したものを Sr/Ca 比とした。また、面分析

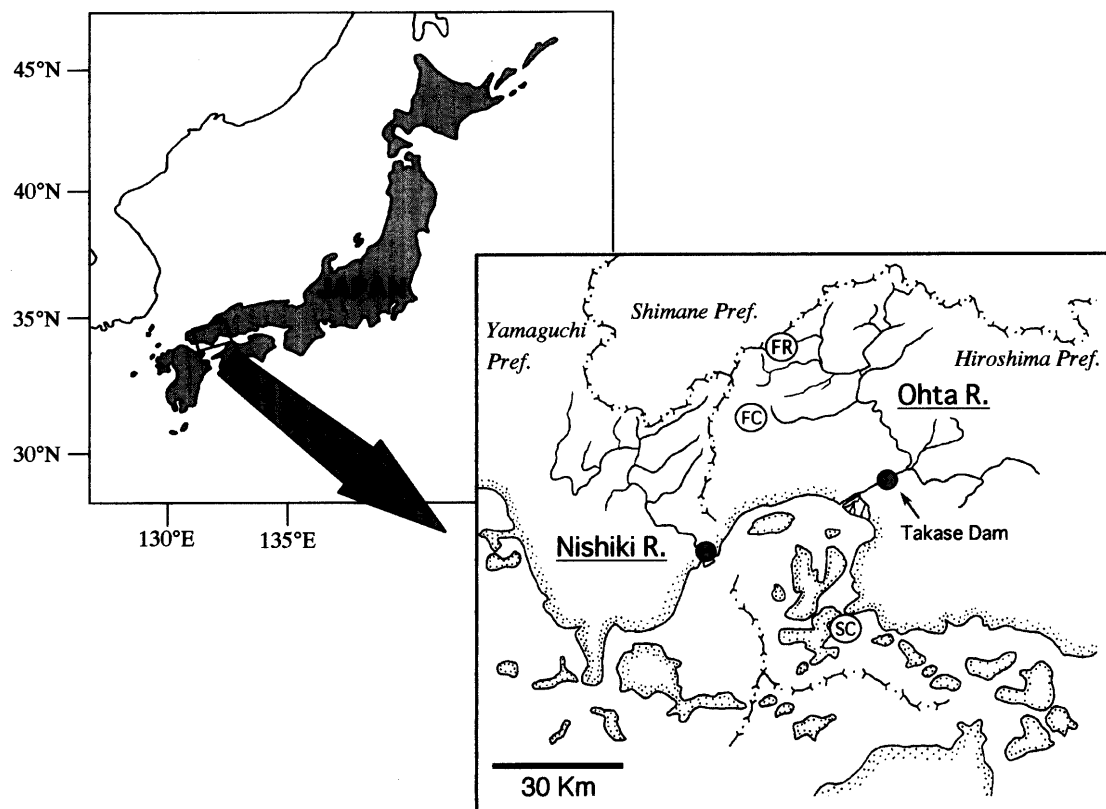


Fig. 1. Map showing sampling locations of sea-culture (SC), freshwater-culture (FC), freshwater residents (FR) and upstream migrants (dot-circle) of amago salmon at the Ohta River and the Nishiki River.

は加速電圧 15 Kv, 照射電流値 50 nA, 測定時間 0.1 秒, 画素の大きさは 10 ないし 20 μm で行った。

結 果

淡水飼育アマゴのチャートパターン 広島県下の民間施設 (Fig. 1) で養殖された淡水養殖アマゴ 1 年魚, 個体番号 FC#1 の Sr/Ca 比の推移を Fig. 2A に示す。淡水養殖アマゴでは耳石径 300 μm 付近で Sr/Ca 比が一時的に上昇し, その比が 4 以上に達したが, それ以外に Sr/Ca 比に大きな変化は認められず, 耳石径 500 μm から縁辺部付近におけるほぼ 2 前後を推移した。本研究で調査した淡水養殖アマゴ 6 個体全てが Fig. 2A に示したチャートパターンと同様, 耳石径 100~500 μm で一時的な Sr/Ca 比の上昇が認められたが, それ以降では比に大きな変化は認められなかった。なお, 調査した淡水飼育アマゴ 6 個体の耳石径 500 μm から縁辺部における Sr/Ca 比の平均値は平均で 1.9 であった (Table 2)。

海面養殖サツキマスのチャートパターン 海面養殖したサツキマス, 個体番号 SC#1 および SC#5 の耳石中心から縁辺部にかけての Sr/Ca 比の推移をそれぞれ Fig. 2B および Fig. 2C に示す。耳石径 500 μm 以降の Sr/Ca 比に注目すれば, 個体番号 SC#1 は 750 μm 付近ま

で, 個体番号 SC#5 では 900 μm 付近まで, 共に比が 1.5 前後を推移した後, 急激な上昇が認められた。個体番号 SC#1 および SC#5 において, チャートパターンから推定した海面養殖期間に相当する耳石幅を図中にアンダーラインで示したが (Fig. 2B および 2C), その間の平均 Sr/Ca 比は両個体とも 3.9 であった (Table 2)。また, Fig. 2B や Fig. 2C に示すように, 個体番号 SC#1 および SC#5 では 100~400 μm にかけて, 一時的な Sr/Ca 比の上昇が認められた。ただし線分析の方向により Sr/Ca 比が異なる可能性もある²⁵⁾ので, 個体番号 SC#5 の耳石について面分析を行ったところ, 耳石中心付近と縁辺部で Sr 濃度が上昇していることを確認した (Fig. 3A)。このように発育初期に Sr/Ca 比が一時的に上昇する現象は, 淡水養殖アマゴと類似しており, 分析に供した海面養殖サツキマス全個体で認められた (Table 2)。

