

マダイに対するイリジウム標識の開発研究

加藤 守*

Study on exploitation of Iridium marking for red sea bream

Mamoru KATO*

Abstract

The effectiveness of Iridium marking for red sea bream was examined at Shizuokaken Fish Culture Center, 1979 to 1983. Food containing Iridium element was fed for 30 days to young red sea bream. Organs and tissues, such as scale, liver, dorsal spine, vertebra, otolith, somatic muscle and stomach were collected from those fish at certain periods. Iridium contents of those organs and tissues were detected and measured by activation analysis using an experimental nuclear reactor. High Iridium contents were detected in scales, liver and dorsal spines; the average contents were 0.1 to 0.3 ppm even at 1,481 days, while very low Iridium contents were seen in otolith and muscle ranging 0.03 to 0.05 ppm at 361 days. Iridium once accumulated in scale was hardly discharged to outside. Compared to Europium, Iridium intake and accumulation by red sea bream was larger and the existence could be traced longer. It was concluded that Iridium was effective element for marking to red sea bream.

要 約

1979～1983年に静岡県栽培漁業センターにおいて金属元素イリジウム（Ir）を餌にまぜマダイ幼魚に投与・飼育し、その標識元素としての有効性を検討した。Ir混合飼料（Ir濃度1,447 ppm）をマダイ幼魚（Ir投与終了時の平均尾叉長102 mm、体重24 g）に30日間投与した。その後一定間隔で標本魚を採集し、鱗、肝臓、背鰭の鰭条、脊椎骨、耳石、筋肉及び胃を採取した。日本原子力研究所の実験用原子炉を用い、放射化分析法によりこれらの器官・組織のIr含有量を測定した。鱗、肝臓及び背鰭の鰭条においてIrは高濃度の蓄積がみられ、Ir投与終了後361日目の標本で0.9～1.7 ppm及び1,484日でも0.1～0.3 ppmであったが、耳石及び筋肉では361日に0.03～0.05 ppmと非常に濃度は低かった。脊椎骨及び胃のIr濃度は361日に0.4～0.8 ppmを示した。鱗100枚当たりのIr重量はIr投与終了から200日前後までは大きく変動したが、その後の変動はほとんどなかったことから、鱗に一度蓄積したIrは体外に排出され難

1989年11月7日受理 遠洋水産研究所業績 第263号

* 遠洋水産研究所（National Research Institute of Far Seas Fisheries；7-1, Orido 5 chome, Shimizu-shi, SHIZUOKA, 424 JAPAN）

いことを示した。一方、耳石一对当たりのIr重量は時間の経過に伴い次第に減少し、耳石中のIrは代謝により体外へ排出されることを示した。本実験の結果をマダイに対する希土類元素Euの投与実験結果と比較すると、Irはマダイにきわめて蓄積し易いことを示した。Irはマダイに対し有効な標識元素であることが明らかとなった。

1. はじめに

希土類元素ヨーロッパウム (Eu) を標識元素として用いる「アクチバブル・トレーサー」法はさけ・ますに应用され、その有効性が証明された(加藤, 1985)。その特徴は(1)小型の幼稚魚に標識付けができ、しかも数年間にわたり標識の追跡ができる、(2)同時に大量(百万尾のオーダーで)の標識付けが容易にできる、(3)標識元素の検出には鱗を用いればよいので、大量処理ができる、(4)標識の脱落がない、(5)径口投与標識なので、標識付けに際し魚体に何等の損傷を与えない、(6)標識元素による魚の成長の停滞及び顕著な死亡等の生理的影響は全く認められない、等であった。

しかし、さけ・ますに対しては非常に有効であったヨーロッパウム (Eu) はマダイ体内においては蓄積量が少ないため長期間の標識としては有効性が低いこと、標識元素は複数が必要であること等の理由(加藤ほか, 1982:1983)により、新しい標識元素の開発が望まれていた。イリジウム (Ir) は希少金属元素であり、また、放射化分析上都合のよい特性をもっているが、生物体内におけるその挙動は全く不明であった。この研究ではイリジウム (Ir) の魚類の標識元素として有効性の解明を目的とした。

2. 標識元素投与と分析試料の作製

1979年8月13日から1983年10月まで静岡県栽培漁業センターでふ化後100日を経たマダイ稚魚300尾を同センターの海上網イケス(1.5m×1.5m×2m)において飼育を行った。実験開始時点の平均尾叉長、体重は80mm, 10.7gであった。実験開始より約6か月後にはより大型の網イケス(3m×3m×4.5m)に移し飼育を継続した。

イリジウム混合飼料はマダイ用粉末飼料に4塩化イリジウム (IrCl₄) を混合し、作製した。飼料重量当たりの平均イリジウム (Ir) 濃度は1,477ppm(標準偏差407ppm)であった。1日に2回、このIr混合飼料と魚肉(冷凍イカナゴ)を混ぜ、ミンチ状にしてマダイ稚魚に投与した。最初の20日間では投与飼料量はIr混合飼料と魚肉を合計して体重の4%とし、その後は少しずつ減少させ、投与終了時には2%とした。Ir混合飼料の投与は8月13日から9月12日までの31日間であった。この間の水温は26~28°Cであった9月13日より普通飼料(ペレット)に切り換え、1983年10月6日まで飼育を継続した。

標本魚の採集は次のように行った。

Ir混合飼料投与中: 1979年8月13日, 8月23日, 9月3日の3回各10尾。

Ir混合飼料投与終了後: 1979年9月13日(Ir投与終了後1日), 9月22日(同10日), 10月12日(同30日), 11月12日(同61日), 12月13日(同92日), 1980年3月18日(同187日), 9月8日(同361日), 1981年9月25日(同743日), 1982年10月7日(同1,120日)及び1983年10月6日(1,484日)に各10尾。

これらの標本魚は体長(尾叉長)、体重を測定した後、すぐに解剖を行った。

標本魚を解剖し、次の器官・組織を採取した。鱗、背鰭の鰭条、脊椎骨及び耳石は採取後そのまま実験室内で自然乾燥させた。肝臓、筋肉及び胃はホルマリンで固定した後、実験室内で自然乾燥させた。

乾燥させた器官・組織から全体（耳石）或いは一部（耳石以外）を取り、秤量後化学的な処理をすることなく、ポリエチレン袋にシーム封入した。各試料1個の重量はIr投与終了後半年以内では20～110 mg、それ以後では170～350 mgであった。試料重量の増加は器官・組織中のIr含有濃度の減少に合わせたものである。なお、秤量は0.1 mg単位で行った。ポリエチレン袋にシーム封入した試料には、試料番号を記入し、50～100個をまとめて、1本のポリエチレンカプセルに封入した。同時に、別のポリエチレンカプセルにはIr標準体（2 μg）1個を封入した。

