

耳石元素分析による漁港の魚類育成機能の実証手法の開発

水産総合研究センター 西海区水産研究所
石垣支所 山田秀秋

調査実施年度 平成15年～17年

緒言

漁港は、藻場や干潟と同様に、多数の稚魚が着底し成育場として利用する水域と考えられている。水産資源の年級群水準は幼魚期までの生残率でほぼ決定されることから、成育場としての機能に優れた海域は、漁業生産への貢献も高いことが予測される。そのため、漁港の設置には、育成場の造成という付加価値が期待できる。しかし、既存の研究手法では育成機能の定量的な把握ができないため、漁港建設の投資効果は過小評価を余儀なくされている可能性がある。魚類の耳石は、環境中の様々な元素を取り込みつつ大型化する。これらの耳石中の元素は一旦取り込まれると再び溶出することはないため、環境条件、生理状態ならびに耳石元素組成の対応関係が明らかになれば、耳石元素分析と耳石日周輪とを組み合わせることでフライトレコーダーのようにある個体の過去の行動を読み取ることができる。つまり、漁獲されるまで生き残った成魚の耳石について元素組成を分析することで、その個体が稚魚期にどのような水域に生息していたかを直接知ることができる。本研究では、アイゴをモデル魚種として、耳石の元素組成分析を基本とした漁港出身個体の探索手法を開発し、定性研究に終始している閉塞状況のブレイクスルーを目指す。

調査方法

1. 概略評価

釣獲や目視観察、聞き取り調査等により石垣漁港内に分布する有用魚類の種類とそれらの発育段階を把握した。また、市場調査ならびに文献調査により、石垣島周辺海域における漁業実態を調べた。

メモリー式水温計を石垣漁港内（図1）ならびに漁港外のアマモ場付近に設置し、30分間隔の測定値から日平均値を求めて、その季節変化を調べた。その他、塩分濃度、溶存酸素ならびに濁度を定期的に測定し、藻場と漁港とで比較した。

2. アイゴの初期生態

石垣漁港ならびに石垣島周辺藻場において曳網あるいは釣獲によりアイゴ幼稚魚を採集し、標準体長を測定した。摘出した耳石を樹脂包埋した後、精密低速切断機と研磨紙により核を露出させた横断面サンプルを作成し、研磨剤により鏡面仕上げにした。ふ化時から採集時までに対応する部位について、耳石日周輪計測システムを用いて、日周輪間隔、輪紋数等を測定した。アイゴの耳石には、浮遊期間を終えて藻場へ着底する時にコントラストの強い輪紋（着底マーク）が形成される。また、アリザリンコンプレクソン標識を使った飼育実験により、耳石に認

められる微細輪紋が日輪であることを検証している。そのため、着底マークの内側の輪紋数を浮遊期間、マーク外側の輪紋数を着底からの経過日数として、ふ化日、浮遊期間、成長等を海域間で比較した。以上の他、生殖腺調査や消化管内容物調査を適宜行った。

3. 耳石ストロンチウム濃度の分析

前項で測定に供した耳石サンプルの一部を超音波洗浄器で洗浄した後、表面を金で蒸着した。日周輪分析と同一の測定軸について、波長分散型電子プローブマイクロアナライザ（日本電子 JXA-8200）による分析を $3\mu\text{m}$ 間隔（照射電流 $0.2\mu\text{A}$ 、加速電圧 15kV 、プローブ径 $3\mu\text{m}$ ）で連続的に行った。定法により各照射点の耳石ストロンチウム濃度（対カルシウム比 $\times 1000$ ）を求めた後、日周輪分析結果に基づき、ふ化日から採集日までの元素濃度の経日変化を分析し、海域間で比較した。より広い空間スケールでの相違を把握するため、新長崎漁港で採集したアイゴ稚魚についても同様の分析を行った。また、耳石ストロンチウム濃度の変動機構を解明するため、環境条件と耳石元素組成との関係を飼育条件下で分析した。

4. 微量元素の分析

より微量な元素を対象とするため、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計を用いた耳石分析を行った。2004年5月から2005年5月にかけて小型定置網等で採集された個体（稚魚～成魚）の耳石横断面サンプルについて、耳石縁辺部から耳石核周辺にかけて、 $100\mu\text{m}$ 間隔（プローブ径 $50\mu\text{m}$ ）で分析を行った。各元素濃度は、 ^{43}Ca に対する比率として算出した。さらに、2004年の8月から翌年4月にかけて様々な海域において海水を採集して、濾過ならびに酸固定を行ったのち、主要な元素の濃度を分析した。これらの資料から、環境条件と耳石微量元素濃度との関係を調べ、漁港出身個体の探索指標を抽出する。