陸封型アマゴのチャートパターン Fig. 2D に太田川上流の横川 (Fig. 1) で釣獲された, 陸封型アマゴ 1 年魚 (個体番号 FR#1) のチャートパターンを示す。耳石中心から 150 μm にかけて Sr/Ca 比の平均値は 1.4 であったが, 200~500 μm にかけて比が一時的に 3~4 前後まで上昇する現象が認められた。その後, Sr/Ca 比は

Table 2. Outline of chart patterns of Sr/Ca ratio of freshwater-cultured fish, sea-cultured fish, freshwater residents, and upstream migrants

Fish I.D.#	Sr/Ca ratio in the early life ¹⁾		Average level of Sr/Ca ratio during sea- or freshwater-life	Habitat ²⁾	Marine- or estuarine-life span (%) ³⁾
	100–500 μm	600–1,000 μm	< 1,000 μm		
1 *Freshwater-cultured					
FC#1 (Fig. 2A)	—	—	2.2	Freshwater	0
FC#2	+	—	1.8	"	0
FC#3	+	—	1.8	"	0
FC#4	+	—	1.7	"	0
FC#5	+	—	2.0	"	0
FC#6	+	—	1.7	"	0
			1.9 ± 0.2		
1 *Sea-cultured for 5 months					
SC#1 (Fig. 2B)	+	—	3.9	Marine	24.6
SC#2	+	—	3.2	"	21.9
SC#3	+	—	4.1	"	23.8
SC#4	+	—	4.5	"	14.3
SC#5 (Fig. 2C)	+	—	3.9	"	31.8
SC#6	+	—	3.7	"	19.1
SC#7	+	—	4.0	"	12.7
			3.9 ± 0.4 (Mean ± SD)		21.2 ± 6.5 (Mean ± SD)
1 *Freshwater residents captured in upper stream at the Ohta River					
FR#1 (Fig. 2D)	+	+	1.9	Freshwater	0
FR#2	+	+	2.0	"	0
FR#3	+	+	1.8	"	0
FR#4	+	+	1.8	"	0
			1.9 ± 0.1 (Mean ± SD)		
Upstream migrants at the Ohta River					
O#1	+	—	4.3	Marine	18.9
O#2 (Fig. 2E)	—	—	2.6	Estuarine	20.8
O#3 (Fig. 2F)	—	—	4.1	Marine	24.4
O#4* ⁴⁾ (Fig. 2G)	+	—	3.2	"	21.5
O#5*	+	—	3.7	"	19.4
O#6*	—	—	3.4	"	31.8
O#7* (Fig. 2H)	+	+	3.2	"	19.0
O#8 (Fig. 2I)	+	+	3.4	"	13.5
O#9	+	+	3.6	"	17.9
O#10	+	—	4.9	"	14.4
O#11	+	—	3.1	"	18.4
O#12	+	+	3.1	"	20.4
O#13	—	—	3.7	"	16.8
O#14* (Fig. 2J)	+	—	3.5	"	13.4
O#15*	+	—	3.6	"	12.5
O#16	+	—	3.6	"	17.8
O#17	+	—	3.7	"	17.4
O#18	+	—	3.5	"	19.2
O#19 (Fig. 2K)	+	—	0.9	Freshwater	—
O#20*	+	—	2.6	Estuarine	20.3
O#21*	+	—	4.2	Marine	16.8
O#22	+	—	4.4	"	20.0
O#23	+	—	4.3	"	15.4
O#24	+	—	3.6	"	21.5
O#25*	+	—	4.2	"	34.3
O#26 (Fig. 2L)	+	—	4.6	"	20.0
O#27	+	+	4.3	"	27.3
			3.7 ± 0.6 (Mean ± SD)		19.7 ± 5.1 (Mean ± SD)
Upstream migrants at the Nishiki River					
N#1	—	—	3.4	Marine	12.2
N#2 (Fig. 2M)	+	—	3.2	"	29.1
N#3	—	—	3.0	"	19.3
N#4	—	—	3.1	"	24.8
N#5 (Fig. 2N)	—	—	3.2	"	16.7
N#6	—	—	3.2	"	19.6
N#7	—	—	3.7	"	13.6
			3.3 ± 0.2 (Mean ± SD)		19.3 ± 6.0 (Mean ± SD)

1) "+" denotes increasing Sr/Ca ratio, "—" denotes no significant increasing 100–500 μm and 600–900 μm on the otolith.

2) Habitats were suggested based on the Sr/Ca ratio of freshwater- and sea-cultured fish.

3) Marine- or estuarine-life span (%) = (width of Sr/Ca ratio in sea-culture or anadromy) / (scan width of EPMA analysis) $\times$ 100.

4) Mark-released.