試料入りポリエチレンカプセルは日本原子力研究所東海研究所（茨城県東海村）の実験用原子炉JRR-2号炉の炉心タンク内重水反射体領域の照射孔（熱中性子束最大 $5.4 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ）に気送管を用いて送り、熱中性子を20分間照射し、放射化した。

3. 照射試料の分析方法

熱中性子を照射した試料は農業環境技術研究所開放研究室（日本原子力研究所東海研究所内）の実験室に運搬し、冷却を行った。冷却期間は ^{192}Ir の半減期（74 d）を一応の目安とした。冷却を終わった試料をGe (Li) 半導体放射線検出器とマルチチャンネル・ガンマー線波高分析機を用い、核種の同定・定量を行った。1試料の測定時間は100秒(Live Time)であった。測定の目的核種はIrの放射性同位元素 ^{192}Ir とした。

^{192}Ir は $^{191}\text{Ir} (n, \gamma) ^{192}\text{Ir}$ 反応の結果生成される。その物理的性質を次に示す（日本アイソトープ協会、1976）。

a . ^{191}Ir の存在比	38.5%
b . ^{191}Ir の中性子捕獲断面積	700 ± 200 barn
c . ^{192}Ir の半減期	74.2 d
d . ^{192}Ir の γ 線エネルギーと放出割合	
γ 線エネルギー	放出割合
296 Kev	29%
308	30
316	81
468	49
589	4
604	9
612	6

存在比は同位元素核種の中で目的核種が含まれる割合を示す。 ^{191}Ir の存在比が39%とかなり高い。即ち、 ^{191}Ir の放射化により生ずる核種である ^{192}Ir の出現量も大きいことを示している。

中性子捕獲断面積は放射化される割合を示す。 ^{191}Ir のそれ（ 700 ± 200 barn）は比較的大きく、放射化され易いことを示している（加藤、1988）。

半減期は核種により物理的に決まっており、核種の同定にも利用される。海産魚の放射化分析を行うに際し、問題になることは妨害核種の存在である。海水には多量の塩化ナトリウムNaClが存在する。また、生物体には血液その他に多量のNaClが存在する。放射化により形成された ^{24}Na （半減期15 h）や ^{34}Cl （半減期40 m）は他の微量元素核種に対し妨害的に働く。また、鱗を形成する炭酸カルシウム $\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ やリン酸カルシウム $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$ 等のCaが放射化されて形成した $^{44\text{m}}\text{Sc}$ （半減期2.4 d）及びリンの放射

性同位元素³²P (14.3 d) も微量元素核種の検出に際し、妨害的に働く。

これらの妨害核種の影響を取り除くためには、試料をしばらく冷却し半減期の短い核種が減少するまで待つことである。このためには目的核種の半減期は長い程よいことになる。¹⁹²Irの半減期 74 dはこの点を十分満足している。

核種の同定に当たっては、 γ 線エネルギーと放出割合が指標となる。異なる核種でも同一或は近いエネルギーに光電ピークを持つことがあるので、核種の同定には複数の光電ピークによって行わなければならない。

¹⁹²Irは明瞭な光電ピークを7個以上持ち、同定し易い核種である。実験の同定に際しては、カプセルに封入しているIr標準体の光電ピークと対比することにより、固定をより確実にした。図1にはIrの標準体及び分析試料のガンマー線スペクトルを示す。

核種の定量においては、目的核種の γ 線エネルギーのうち最も明瞭な光電ピークを用いることが望ましい。しかし、生物体のように多くの核種が含まれている試料では理論的な意味での最も高い光電ピークを取ることは必ずしも適切ではない。例えば、¹⁵²Euでは122 KeVに最高の光電ピークが出現するが、沿岸の海水魚に存在する⁷⁵Se (121 KeVに光電ピークを持つ) 等の他の核種に妨害されることが多い。このため加藤 (1985) ではやや高エネルギー側に出現する344 KeVの光電ピークを定量の指標とした。

¹⁹²Irでは316 KeVに最高の光電ピークが出現し、しかも他の核種に妨害され難いので、この光電ピークをIr存在量の定量の指標とした。定量に際して同一カプセルで中性子照射を行った標準体 (Ir 2 μ g) と試料の γ 線数 (波高分析機では光電ピークの面積で表現する) を比較することにより計算した。波高分析機における光電ピークの内積にはいわゆるback ground (BG) 部分が含まれるため、この部分の内積を差し引いた真の内積 (NET AREA) を得る必要がある (図2)。