調査結果ならびに考察

1. 概略評価

フエダイ類、フエフキダイ類、アイゴ類、ブダイ類の一部等、藻場を成育場とする有用沿岸魚の多くが漁港でも稚魚期を過ごすことが確認された。このほか、ヒラアジ類のように外洋性の魚種や、ニシン科のミズン類など餌料生物として重要な魚類も確認された。一方、サンゴ礁域あるいは河口域を主たる成育場とすることが知られている魚種はごく僅かであった。これらのことから、漁港は藻場と類似の役割を有する可能性が示唆された。

沖縄周辺海域では、モデル魚種のアイゴは、沿岸定置網漁業の主要種として重要な位置を占めた¹⁾。特に産卵のため藻場周辺に接岸する春季に漁獲量が多く²⁾³⁾、その主体は体長組成等⁴⁾から1-3歳前後と考えられる。後述するように、アイゴの一部は漁港滞在中に漁獲サイズに達することから、漁港を離れた直後に漁獲される可能性がある。

以上のことから、アイゴは藻場を成育場とする魚種を代表する生物であり、漁業生産への貢献を評価するためのモデル魚種として最適であると判断される。

漁港と藻場（漁港外）とで水温の経日変化を比較すると（図2）、漁港内では季節的な水温変動が緩やかであった。特に、冬季の水温低下が小さかった。サンゴ礁域では極端な低水温による魚類の斃死が報告されていることから、一部の魚種にとっては、漁港内の温度条件は他の海域よりも好適であると考えられる。漁港内は透明度が極めて低いため、餌料条件等の生息環境は藻場とは大きく異なると考えられる。実際に、アイゴの消化管内容物を調べたところ、藻場採集個体の過半数で海草が出現したが、漁港採集個体では全く出現しなかった。このため、漁港内と漁港外での数日レベルの短期的な移動はないものと考えられた。また、視覚捕食者による被食がアイゴ幼稚魚の減耗の主要因の一つと考えられるため、漁港内での濁りがアイゴの生残に有利に作用している可能性がある。その他、塩分や溶存酸素にも海域間で若干の相違が認められた。

2. 初期生態

5月前後に藻場周辺でふ化した仔魚は、外洋域で3週間程度の浮遊期を過ごした後、稚魚に変態して藻場へ着底した。着底は主に新月時に生じ、着底時の標準体長は約2cmであった。漁港内へのアイゴ稚魚の加入は9月から確認された。ふ化日—浮遊期間の関係には、漁港採集個体と藻場採集個体とで差がみられなかったことから（図3）、着底までの生態に違いはなく、藻場に着底したアイゴの一部がその後、漁港へ来遊したと考えられる。

耳石日周輪から求めた日齢—体長関係を図4に示す。採集海域に関わりなく、200日齢ほどまでは直線的に成長した。この間の成長速度には、漁港採集個体と藻場採集個体とで有意差がみられなかったことから（共分散分析; $p > 0.05$ ）、モデル魚種の成長からみる限り、漁港と藻場は同等の機能を有すると推定された。また、ふ化後約1年で成熟するが、漁港で採集されたアイゴにも熟卵を有する個体が確認されており、漁港の機能として、産卵親魚を過剰な漁獲圧から守る禁漁区としての役割も示唆された。

3. 耳石ストロンチウム濃度

2003年に加入したアイゴ稚魚を対象とした分析では、夏季または秋季に、漁港採集個体で特異的に耳石ストロンチウム濃度が急激に増大する現象が認められた（図5）。翌年に加入した個体群においても同様の傾向が認められたが、藻場採集個体の一部でも漁港採集個体と同様の変動を示し、海域間の相違は2003年級群よりも小さかった（図6）。個体別にみた耳石ストロンチウム濃度の最大値は、2003年は39.6、2004年は30.4であった。

一般に、耳石ストロンチウム濃度は、環境水の元素組成あるいは水温によって変動するといわれている⁵⁾。しかし、様々なストレスによっても顕著に上昇する例がいくつかの魚種で報告されている。そこで、天然海域での変動範囲に近い条件で水温ならびに塩分濃度を変化させて実験を行った。実験個体の耳石ストロンチウム濃度の平均値は5前後と低く、野外での結果を再現できるデータは得られなかった（図7）。