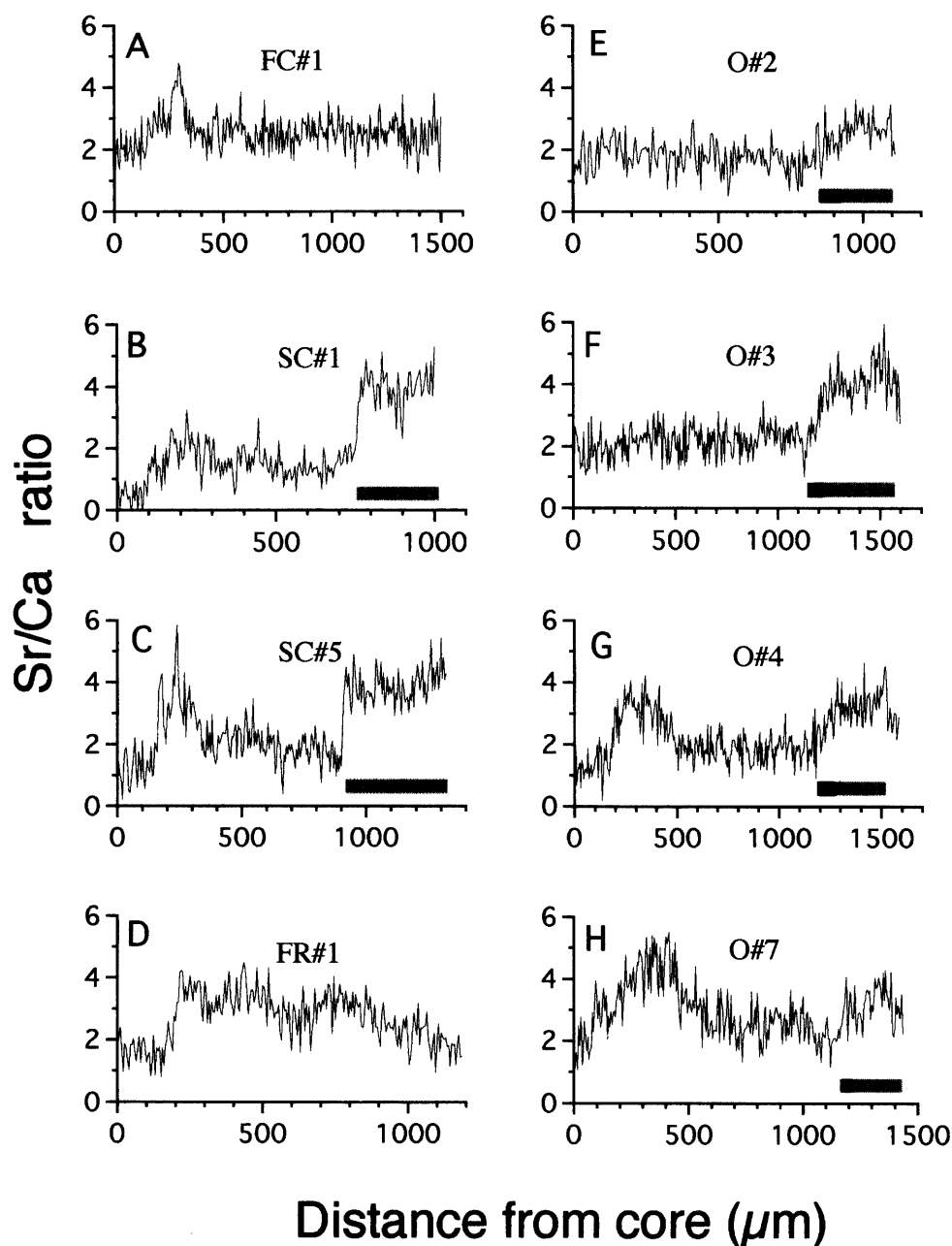


Fig. 2.

600 μm 付近で減少するが、耳石径 700~900 μm にかけて再び比が 3 以上に達した (Fig. 2D)。本研究で調査した陸封アマゴ4個体全てが Fig. 2D に示したようなチャートパターンと同じく、耳石径 100~600 μm と 700~900 μm 付近で Sr/Ca 比が 3 以上に達していた。ただし、いずれの個体も、耳石縁辺付近における Sr/Ca 比は淡水養殖アマゴと同様、平均 1.9 であった (Table 2)。

太田川サツキマスのチャートパターン 広島県太田川高瀬堰で捕獲したサツキマスの典型的な Sr/Ca 比のチ

ャートパターンを Fig. 2E-L に示す。個体番号 O#2 の Sr/Ca 比のチャート (Fig. 2E) は、耳石中心から約 800 μm まで大きな変化を示さず、平均値で 1.8 を推移したが、その後、徐々に上昇し、950 μm から縁辺部にかけて平均 2.6 を示した。また、個体番号 O#3 (Fig. 2F) も O#2 と同様のチャートパターンで、1100 μm 付近まで Sr/Ca 比の変動は認められなかったが、その後、降海によって生じたと思われる Sr/Ca 比の上昇が認められ、1200 μm から縁辺部にかけて平均 4.1 を示した。Fig. 2E や Fig. 2F に示すようなチャートパターン