光電ピークのNET AREAを次の式で求めた。

$$\text{NET AREA} = \text{INTEGRAL} - \text{BG}$$

INTEGRALは指定したチャンネル巾 (N) における光電ピークの全面積 (図2の両斜線の部分)。Nは最大光電ピークを中心として両側に同数のチャンネルをとる。

BG (back ground) の面積 (図2の片斜線の部分) は次の式で求めた。

$$\text{BG} = \text{N}h$$

hは指定したチャンネル巾 (N) のうち両端 (図2のB₁及びB₂) 各4点計8点のチャンネルの平均ガンマー線数 (図2)。

試料のNET AREAをENA及び標準体のそれをSNAとすると、試料中の目的核種の重量 (W₁) は次の式で求めた。

$$W_1 = \text{ENA} / \text{SNA}$$

また、試料重量をW₂とすると、試料中の目的核種の濃度 (CONTENT) は次の式で求めた。

$$\text{CONTENT} = W_1 / W_2$$

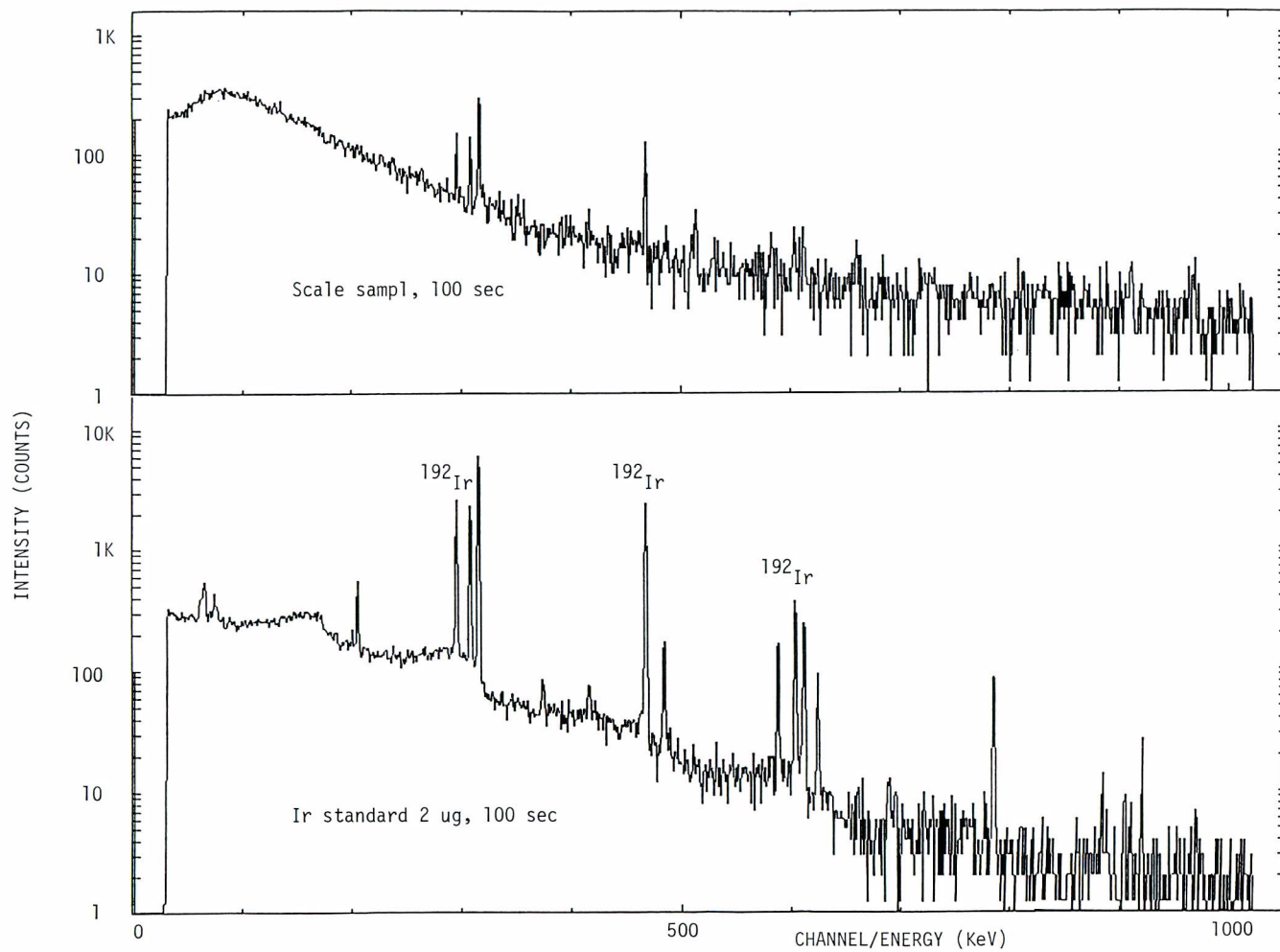


Fig. 1. Gammer-ray spectrometry of Ir standard and scale sample of red sea bream.

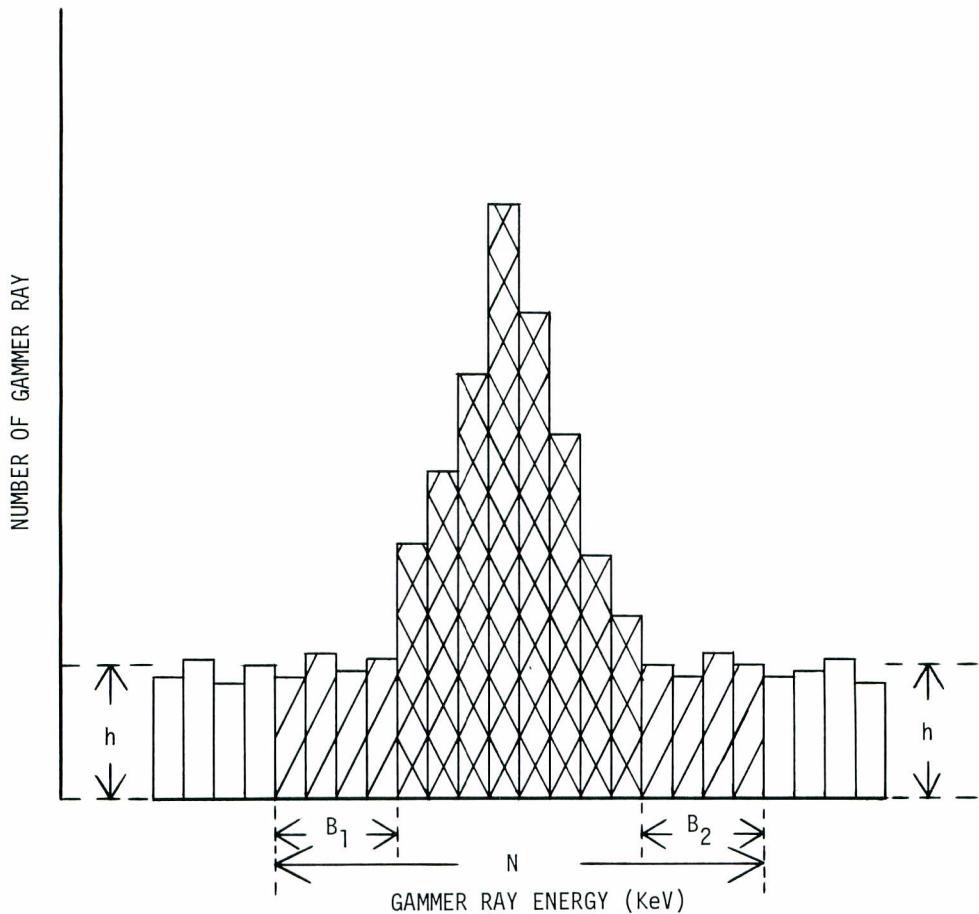


Fig. 2. Calculation of NET AREA of ^{192}Ir photopeak.