2002年、2005年級群も加えた4年分のデータを用いて、耳石ストロンチウム濃度と環境条件との関係を分析した結果、大型台風の通過とほぼ同期してストロンチウム濃度が急激に上昇することが判った。一方、2004年に新長崎漁港で採集した個体の耳石ストロンチウム濃度は、ふ化後わずかに増加したに過ぎず、顕著な変動は認められなかった（図8）。長崎周辺にも2004年9月上旬前後に大型台風が接近したものの、

短期間で通過したため日間平均風速は石垣よりも大幅に低かった。これらのことから、耳石ストロンチウム濃度は、台風の波浪によるストレスにより上昇するものと考えられた。

漁港内は漁港外と比較して静穏であるにもかかわらず、耳石ストロンチウム濃度は漁港内で採集した個体で高い傾向が得られた。このメカニズムは現段階では明らかではないが、次のような仮説が考えられる。すなわち、アイゴは着底後しばらくの間は藻場にのみ分布していたが、大型台風による強いストレスを受け、一部の個体が漁港へ避難した。これらの多くは採集時まで漁港に滞在し、過去に遡った耳石分析を行った結果、台風接近時に耳石ストロンチウム濃度の上昇が認められた。一方、漁港に避難しなかった個体の多くは台風の波浪等により死亡し、藻場で生き残ったのは直接台風の影響を受けない条件にあった個体のみとなった。その結果、藻場採集個体では耳石ストロンチウム濃度は上昇しなかった、というものである。このような仮説を検証し、年変動のメカニズムが解明されない限り、漁港生息履歴のある個体の探索に耳石ストロンチウム濃度を指標とすることはできないと考えられる。

4. 微量元素分析

採集直前の環境を反映する耳石縁辺部の微量元素濃度を分析した結果、マグネシウム、マンガン、亜鉛、鉛が漁港外において有意に高い値が得られた（多重比較 $p < 0.05$ ；図 9）。西表産サンプルでは、マグネシウムとバリウムにおいて、漁港外と同程度の濃度が得られた。明石と漁港との間では、いずれの元素においても明瞭な相違は認められなかった。

海水中の各元素の濃度をみると（図 10、図 11）、ストロンチウムおよびマグネシウムにおいては、名蔵川河口部で少なかったことを除いて、海域間による相違はほとんどなかった。一方、マンガン濃度は、8月に漁港外で非常に高い値が得られたほか、他の採集時には名蔵川河口部で最も高い値が得られた。漁港および明石におけるマンガン濃度は、常に低レベルで推移した。バリウムもマンガンを類似した時空間的变化を示した。銅、亜鉛および鉛では、耳石における結果と異なり、漁港内で最も高い値が得られた。耳石分析用サンプル採集点のうち、漁港外は、小河川の河口から 500m ほどの距離にあり、名蔵川河口に次いで河川水の影響を受けやすい地点である。実際に、2004 年 8 月の採水時において、直前に通過した台風により濁度の高い河川水が漁港外にまで達するのを確認した。西表や漁港は、河川水の影響を直接受ける海域から数 km ほど離れた場所に位置している。一方、明石は、大規模な河川が近隣にないうえ、開放的な地理条件にあるため、河川水の影響を受けやすい海域から 20km 程度離れている。マンガンは河口の堆積物中に蓄積されやすいことからみて⁶⁾、漁港外でサンプリングした海水ならびに耳石に認められた高いマンガン濃度は、河川水の影響を反映したものと判断される。

以上のように、マンガン濃度において、環境内濃度が高いほど耳石内濃度が高い傾向が認められた。そこで、耳石マンガン濃度について、ふ化から採集までの変化を調べた（図 12）。近隣に河口がない明石で採集された個体では、常に低濃度で推移した。漁港、漁港外、西表では、耳石縁辺部を除いて海域間の相違は認められず、生活史のいずれかの時期にマンガン濃度が多く個体で上昇した。漁港における海水中のマンガン濃度は明石と同様に低濃度で安定していたことからみて、漁港採集個体で認められる耳石マンガン濃度の発育に伴う変化は、生息場所の変遷を意味する。西表や漁港

外における耳石マンガン濃度も漁港と同様の変化を示したことから、明石以外の海域で認められた著しい個体差は、様々な経路で採集海域へ移動してきたことを示している。一方、明石周辺では、環境傾度が緩やかなため、他の海域と同程度に移動しても耳石マンガン濃度が変動しなかったと考えられる。これらのことから、着底期以降のアイゴは、大規模な移動はしないものの、年間数 km を超える移動は普通に行われるものと考えられる。同様に、漁港の移出入も頻繁に行われると推察されることから、漁港内で成育したアイゴの一部は漁港外で漁獲されるのは明らかである。