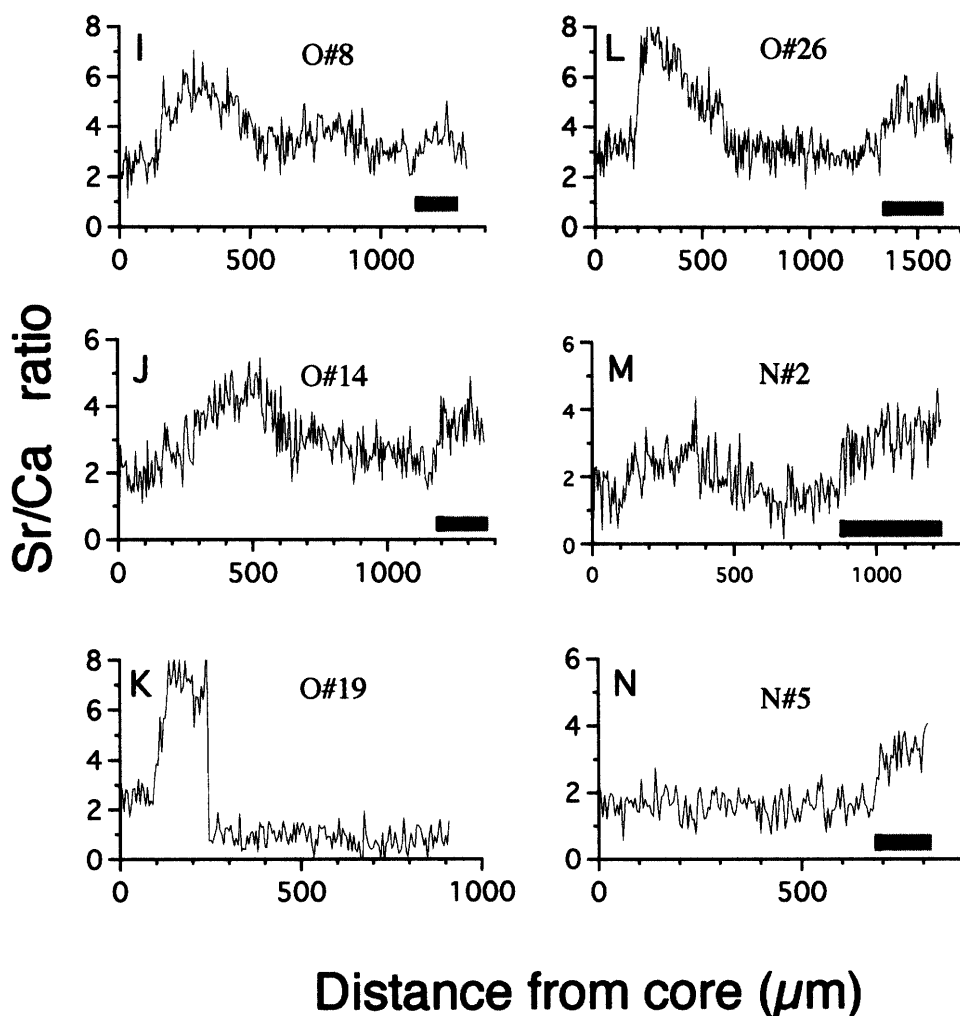


Fig. 2. Sr/Ca concentration ratio measured with electron microprobe from core to edge along transverse section of sagittal otolith of amago salmon. The ratios were multiplied by 10^3 for presentation. Typical life-history transects of sea-culture, freshwater-culture, freshwater residents and upstream migrants at the Ohta River and the Nishiki River are presented in the Fig. A-B, Fig. C, Fig. D, Fig. E-L, Fig. M-N with fish ID, respectively. Black and Stippled horizontal bar on the figures corresponded to estuarine- or sea-life span of amago salmon, respectively.

は個体番号 O#2 や O#3 以外に O#6 および O#13 でもみられた (Table 2)。

錦川サツキマスのチャートパターン 山口県錦川で捕獲されたサツキマス、個体番号 N#2 チャートを Fig. 2M に、個体番号 N#5 のチャートを Fig. 2N に示す。個体番号 N#2 のチャートパターン (Fig. 2M) は、耳石径 $300\ \mu\text{m}$ 前後および $900\ \mu\text{m}$ から縁辺にかけて Sr/Ca 比の上昇が認められた。ただし、錦川サツキマスで耳石径 $100\sim300\ \mu\text{m}$ にかけて Sr/Ca 比の上昇が認められたのは個体番号 N#2 のみで、他の 6 個体は個体番号 N#5 (Fig. 2N) にみられるように発育初期の Sr/Ca 比に大きな変動が認められないのが特徴であった (Table 2)。個体番号 N#5 の面分析結果 (Fig. 3C) をみても、ストロンチウム濃度の上昇が認められたのは縁辺部のみで

あった。

考 察

太田川および錦川サツキマスの降海履歴の判定 分析に供した海面養殖サツキマスの全個体において、耳石縁辺部付近の Sr/Ca 比の上昇が認められたことから、Sr/Ca 比は、環境水中の塩分履歴の指標になると考えられる。海面養殖期間に相当する間の Sr/Ca 比の平均値の平均は 3.9 であったが、同じ網生け簀内で飼育されたにもかかわらず、調査した 7 個体中の Sr/Ca 比の平均値は最大値で 4.5、最低値で 3.2 と個体間で差が認められた。淡水飼育アマゴ縁辺部における Sr/Ca 比の平均値は平均で 1.9 であったことから、本種が淡水中に生息していた場合、耳石中の Sr/Ca 比の平均値はほぼ 2 以下