4. 飼育実験の経過

(1) Ir投与開始から投与終了後30日までの短期間の経過

Ir投与を開始した1979年8月13日からIr投与終了後30日を経た10月12日までのマダイ幼魚の成長及びその器官・組織におけるIr濃度の時間的变化は以下のとおりであった。

Ir投与開始時の平均尾叉長、体重80 mm, 11 gの幼魚は投与終了時に、102 mm, 24 g, また、投与終了後30日では115 mm, 35 gに達した(図3)。Ir投与開始時の体重を1とすると、投与終了時のそれは2.1, 投与終了後30日では3.2倍となり、特に成長の停滞はみられなかった。また、この間マダイ幼魚に目立った生理的变化や死亡がなく、Irがマダイ幼魚の生育を阻害した事実は認められなかった。

Ir投与後の各器官・組織におけるIr含有濃度(単位: ppm)の時間的变化は表1に示す。

Table 1. Ir contents and detective rate in organs and tissues of red sea bream, 1979-1983.

Organs and tissues	Sampling date										
	1979						1980		1981	1982	1983
	Sept. 13	Sept. 22	Oct. 2	Oct. 12	Nov. 12	Dec. 13	Mar. 18	Sept. 8	Sept. 25	Oct. 7	Oct. 6
	Days after end of Ir feeding										
	0	10	20	30	61	92	187	361	743	1,120	1,484
	Average Ir contents (ppm)										
Scale	22.40	9.40	8.05	7.58	6.17	4.60	4.20	1.25	0.36	0.23	0.17
Liver	72.84	25.21	27.18	31.26	10.81	5.23	4.36	1.68	0.53	0.53	0.34
Dorsal spine	14.36	6.68	7.65	5.62	4.68	3.60	3.42	0.93	0.23	0.15	0.13
Vertebra	8.51	4.02	4.75	4.60	2.68	2.07	1.42	0.42	0.09	0.09	0.00
Muscle	3.25	0.92	1.22	0.68	0.44	0.21	0.12	0.05	0.00	0.00	0.00
Otolith	1.03	0.33	0.32	0.28	0.17	0.13	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00
Stomach	98.27	7.31	5.64	5.95	2.52	2.33	2.24	0.79	0.00	/	/
	Detective rate (%) (more than 0.02 ppm in Ir contents)										
Scale	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Liver	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Dorsal spine	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90
Vertebra	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	0
Muscle	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0
Otolith	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0
Stomach	100	100	100	100	100	100	100	100	20	/	/

Number of samples : ten fish in each sampling date.

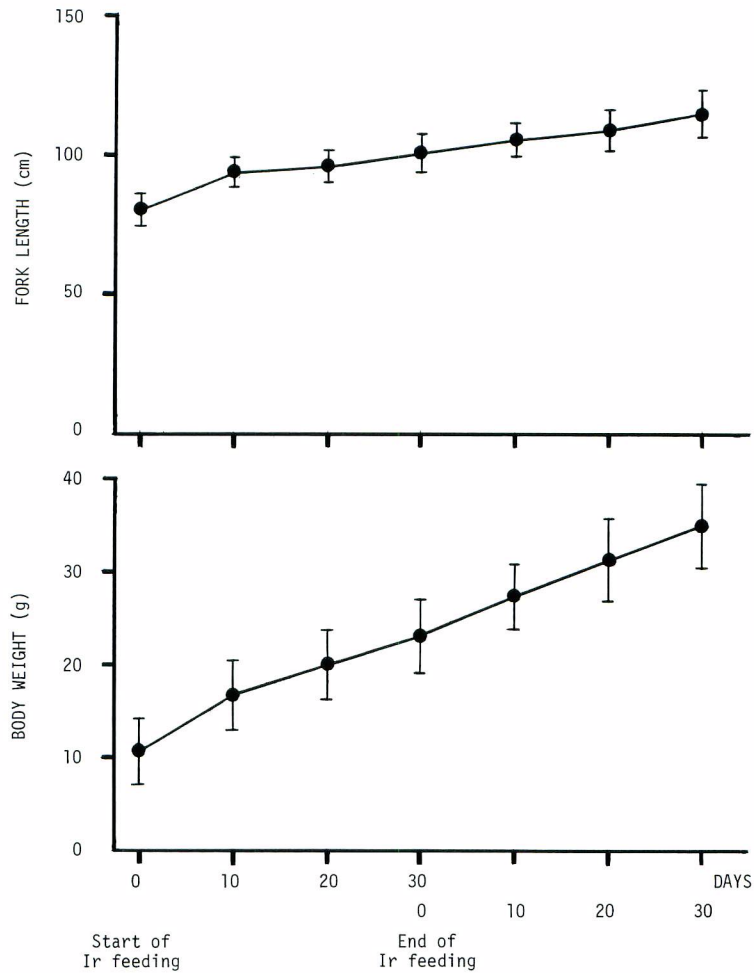


Fig. 3. Growth of fork length and body weight of red sea bream in and after Ir feeding, August to October 1979.
Black circle means average value and bar means standard deviation.

鱗：Ir投与開始後10日で6.1，30日で22.4と急激に増大した。Ir投与後10日で9.4，30日で7.6と漸減した。

肝臓：Ir投与後10日で50.1，30日で72.8と急激に増大した。Ir投与終了後10日で25.2に急激に減少したが，30日で31.3とやや増大した。

背鰭の鰭条：Ir投与開始後10日で4.2，30日で14.4と急激に増大した。Ir投与終了後10日で6.7，30日に5.6とゆっくりと減少した。

脊椎骨：Ir投与開始後10日で2.9，30日で8.5と急激に増大した。Ir投与終了後10日で4.7に減少し，30日で4.6とほとんど変化しなかった。

耳石：Ir投与開始後10日で0.3、30日で1.0とゆっくりと増大した。Ir投与終了後10日で0.3に減少し、30日で0.3と全く変化しなかった。

筋肉：Ir投与開始後10日で2.2、30日で3.2とゆっくり増大した。Ir投与終了後10日で0.9に減少し、30日で0.7とほとんど変化しなかった。

胃：Ir投与中の試料には未消化のIr混合試料が含まれているため、検討材料から除外した。Ir投与終了後10日で7.3、30日で6.0と大きな変化はなかった。

図4には10日毎のIr濃度の変化が示してあるため、各器官・組織のIr濃度はIr投与終了後10日で急に増大しているように見えるが、耳石以外の器官・組織ではIr投与終了後数日でかなり高くなっているものと考えられる。

肝臓はこの期間を通じてIr濃度は最も高く、25-70 ppmを示した。Ir投与終了後10日に25 ppmまで減少したIr濃度は、20日に28 ppm及び30日に31 ppmと再び増大した。この原因は他器官・組織に一度入ったIrを肝臓が再び吸収したためとみられる。Irは肝臓にはよく吸収され、高濃度で蓄積することが判明した。