さらに、名蔵川河口で採集された稚魚を分析した結果、耳石マンガン濃度はいずれの個体においても縁辺部で最も高く、0.01 前後を記録した (図 1 3)。他の海域における耳石縁辺部のマンガン濃度は高くても 0.005 程度であることから (図 1 2)、名蔵川河口における結果は、河川水の影響を直接受ける海域特性を反映したものと考えられる。また、同時に採集したゴマアイゴ稚魚と比べると、アイゴではふ化から採集まで増加し続けたのに対して、ゴマアイゴでは採集からしばらく前に最大値に達しその後減少した。一般に、ゴマアイゴの成育場は塩分濃度の低い汽水域であることが知られている。両種の耳石マンガン濃度の変化からみても、ゴマアイゴでは上流域から河口域へ移動してきたのに対して、アイゴは、海域から河口域へ侵入した後に採集されたことが読み取れる。このことから、耳石バリウム濃度の変化によって、河口域の利用実態が推定できることが判った。

耳石マンガン濃度が 0.01 を超える個体を大規模な河口に生息した履歴を持つ個体と判断して、これら河口出身個体 (a) は漁港の内外に均一に分布すると仮定すると、サンプル中の a の割合 ($a/n \times 100$) は、その海域の密度が高いほど低くなる。この理論を利用して、漁港内と漁港外とで、密度の比較を試みた。漁港外では 17 個体中 5 個体で耳石マンガン濃度が 0.01 を超えており、a の割合は 29.4% であった。同様に、漁港では 15 個体分析し、同じく 33.3% であった。このように海域間で相違はほとんど認められなかったため、漁港の成育場機能は天然漁場に匹敵する可能性が示唆された。今後、モデル魚種アイゴの移動生態を詳細に調べることで、分析精度を向上させる必要がある。

本研究により、漁港が有する付加価値の定量化に向けた道筋を示すことができた。ただし、漁港の設置効果を検討する際には、その他にも様々な情報を収集する必要がある。例えば、漁港には藻場が有するような浄化機能は期待できない。また、ベントス等の生物多様性は漁港内で低い傾向があることから、これらの多様性の低下が生態系にどのような影響を及ぼすのかを検証する必要がある。付加価値の調査と平行してこれら負の効果について真正面から取り組むことで、客観的で説得力のある結論が得られるであろう。

摘 要

1. 漁港内には多くの有用種稚魚が生息し、その多くはアマモ場を主たる成育場とする魚種であった。
2. モデル魚種アイゴの成長は、漁港と漁港外とで差は認められなかった。
3. 漁港は、越冬地機能、産卵親魚保護機能、波浪からの避難所機能などの様々な副次機能を有する可能性が示唆された。
4. 耳石ストロンチウム濃度は漁港採集個体で高い傾向が認められたが、年変動も

顕著であった。漁港の成育場機能の定量化に利用するためには、耳石ストロンチウム濃度の時空間的变化に関するメカニズムの解明が不可欠である。

5. 耳石マンガン濃度の分析により、漁港で成育した稚魚の一部は漁業に加入することがほぼ証明された。

引用文献

- 1) 内閣府沖縄総合事務局農林水産部、2005：第33次沖縄農林水産統計年報（水産業部門）
- 2) 杉山昭博・友利昭之助、1990：石垣島におけるアイゴ類成魚の漁獲変動と稚魚の季節的来遊，水産増殖、38(1)、67-74
- 3) 本永文彦・喜屋武俊彦、1988：沖縄島沿岸定置網によって漁獲されるシモフリアイゴの産卵生態，南西外海の資源・海洋研究、4、33-40
- 4) 本永文彦、1991：沖縄島におけるシモフリアイゴの産卵期の体長組成および成熟度と性比，南西外海の資源・海洋研究、7、29-37
- 5) 荒井崇臣、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)、1-23
- 6) 堤 裕昭、2005：有明海に面する熊本県の干潟で起きたアサリ漁業の著しい衰退とその原因となる環境変化、応用生態工学会、8(1)、83-102