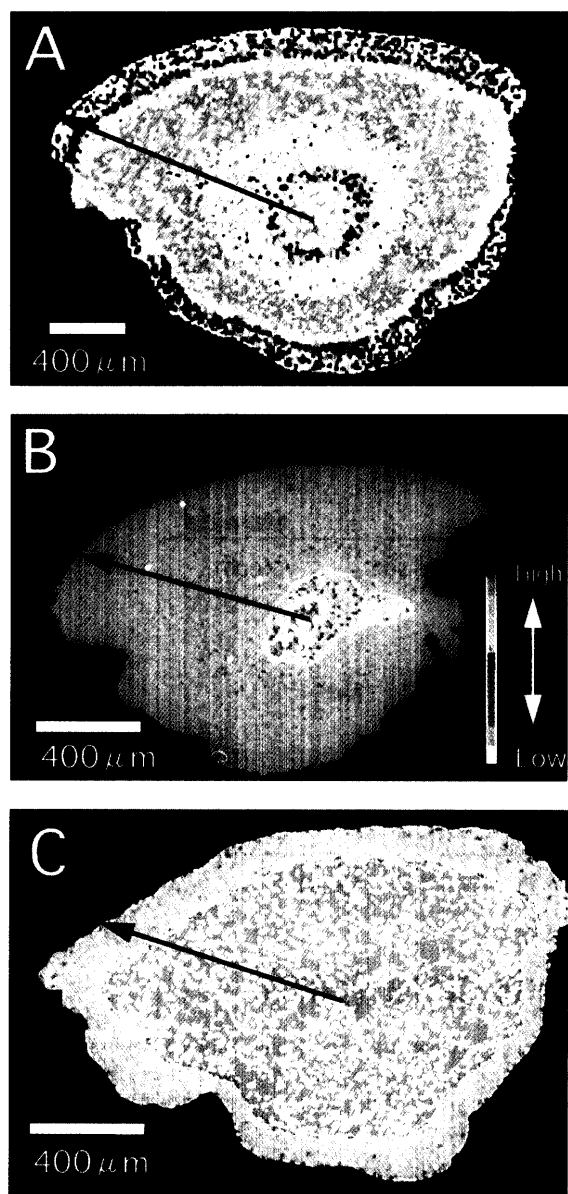


Fig. 3. X-ray intensity map of strontium on sagittal otolith of sea-culture fish (A: SC#5), freshwater resident (B: O#19) and anadromous resident (C: N#5). High X-ray intensity on the peripheral core of sea-culture fish and freshwater resident may originate from “maternal strontium”. Results of line analysis of Sr/Ca ratio (transect lines on each otolith) corresponded to Fig. 2C, 2K and 2M, respectively.

を示し、海水中に生息していた場合は平均で3以上を示すと判断できる。

降海によって生じる耳石縁部付近のSr/Ca比の上昇に注目すれば、太田川サツキマスでは個体番号O#19 (Fig. 2K) のみ縁部付近でSr/Ca比の上昇は認められなかったことになる。したがって、Sr/Ca比から太田川のサツキマスの降海履歴の有無を判定した場合、調査

した27個体中、26個体が降海履歴を持つサツキマスと断定できる。非降海型と判別された個体番号O#19は、今回捕獲したサツキマスの中で最小であり（全長264 mm）、高瀬堰より上流もしくは下流約5 km付近までの淡水域を生活領域にしていたと考えられる。

また、降海によって生じたSr/Ca比の平均値は海面養殖サツキマス7個体で平均3.9、太田川サツキマス26個体で平均3.7となり（Table 2）、両者の間で有意差は認められなかった（Welch's approximative *t*-test, $p = 0.32$ ）。ただし、個体番号O#2およびO#20では降海時期に相当する部分のSr/Ca比の平均値が2.6と比較的に低い（Table 2）。高瀬堰より下流約5 kmは干満の影響を受ける汽水域が広がっており、冬期にサツキマスが捕獲されている（広島県水産試験場淡水支場による平成3年度サツキマス漁獲調査結果、未発表）。個体番号O#2およびO#20はこのような汽水域を主な生活領域にしていた可能性が高いことになる。

錦川で捕獲されたサツキマスにおいて、調査した7個体で耳石縁部付近のSr/Ca比の上昇が認められたことから、これらの個体は遡河サツキマスと思われる。ただし、降海によって生じたSr/Ca比の平均値は3.3となり（Table 2）、海面養殖サツキマスに比べて有意に低かった（Welch's approximative *t*-test, $p = 0.005$ ）。したがって全体的に見れば錦川産サツキマスは沿岸域への回遊性が低いと考えられる。特に、個体番号N#3およびN#4は河口の汽水域を主な生活領域にしていた可能性が高いと思われる。

Sr/Ca比のチャートと耳石日周輪を照合することによってサツキマスの滞海期間の解析を試みたが、サツキマスの耳石は茶褐色の不透明帯を有しており、一部の個体を除いて降海時期の特定は困難であった。そこで太田川産サツキマスの滞海期間を推定するために、12月中旬から5月中旬までの約5ヶ月、広島湾で海水飼育したサツキマスのSr/Ca比のチャートパターンとの対比を試みた。すなわち、海水飼育サツキマス7個体において、耳石半径に対する海水飼育中に形成されたと考えられる耳石幅（%）を算出したところ平均21.2となった。これに対して太田川産サツキマスの平均値は19.7となり（Table 2）、両者の間で有意差は認められなかった（Welch's approximative *t*-test, $p = 0.60$ ）。したがって、太田川産サツキマスの滞海期間は平均的にみれば5ヶ月程度と思われる。

発育初期のSr/Ca比の変動要因 飼育履歴が判明している海面養殖サツキマス、淡水養殖アマゴおよび広島県太田川で捕獲された標識放流サツキマスの耳石Sr/Ca比の推移を分析した結果、ほとんどの個体が耳石中心から100~500 μmにかけて一時的なSr/Ca比の上昇を示した。これら人工生産魚の飼育履歴から判断すれば、こ

の現象は環境水の塩分の変化と無関係である。Tsukamoto *et al.*²⁶⁾によれば、近縁種のサクラマス浮上稚魚の耳石径は約 500 μm に達するため、本研究で認められたサツキマスやアマゴにおける耳石中心部の Sr/Ca 比の上昇は、卵黄吸収までの仔魚期に生じた可能性が高い。また、Kalish²⁷⁾はタラで親由来の Sr が卵成熟の進行に伴って卵に移行することを、Zeitoun *et al.*²⁸⁾はニジマス仔魚期の微量元素が環境水よりもむしろ卵黄由来であることを指摘している。したがって本研究で認められた耳石中心部の Sr/Ca 比の上昇は、親由来の Sr が卵黄吸収によって仔魚の耳石に蓄積されたことによるものと考えられる。