鱗、背鰭の鰭条、脊椎骨及びIr投与終了以降の胃は肝臓についてIr濃度が高く、この期間3-20 ppmを示した。Ir投与終了後におけるこれら器官のIr濃度はゆるやかな減少傾向を示すが、大きくは変化しなかった。Irはこれらの器官に比較的多く蓄積することを示している。

耳石及び筋肉はこの期間を通じIr濃度が最も低く、0.2-3 ppmであった。Ir投与終了後のIr濃度は1 ppm以下に急激に減少した。Irはこれらの器官・組織に蓄積し難く、また、排出され易いことを示している。

Ir投与終了後30日までの短期間におけるマダイの器官・組織におけるIr濃度を同期間のEuのそれ(加藤, 1983)と比較すると、どの器官・組織においてもIr濃度がEu濃度を上回った。投与の際の条件(投与元素濃度や体サイズ)が若干異なるので、明確な比較はできないが、Irマダイ体内に蓄積し易いことを示すと推定される。

Irは軟組織である筋肉にはあまり蓄積しなかった。この原因は、筋肉のように代謝が激しい組織では物質が安定して存在し得ないことにあると考えられる。筋肉のような可食部分に標識元素が蓄積しにくいことは、魚類のような食品を対象とする上で使用上好都合である。

(2) Ir投与終了から実験終了までの長期間の経過

Ir投与終了時(1979年9月13日)から1984年10月までの約1,500日にわたるIr標識の経過は以下のとおりであった。

平均尾叉長・体重をみると(図5)、投与終了後30日で115 mm, 35 g, 60日で122 mm, 44 g, 92日で128 mm, 52 g, 187日で173 mm, 119 g, 361日で223 mm, 293 g, 743日で313 mm, 590 g, 1,120日で365 mm, 973 g及び1,484日で436 mm, 1,755 gであった。Ir投与終了日の平均体重(24 g)を1として、その後の成長割合をみると、30日で1.5、60日で1.8、92日で2.2、187日で5.0、361日で12.2、743日で24.6、1,120日で40.5及び1,484日で73であり、特に740日以降の成長が大きいのことを示した。全飼育期間中、約300尾のマダイのうち、標本魚を除いてわずか数尾が死亡したのみで、その他の魚では生理的障害は全く見られなかった。

各器官・組織におけるIr含有濃度(ppm)の時間的変化を表1に示す。促し、0.05 ppm以下の個体が50%以上の場合には平均値は計算しなかった。

鱗：Ir濃度はすべての個体において0.1 ppm以上であった。平均Ir濃度は投与終了後61日で6.2、187日で4.2、361日で1.3、743日で0.4、1,120日及び1,484日で0.2であった。

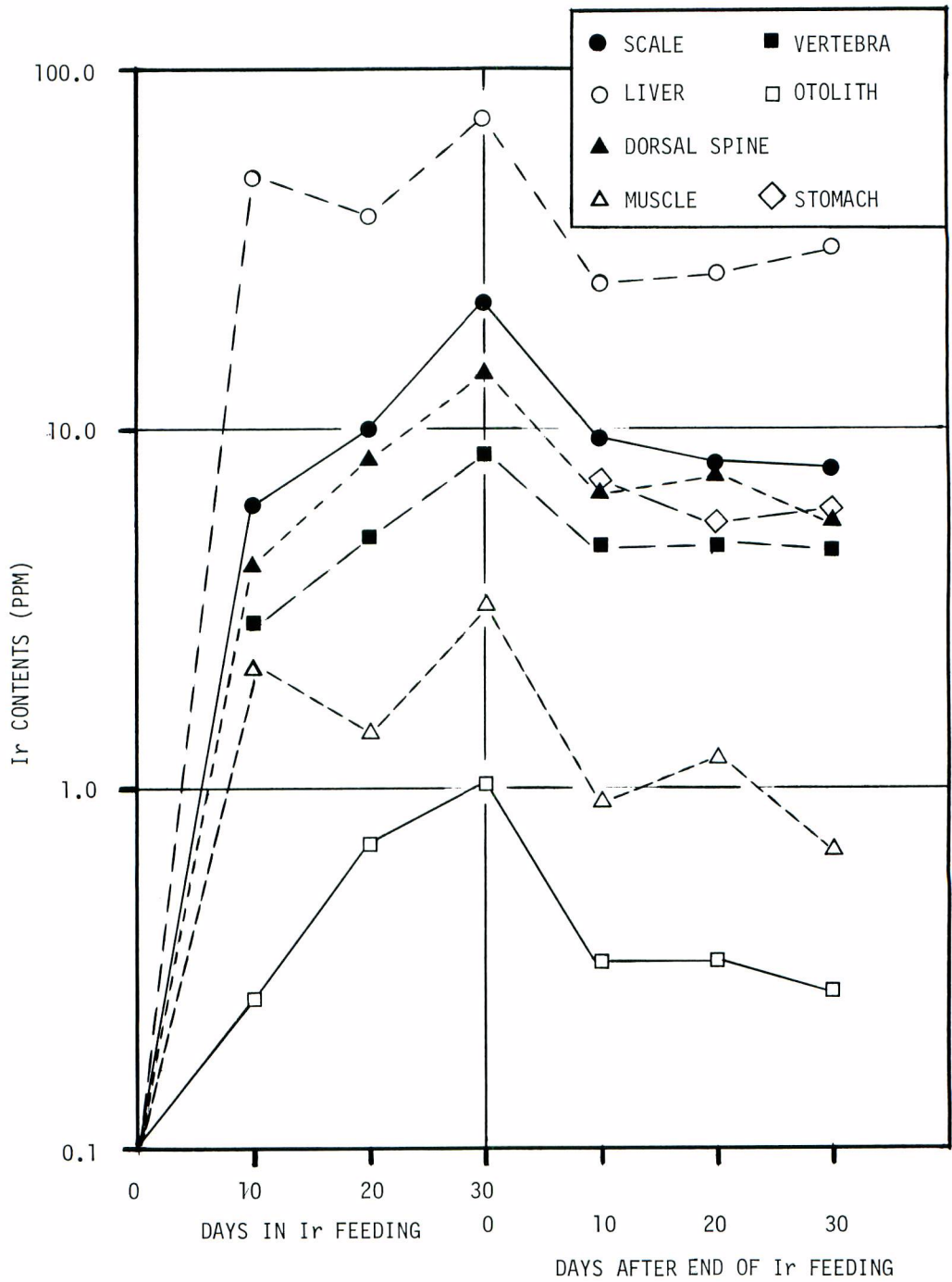


Fig. 4. Change in Ir contents in organs and tissues of red sea bream in and after Ir feeding, August to October in 1979.