図1. 調査海域図

1. 石垣漁港、2. 明石（アマモ場）、
3. 名蔵川、4. 西表（アマモ場）

定点「漁港外」は、石垣漁港に隣接する外海側に位置するアマモ場である。

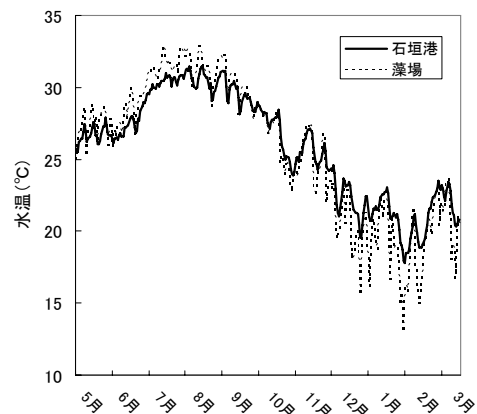


図2. 平成15年度における日間平均水温
藻場は漁港外に位置する。

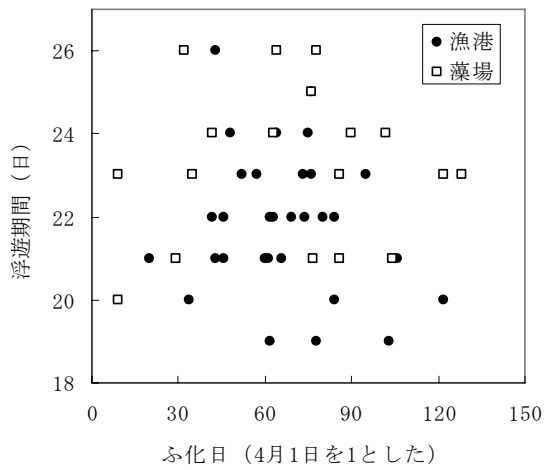


図3. アイゴのふ化日と浮遊期間

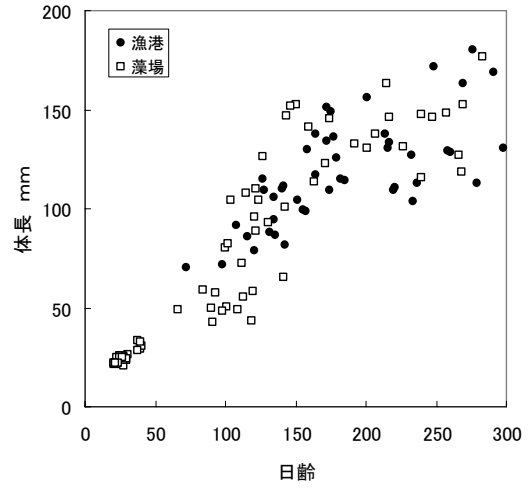


図4. 成長速度 (各個体の耳石日輪数と体長)

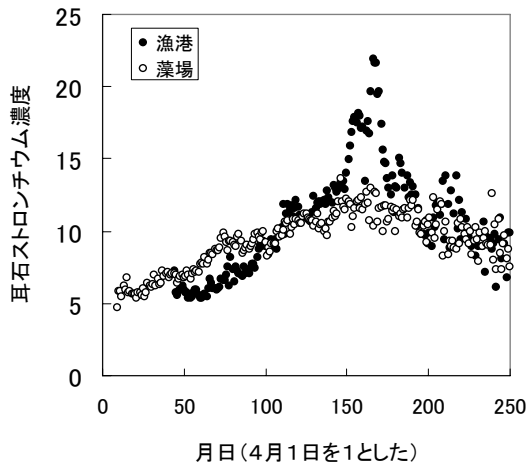


図5. 2003年級群のストロンチウム濃度の経日変化 (漁港10個体、藻場8個体の平均値)

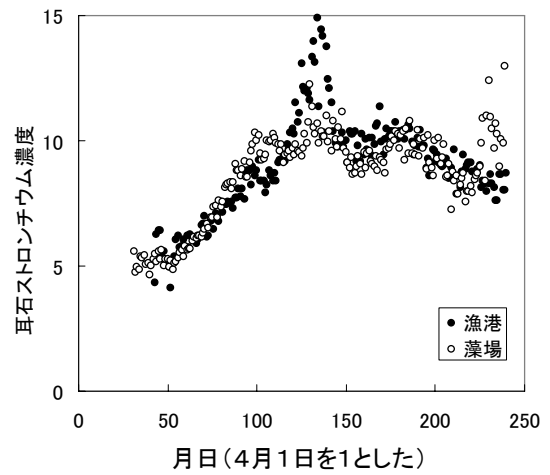


図6. 2004年級群のストロンチウム濃度の経日変化 (漁港7個体、藻場11個体の平均値)