ただし、太田川で捕獲されたサツキマスや錦川のサツキマス (Fig. 2E, F, N) で、これらの現象を示さない個体が存在したのは興味深い。Kalish¹⁴⁾および Rieman *et al.*¹⁶⁾はサケ科魚類で本研究と同様に耳石中心付近で Sr/Ca 比が上昇する個体と上昇しない個体が存在することを報告している。彼らの見解によれば前者は降海型親魚の子孫で、後者は陸封型親魚の子孫に特異的な現象であるという。しかしながら本研究において仔魚期に Sr/Ca 比の上昇を示した淡水養殖アマゴや標識放流サツキマスの親魚はいずれも陸封型であり、Kalish¹⁴⁾および Rieman *et al.*¹⁶⁾の見解と異なる。また、現時点では、仔魚期における Sr/Ca 比が上昇する現象は近縁種のサクラマスでは認められていない。²²⁾ 仔魚期の Sr/Ca 比の上昇が親魚から仔魚へ移行する Sr 量を反映しているとするれば、チャートパターンが示すように移行する Sr 量はかなりの個体差が存在するものと思われる。今後、仔魚期の耳石中の Sr 量については、親魚の由来や種特異性も含め詳細に検討する必要がある。

一方、太田川上流域で釣獲した陸封型アマゴにおいては仔魚期以外に耳石径 600~900 μm にかけて緩やかな Sr/Ca 比の上昇が認められた。サクラマスの耳石径と孵化日数の関係²⁶⁾から推定すれば耳石径 600~900 μm の部分は受精から 90~120 日後に相当し、時期的には 2 月から 3 月の低水温期に相当する。多くの魚類では耳石中の Sr/Ca 比と環境水温は逆相関を示す²⁹⁻³³⁾ことから、陸封型アマゴの耳石径 600~900 μm にかけての Sr/Ca 比の上昇は冬の生息水温の低下によって生じた可能性もある。また Sr/Ca 比の上昇に餌の種類やハンドリング¹⁸⁾もしくは急激な温度変化²⁵⁾が関与することが指摘されている。分析に供した釣獲アマゴの由来が人工放流魚なのか、もしくは天然魚なのかは不明であるが、人工放流魚ならば上述した環境以外の要因により Sr/Ca 比が上昇した可能性もあろう。

耳石の微量元素は回遊履歴の推定に加え、系群や由来の判別手段として有用である。³⁴⁻⁴⁰⁾ 太田川上流域で釣獲された陸封アマゴの Sr/Ca 比のチャートでは仔魚期と

耳石径 600~900 μm の部分に当たる時期に Sr/Ca 比が上昇するのが特徴であるが、太田川高瀬堰で捕獲されたサツキマスに陸封アマゴと酷似したチャートパターンを有するサツキマス (個体番号 7, 8, 9, 12 および 27) が存在した。この結果は、山間部に放流されたアマゴの一部が降海していることを示しているのではないであろうか。聞き取り調査によれば、同河川の 1997 年度におけるスモルト個体の放流は、3000 尾の標識放流 (太田川漁協および温井ダム工事建設所) と、2000 尾の無標識放流 (釣り愛好家らによる) が実施されていた。高瀬堰で捕獲した 27 個体のサツキマスの由来がこれらのスモルト放流魚と仮定すれば無標識魚の混獲率は約 4 割程度となろうが、実際に同堰で捕獲された無標識サツキマスの混獲率は約 7 割であった。無標識魚の捕獲状況からみても、一部のサツキマスが上流域由来のアマゴであることが伺える。

回遊履歴の推定 多くのサツキマスやアマゴで、発育初期に環境水中の塩分と関係なく Sr/Ca 比が変動することが認められたことから、Sr/Ca 比によって降海履歴を推定するには注意が必要である。特に、サツキマスの場合、降海時期と冬期が重複するため低水温が Sr/Ca 比の上昇に関与している可能性もある。しかし、淡水養殖アマゴや陸封型アマゴ 1 年魚で 2 回目の越冬期に Sr/Ca 比の上昇が認められていないことから、サツキマスの 2 年目の冬期の Sr/Ca 比の上昇は水温変動の影響ではなく降海履歴を反映していると判断され、このことを前提として以下の論議を進める。

高瀬堰で捕獲された 27 個体中、6 月中旬に捕獲された 22 個体 (個体番号 O#3~O#24) は 7 月 22 日まで太田川漁協で淡水蓄養されており、これらのサツキマスの Sr/Ca 比のチャートパターンは、いずれも耳石最縁部付近で Sr/Ca 比が減少している。これは捕獲後の淡水蓄養の影響と考えられ、自然環境下でもサツキマスが海水から淡水へと生活領域を移行した場合、耳石 Sr/Ca 比が減少することを示唆している。サツキマスもサクラマス²⁶⁾同様 1 日 1 本の日周輪が形成されると仮定して、6 月中旬に捕獲された 22 個体の日周輪を遡って捕獲時の Sr/Ca 比を推定した場合、全ての個体が降海期と同様の Sr/Ca 比を示した。この結果は、太田川における遡河サツキマスが汽水域に長期間滞留することなく、極めて短期間のうちに沿岸域もしくは河口から高瀬堰に到達したことを示唆している。また、捕獲後直ちに分析試料とした 7 月 10 日の個体番号 O#26 (Fig. 2L) や 7 月 7 日の個体番号 O#25 は、耳石縁部で Sr/Ca 比の減少が認められたが、日周輪と Sr/Ca 比の変動とを照合したところ、沿岸域から淡水域への移動は共に 6 月中旬と推定された。したがって、高瀬堰で捕獲されたサツキマスの大部分が 6 月中旬に沿岸域もしくは河口より一