Each plot is average value of 10 samples.

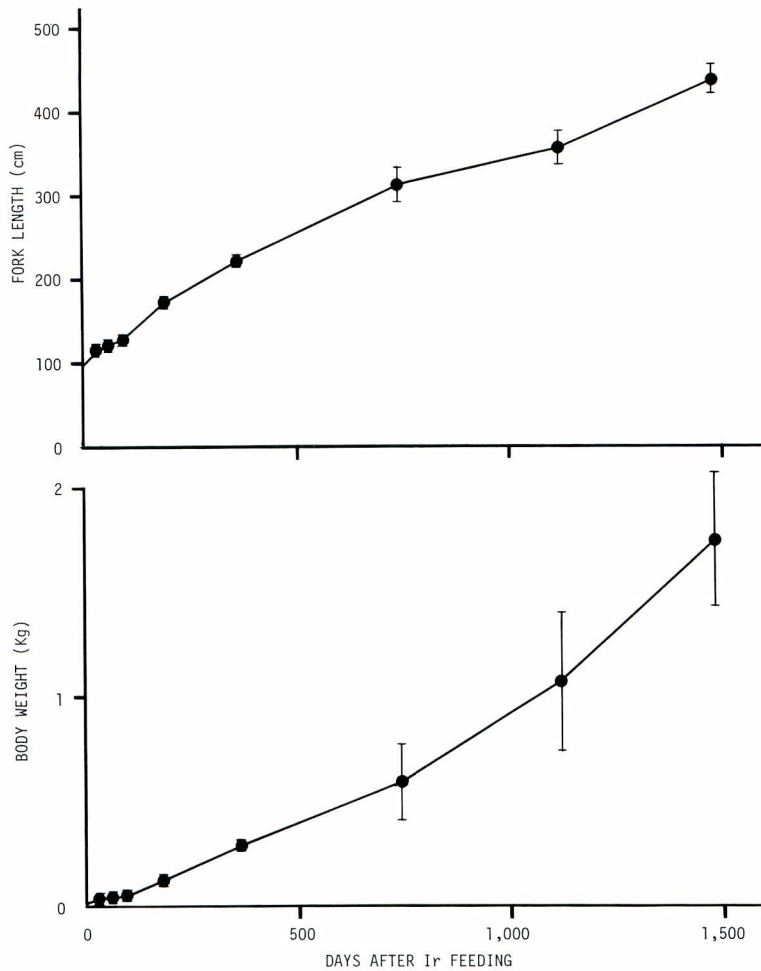


Fig. 5. Growth of fork length and body weight of red sea bream in days after end of Ir feeding, September 1979 to October 1983. Black circle means average value and bar means standard deviation.

肝臓：Ir濃度はすべての個体において0.05 ppm以上であった。平均Ir濃度は投与終了後61日で10.8, 187日で4.4, 361日で1.7, 743日と1,120日で0.5及び1,484日で0.3であった。

背鰭の鰭条：Ir濃度はすべての個体において0.05 ppm以上であった。平均Ir濃度は投与終了後61日で4.7, 187日で3.4, 361日で0.9, 743日で0.2, 1,120日及び1,484日で0.1であった。

脊椎骨：Ir濃度は投与終了後1,120日まではすべての個体で0.05 ppm以上であったが, 1,480日ではすべて0.04以下であった。平均Ir濃度は投与終了後61日で2.7, 187日で1.4, 361日で0.4, 743日及び1,120日で0.1であった。

筋肉：Ir濃度は投与終了後187日まではすべての個体で0.05 ppm以上, 740日以降ではすべて0.02以下であった。平均Ir濃度は投与終了後61日で0.4, 187日で0.1であった。

耳石：Ir濃度はIr投与終了後 361 日まではすべての個体で 0.03 ppm以上、740 日以降ではすべて 0.01 ppm以下であった。平均Ir濃度はIr投与終了後 61 日で 0.2、187 日で 0.1 であった。

胃：Ir濃度はIr投与終了後 361 日まではすべての個体で 0.2 ppm以上、740 日では 80%が 0.04 以下及び 1,120 日以降ではすべて 0.03 以下であった。平均Ir濃度は投与終了後 61 日で 2.5、187 日で 2.2 及び 361 日で 0.8 であった。

全期間を通じIr濃度は肝臓、鱗及び背鰭の鰭条で高く、平均値でも 0.1 ppm以上、個体別では 0.03 ppm以上であった。次いでIr濃度は脊椎骨で高く、投与終了後 1,120 日までの平均値は 0.01 ppm以上、個体別では 0.04 ppm以上であった。従ってこれらの器官では数年以上にわたりIr標識の追跡が可能であることを示した。一方、筋肉、胃及び耳石では 0.01 ppm以上の濃度は 1 年以内しかみられなかった。(図 6)。

Irが蓄積し易い器官・組織は硬組織の鱗、背鰭の鰭条、脊椎骨及び軟組織の肝臓であった。また、長期間にわたって蓄積する点からみると、鱗及び肝臓が最もすぐれた器官であった。実用的な点からみると、鱗は採取し易く、しかも採取に際し魚体を傷付けることが少ないため、生体魚からの採取でさえ可能であり、また商品価値も落とさずにすむこと、保存が容易であること、試料作製及び検体当たりの試料重量が小さくてすむ等の利点が多い。肝臓や脊椎骨は採取にあたり解剖しなければならず、実用性は劣る。

Ir標識はマダイにおいて投与終了後約 4 年間追跡することが出来た。この値はEu標識によりシロザケを約 3 年間追跡出来た記録を上回った。放射化分析のIr検出限界を 0.01 ppmとすると、マダイ鱗の最終Ir濃度は 0.2 ppmであったので、さらに 1 年以上の標識追跡が可能とみられる。

(3) 鱗及び耳石におけるIr重量の時間的变化

経口的に投与されたIrは、4 塩化イリジウムIrCl₄の形でマダイ消化官に吸収され、血液により各器官に運ばれる。Irの投与中では各器官のIr濃度 (Ir重量/試料重量) は急激に増加し、Ir投与終了後では一部の器官では短期的に増加する場合もあるが、大部分の器官・組織では次第に減少する。Ir投与終了後のIr濃度の変化の原因としては、①器官・組織からのIr排出による減少、②他器官・組織からのIrの移動による増加及び③器官・組織の成長に伴うIrの見かけ上の減少が考えられる。Ir濃度の変化は実際にはこれらの原因が複合した結果と見られる。