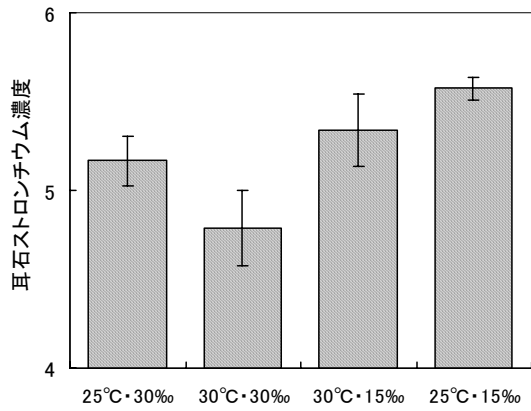


図7. 耳石ストロンチウム濃度に及ぼす水温塩分の影響 (5個体の平均値及び標準誤差)

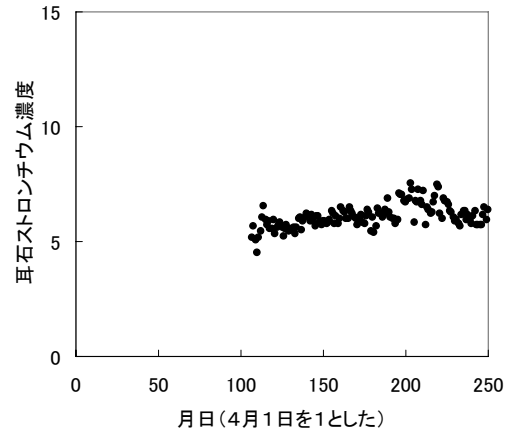


図8. 2004年新長崎漁港サンプルのストロンチウム濃度 (7個体の平均値)

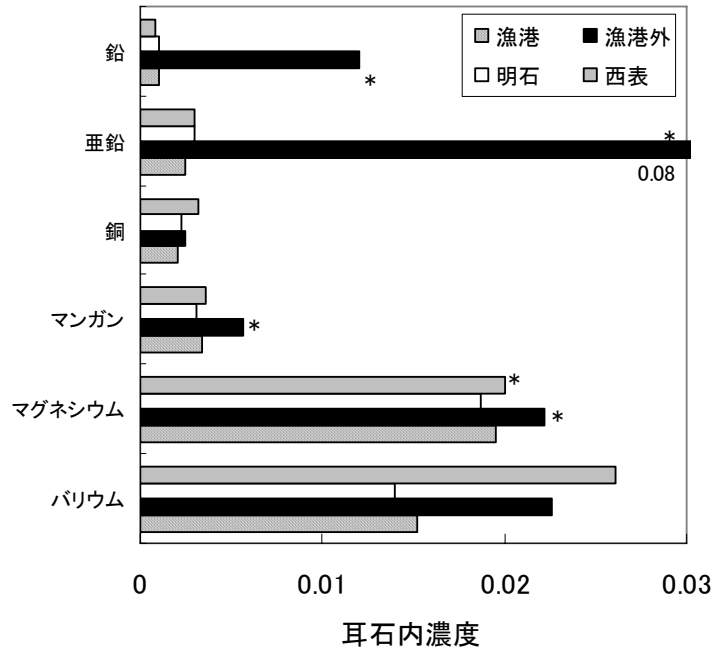


図9. 2004年初夏採集個体の耳石縁辺部の微量元素濃度. 各海域6個体の平均値で示す.
*は平均値が他の海域よりも有意に高いことを示す($p < 0.05$)