齊に遡上したと考えられる。

本荘⁵⁾によればサツキマスの遡河を誘発する一つの要因は環境水温であり, 長良川においては海水と河川水の温度が共に 10~12℃ になる時, 遡河が誘発される。1998 年度の 6 月中旬の太田川の河川水温は 19℃ 前後で, 1991 年および 1992 年の高瀬堰における遡上最盛期の水温と一致する。¹²⁾ この水温は, 長良川サツキマスの遡上水温と比較すればかなり高いが, 同時期の太田川河口沿岸域の水深 5 m の水温は約 19℃ (広島市水産振興協会による調査) であり, 河川水温と同じであった。このことはサツキマスの遡河が沿岸と河川水温の一致により誘発される⁵⁾ことを支持している。また, 太田川高瀬堰で捕獲されたサツキマスの GSI は, 平均 2.6 で, 長良川および木曾川の遡河サツキマスの 0.5⁵⁾より大きい。これは遡上時の水温や時期的な違いに起因していると思われる。

海面養殖サツキマスのチャートパターンを利用して太田川産サツキマスの滞海期間を推定した結果, 約 5 ヶ月であることが判明した。太田川のサツキマスの遡河が 6 月中旬であることから, 降海時期は 1 月中旬と推定される。また, 太田川産サツキマスにおいて降海に伴う Sr/Ca 比の上昇過程に注目すれば, 海面養殖サツキマスと異なり, ほとんどの個体が緩やかな上昇を示している。海面養殖サツキマスの海水馴致期間は 10 日間であることを考慮すれば, 太田川サツキマスは沿岸域に入る前に 10 日以上汽水域に滞留するものと考えられる。降海過程に相当する耳石部位の日周輪解読が可能な個体 (個体番号 O#3, O#18) について調査したところ, 汽水域に滞留した期間は 1 ヶ月程度であった。したがって, 太田川産サツキマスの回遊履歴を EPMA 分析で解析した結果を要約すれば, 太田川産サツキマスは 1 月中旬頃から河川より汽水域に移動し, 2 月中旬まで汽水生活を経た後, 沿岸域を回遊し, 海水と河川の水温が共に約 19℃ になる 6 月中旬に遡河することになる。

謝 辞

耳石微量元素分析に際し, 電子線マイクロアナライザーの使用の機会を与えていただいた広島大学機器分析センター, 薄片試料作成に協力していただいた広島大学理学部特殊加工技術開発室光学系試料作成部門の石佐古早実氏並びに広島大学工学部学校工場の石原正文氏に感謝します。

建設省中国地方建設局太田川工事事務所, 太田川漁業協同組合, 財団法人広島県環境保健協会並びに広島県水産試験場の高場稔氏, 飯田悦左氏にはサツキマスの入手に協力いただきました。また, 万古溪養魚観光株式会社の伊藤順二郎氏には海面養殖サツキマス並びに養殖アマゴを, 森島輝氏, 中村伸行氏, 中村幸春氏には釣獲アマ

ゴを快く提供していただいた。ここに記して, 心から感謝します。

本研究をまとめるにあたり, 広島湾沿岸の水質調査資料を提供していただいた財団法人広島市水産振興協会, サツキマスの生態や太田川の河川環境について有益な助言を賜った建設省温井ダム工事事務所の岩水正志博士および太田川漁業協同組合の田村龍弘氏, 英文校閲を賜った Northern Arizona 大学の Ann Cleveland 博士に感謝します。

文 献

- 1) 大島正満. ヤマメ及びアマゴの系統並びに生活史に関する二三の知見. 自然科学 1929; 4: 129-150.
- 2) 大島正満. ヤマメ及びアマゴの分布. 理学界 1931; 28: 29-30.
- 3) 大島正満. 「桜鱒と琵琶鱒」楡書房, 札幌, 1957; 1-79.
- 4) 加藤文男. 降海型アマゴ *Oncorhynchus rhodurus* の分布について. 魚類学雑誌 1975; 21: 191-197.
- 5) 本荘鉄夫. アマゴの増養殖に関する基礎的研究. 岐阜県水産試験場報告 1977; 22: 1-103.
- 6) 加藤文男. 伊勢湾に降海するアマゴ (*Oncorhynchus rhodurus*) の生態について. 魚類学雑誌 1973; 20: 225-234.
- 7) 今泉克英, 宇野将義. 愛知県における降海性アマゴの放流技術開発研究. 愛知県水誌研究業績 B しゅう 1982; 3: 1-42.
- 8) 岡崎 稔, 立川 互, 本荘鉄夫, 原田増造, 宇野将義. 在来マス類の放流に関する研究-XVIII, 降海性アマゴの母川回帰について. 岐阜県水産試験場研究報告 1983; 28: 17-31.
- 9) 加藤文男. 越前海岸で獲れた降海アマゴ. 魚類学雑誌 1978; 25: 71-72.
- 10) 加藤史彦, 樋田陽治, 野田栄吉, 角 祐二. 日本海の北陸・東北沿岸で漁獲された降海アマゴ. 日本海区水産研究所報告 1982; 33: 55-65.
- 11) 本荘鉄夫, 岡崎 稔, 森茂 壽. 在来マス類の放流に関する研究-K, アマゴの降海と壟河について. 岐阜県水産試験場研究報告 1975; 21: 1-8.
- 12) 浜井正章, 田村龍弘, 高山晴義, 加藤友久, 柳川 建, 廣瀬久巳. 太田川における降海型アマゴの放流と追跡. 広島県水産試験場研究報告 1996; 19: 41-49.
- 13) Radtke RL, Kinze III RA, Folsom SD. Age at recruitment of Hawaiian freshwater gobies. *Environ. Biol. Fish.* 1988; 23: 205-213.
- 14) Kalish JM. Use of otolith microchemistry to distinguish the progeny of sympatric anadromous and non-anadromous salmonids. *Fish. Bull. (Wash. D.C.)* 1990; 88: 657-666.
- 15) Secor DH. Application of otolith microchemistry analysis to investigate anadromy in Chesapeake Bay striped bass *Morone saxatilis*. *Fish. Bull. (Wash. D.C.)* 1992; 90: 798-806.
- 16) Rieman BE, Myers DL. Use of otolith microchemistry to discriminate *Oncorhynchus nerka* of resident and anadromous origin. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1994; 51: 68-77.
- 17) Secor DH, Henderson-Arzapalo A, Piccoli PM. Can otolith microchemistry chart patterns of migration and habitat utilization in anadromous fishes? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1995; 192: 15-33.
- 18) Limburg KE. Otolith strontium trace environmental histo-