器官・組織における真のIr含有重量の変化を見るためには、③の原因を取り除く必要がある。鱗や耳石の場合では分析試料の単位を同一にしておけば、即ち鱗なら 100 枚、耳石なら 1 対のように、試料重量を無視して、真のIr含有重量の変化を知ることが出来る。

鱗 100 枚当たりの重量は、Ir投与終了直後の 25 mgから、30 日で 38 mg (Ir投与終了時の 1.5 倍)、61 日で 75 mg (3 倍)、92 日で 109 mg (4.4 倍)、187 日で 180 mg (7 倍)、361 日で 338 mg (14 倍)、743 日で 884 mg (35 倍)、1,120 日で 1,446 mg (58 倍) 及び 1,484 日で 3,253 mg (130 倍) に達した。

鱗 100 枚に含まれるIr重量は、Ir投与終了直後に 443 (10⁻⁶mg, 以下省略)、10 日で 392、20 日で 329 と漸減し、30 日で 343、61 日で 461 と再び増大し、92 日で 500 とピークに達した。その後、Ir重量は 187 日で 428、361 日で 424、743 日で 327 と漸減したが、1,120 日で 336 及び 1,484 日で 341 と大きな変化は示さなかった (図 7)。

Ir投与終了時から 30 日までのIr重量の急激な減少は鱗からIrが急速に排出されたため、また、30 日から 92 日までの鱗Ir重量の増大は、他の器官・組織に一度蓄積したIrが体外に排出する過程で鱗に再蓄積したことによると推定される。図 6 に示すように、胃や筋肉では投与終了と同時にIr含有濃度は急激に減少する。一方、肝臓や脊椎骨ではIr含有濃度は投与終了後 10~30 日では増加傾向を示し、その後次第に減少した。即ち、他の器官・組織 (筋肉、胃等) に入ったIrの一部が肝臓や脊椎骨に移行し、次いでこれらの器官から排出されたIrの一部が再び鱗に移行し、鱗のIr重量を増加させたと考えられる。

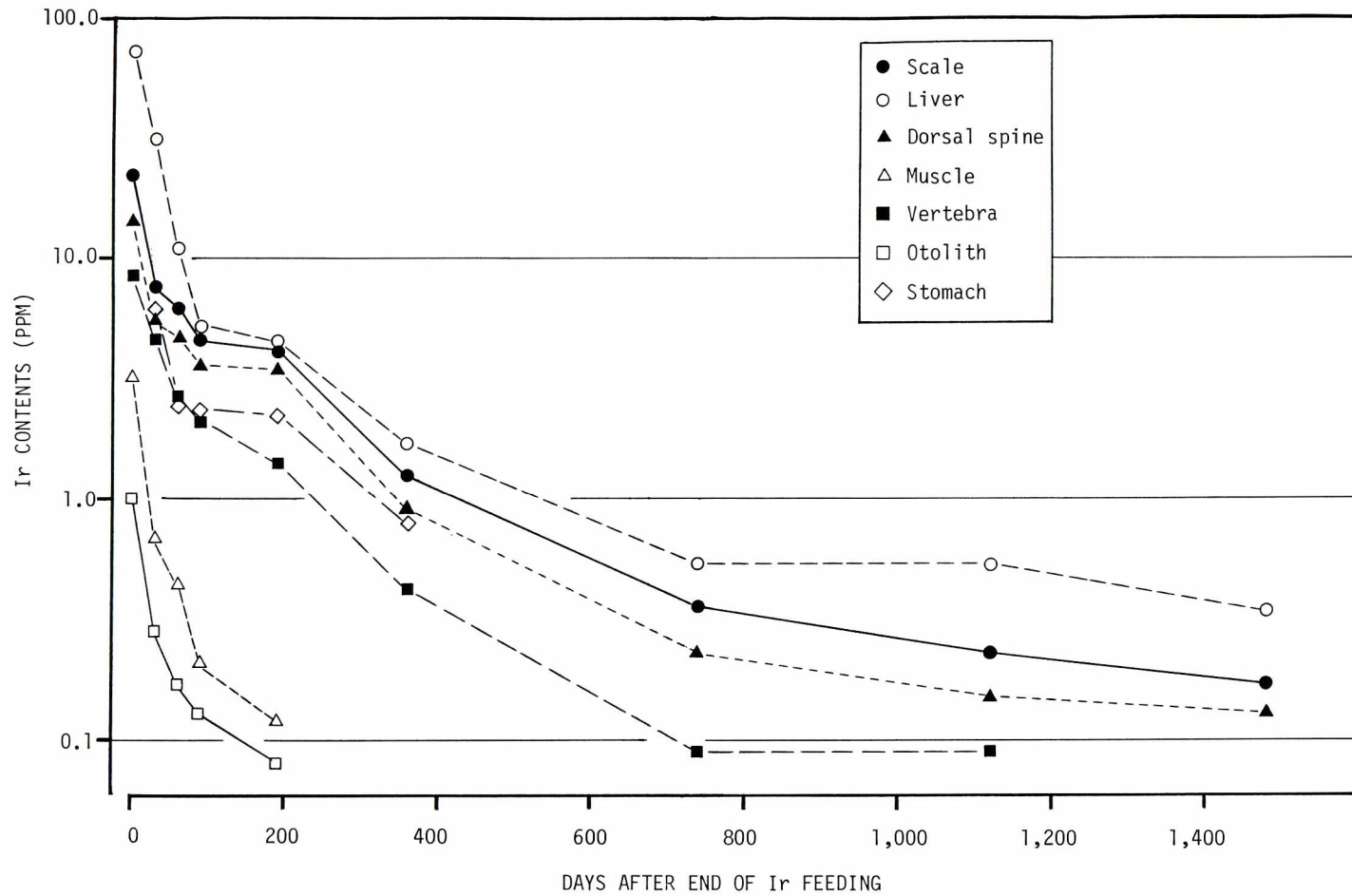


Fig. 6. Change of Ir contents in organs and tissues of red sea bream, September 1979 to October 1983. Each plot is average value of ten samples.