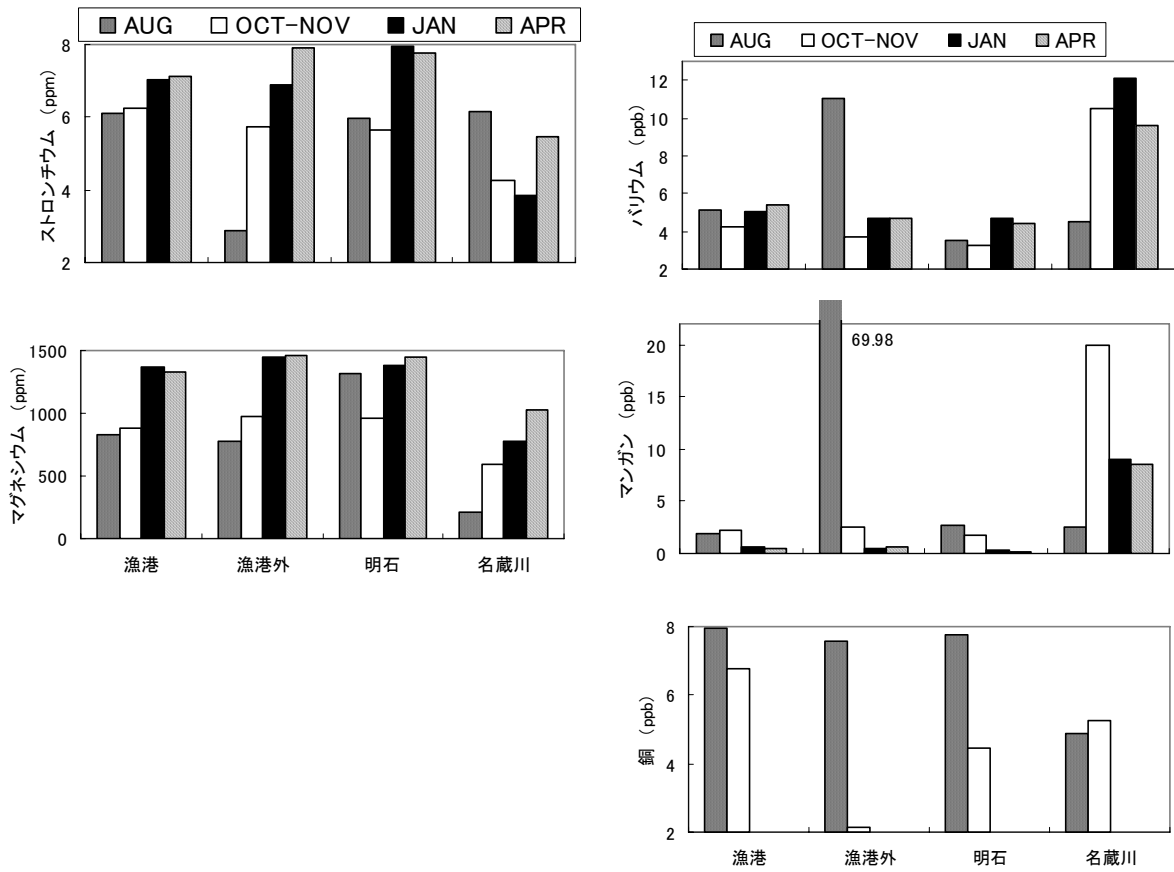


図 10. 各海域における海水中の元素濃度 - 1

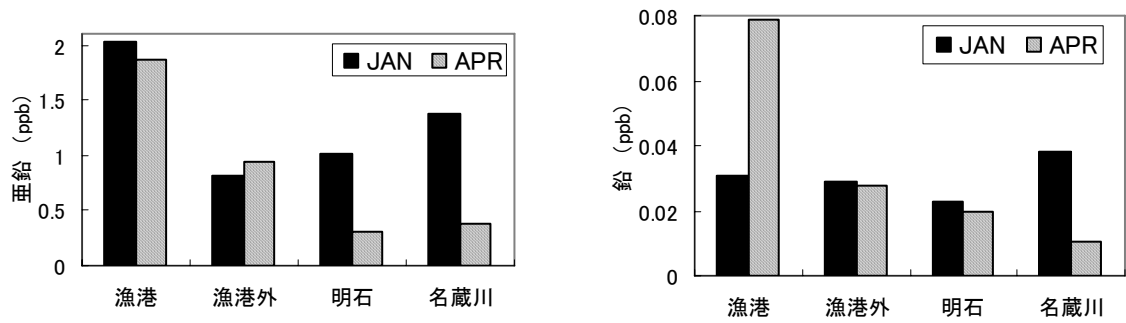


図 11. 各海域における海水中の元素濃度 - 2

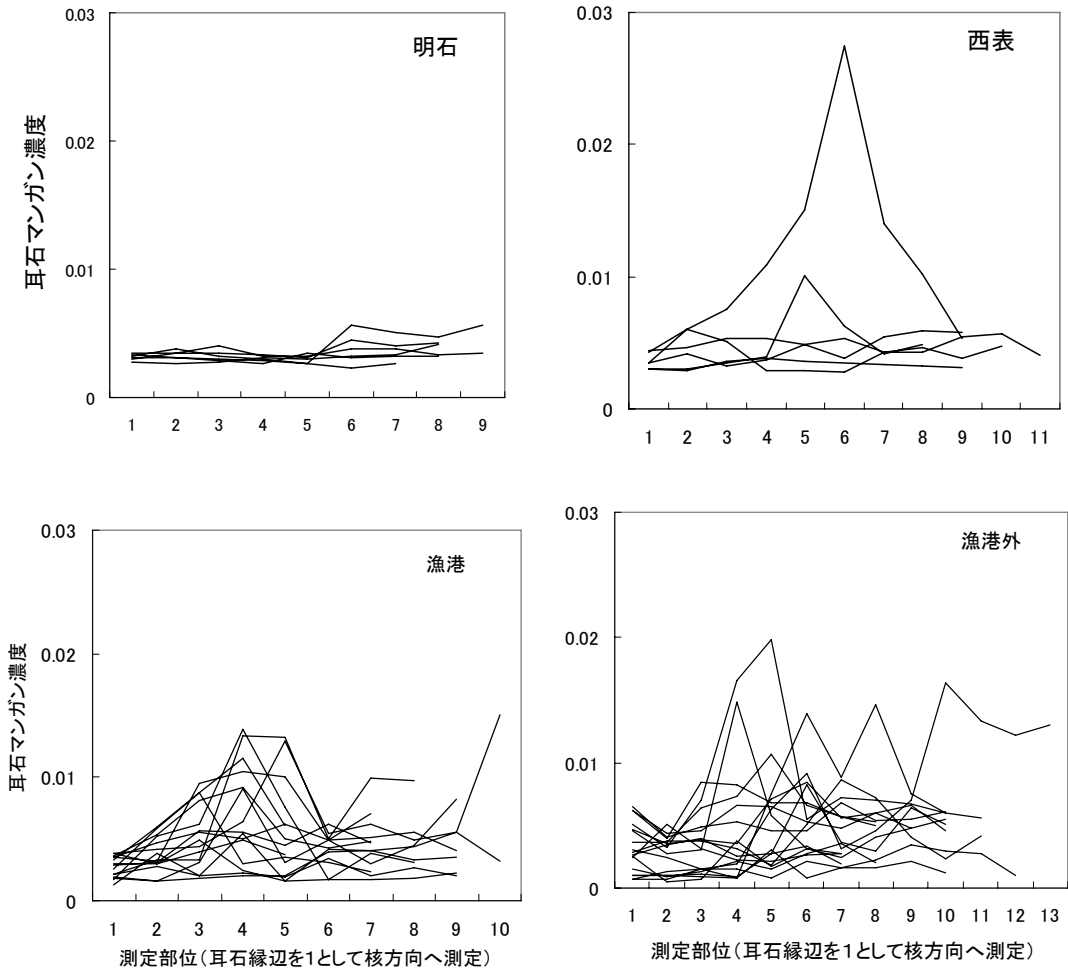


図 1 2 . 耳石マンガン濃度の発育に伴う変化