- ry of subyearling American shad *Alosa sapidissima*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1995; **119**: 25–35.
- 19) Radtke RL, Svenning M, Malone D, Klements A, Ruzicka J, Fey D. Migration in an extreme northern population of Arctic charr *Salvelinus alpinus*: insights from otolith microchemistry. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1996; **136**: 13–23.
 - 20) Otake T, Uchida K. Application of otolith microchemistry for distinguishing between Amphidromous and non-amphidromous stocked ayu, *Plecoglossus altivelis*. *Fisheries Sci.* 1998; **64**: 517–521.
 - 21) Secor DH, Ohta T, Nakayama K, Tanaka M. Use of otolith microanalysis to determine estuarine migrations of Japanese sea bass *Lateolabrax japonicus* distributed in Ariake Sea. *Fisheries Sci.* 1998; **64**: 744–752.
 - 22) Arai T, Tsukamoto K. Application of otolith Sr:Ca ratios to estimate the migratory history of masu salmon, *Oncorhynchus masou*. *Ichthyol. Res.* 1998; **45**: 309–313.
 - 23) 加藤文男. 降海型アマゴの鱗相について. *魚類学雑誌* 1978; **25**: 51–57.
 - 24) Otake T, Ishii T, Nakahara M, Nakamura R. Drastic changes in otolith strontium/calcium ratios in leptocephali and glass eels of Japanese eel *Anguilla japonica*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1994; **112**: 189–193.
 - 25) Kalish JM. Formation of a stress-induced chemical check in fish otoliths. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1992; **162**: 265–277.
 - 26) Tsukamoto K, Seki Y, Oba T, Oya M, Iwahashi M. Application of otolith to migration study of salmonids. *Physiol. Ecol. Jpn.* 1989; Sec. Vol. 1: 119–140.
 - 27) Kalish JM. Determinants of otolith chemistry: seasonal variation in the composition of blood plasma, endolymph and otoliths of bearded rock cod *Pseudophycis barbatus*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1991; **74**: 137–159.
 - 28) Zeitoun IH, Ullrey DE, Bergen WG, Magee WT. Mineral metabolism during the ontogenesis of rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *J. Fish. Res. Board Can.* 1976; **33**: 2587–2591.
 - 29) Radtke RL. Strontium-calcium concentration ratios in fish otolith as environmental indicators. *Comp. Biochem. Physiol.* 1988; **92A**: 189–193.
 - 30) Townsend DW, Radtke RL, Morrison MA, Folsom SD. Recruitment implications of larval herring overwintering distributions in the Gulf of Maine, inferred using a new otolith technique. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1989; **55**: 1–13.
 - 31) Radtke RL, Townsend DW, Folsom SD, Morrison MA. Strontium:calcium concentration ratios in otoliths of herring larvae as indicators of environmental histories. *Environ. Biol. Fish.* 1990; **27**: 51–61.
 - 32) Townsend DW, Radtke RL, Corwin S, Libby DA. Strontium: calcium ratios in juvenile Atlantic herring *Clupea harengus* L. otoliths as a function of water temperature. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1992; **160**: 131–140.
 - 33) 角田 出. 飼育水温がヒラメ稚魚耳石の元素組成に及ぼす影響. *日本海水学会誌* 1996; **50**: 349–355.
 - 34) Mulligan TJ, Martin FD, Smucker RA, Wright DA. A method of stock identification based on the elemental composition of striped bass *Morone saxatilis* (Walbaum) otoliths. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1987; **114**: 241–248.
 - 35) Edmonds JS, Moran MJ, Caputi N. Trace element analysis of fish sagittae as an aid to stock identification: pink snapper (*Chrysophrys auratus*) in Western Australian waters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1989; **46**: 50–54.
 - 36) Thresher RE, Proctor CH, Gunn JS, Harrowfield IR. An evaluation of electron-probe microanalysis of otoliths for stock delineation and identification of nursery areas in a southern temperate groundfish, *Nemadactylus macropterus* (Cheilodactylidae). *Fish. Bull. (Wash. D.C.)* 1994; **92**: 817–840.
 - 37) Campana SE, Fowler AJ, Jones CM. Otolith elemental fingerprinting for stock identification of Atlantic cod (*Gadus morhua*) using laser ablation ICPMS. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1994; **51**: 1942–1950.
 - 38) Severin KP, Carroll J, Norcross BL. Electron microprobe analysis of juvenile walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, otoliths from Alaska: a pilot stock separation study. *Environ. Biol. Fish.* 1995; **43**: 269–283.
 - 39) Arai N, Sakamoto W, Maeda K. Analysis of trace elements in otolith of red sea bream *Pagrus major*. *Fisheries Sci.* 1995; **61**: 43–47.
 - 40) Dove SG, Gillanders BM, Kingsford MJ. An investigation of chronological differences in the deposition of trace metals in the otoliths of two temperate reef fish. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1996; **205**: 15–33.