 2004 年から 2005 年にかけて採集したアイゴ (成魚を含む) について、
 耳石縁辺部からふ化直後の部分に遡って 100 μ m 間隔で分析した結果を示す.

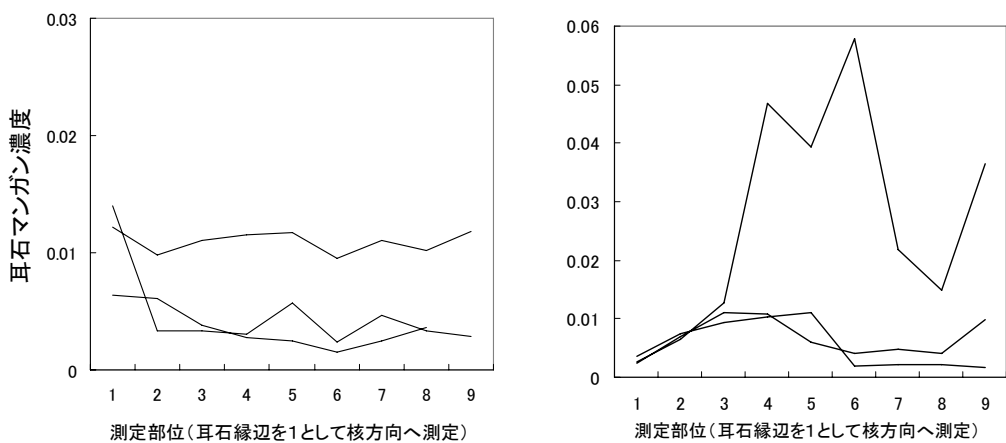


図 1 3 . 2004 年 11 月名蔵川河口において採集したアイゴ稚魚 (左) および
 ゴマアイゴ稚魚 (右) の耳石マンガン濃度