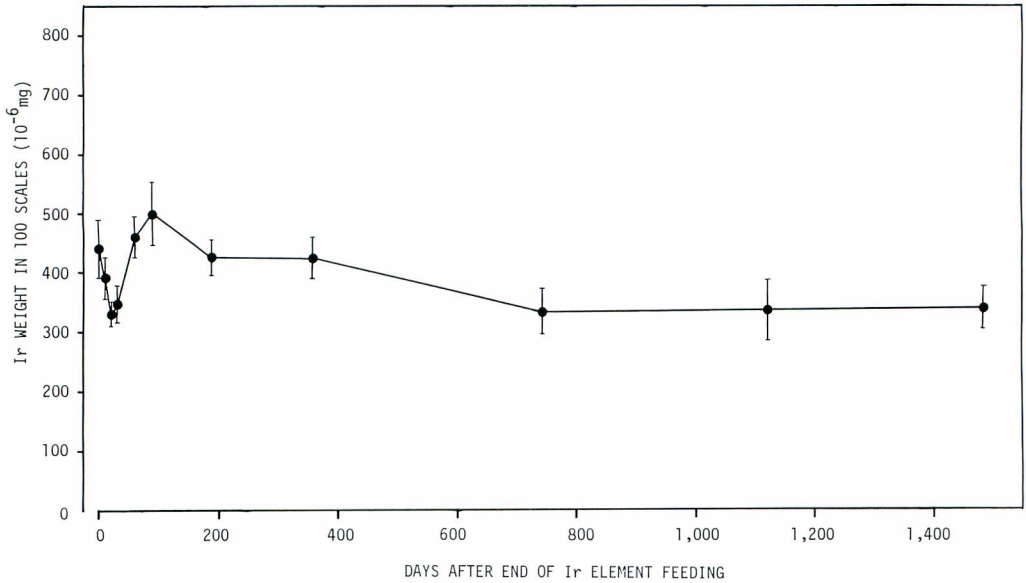


Fig. 7. Change of Ir weight in 100 scales of red sea bream.
Each plotted value represents mean \pm SE.

以上のように、全期間を通じ鱗 100 枚におけるIr重量は $300 \sim 500 \times 10^{-6}$ mg にあり、投与終了直後と大きな相異はなかった。このことは当初検出に十分な量のIrを鱗に蓄積させておけば、長期間にわたりIrの検出が可能であることを示している。

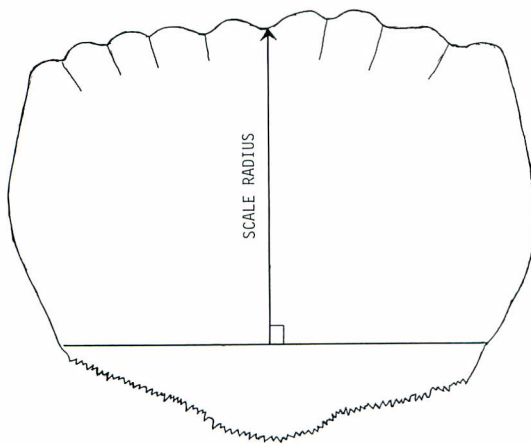


Fig. 8. Measurement of scale radius.

鱗内に蓄積したIrが鱗の生長と共に鱗内を移動するかどうか検討した。まず、鱗の生長を測定するため、鱗の長軸を図8に示すようにとり、鱗の焦点から末端までの距離（鱗径）を測定した。採集日別の平均鱗径を図9に示した。鱗径はIr投与開始時に 2.5 mm、30 日後に 3 mm、91 日に 3.7 mm と急激に生長した。その後生長は遅くなり、217 日で 4 mm となった。

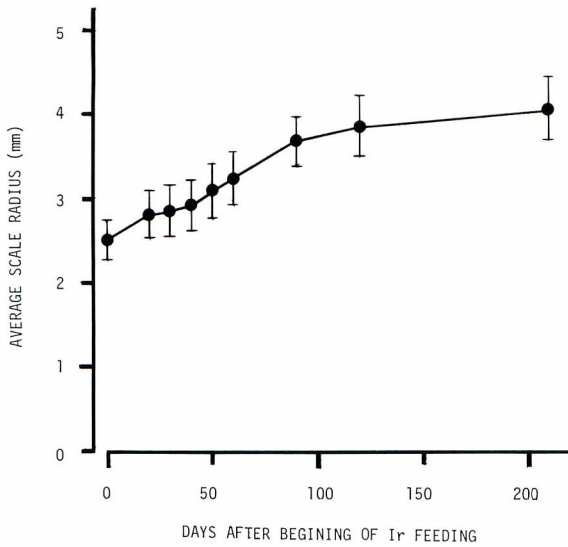


Fig. 9. Growth of scale radius of red sea bream in days after beginning of Ir feeding.

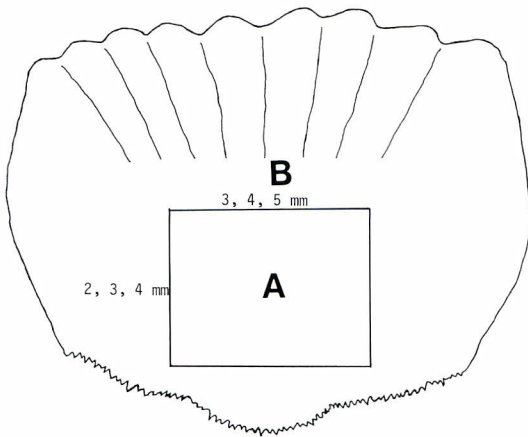


Fig. 10. Analysis of Ir contents in scale positions.

以上の結果から便宜的に投与直前の鱗径を 2 mm, Ir 投与終了時のそれを 3 mm, 他器官・組織から鱗への Ir の移行が終了した時点を 4 mm とみなした。図 10 に示すように鱗の中心部を A 部位(サイズ:(鱗径)×(鱗径+1 mm)の長方形), その外側を B 部位とした。1 個体から 10 枚の鱗を取り, A 及び B の含有量を分析した。分析結果を表 2 に示す。A のサイズ 2 mm×3 mm における A の Ir 重量は 0.01×10^{-3} mg に対し, 3 mm×4 mm では 0.13×10^{-3} mg 及び 4 mm×5 mm では 0.12×10^{-3} mg と大きく, 逆に B の Ir 重量はそれぞれ 0.13, 0.02 及び 0.00×10^{-3} mg であった。これは 2 mm×3 mm 以下では A に及び 4 mm×5 mm 以上では B に Ir が非常に少ないことを示す。このことから, 鱗中の Ir は図 11 に示すように分布するものと推定した。即ち, Ir はそれが投与された時期に形成された部位に蓄積し, 鱗が成長しても元の位置から移動しないと考えられる。

Table 2. Ir weight and contents in A and B areas of scales (Fig. 10) of red sea bream.

Size of A area	Sample weight (mg)		Ir weight (10^{-3} mg)		Ir contents (ppm)	
	A	B	A	B	A	B
2mm×3mm	13	305	0.01	0.13	0.83	0.43
3mm×4mm	72	230	0.13	0.02	1.81	0.09
4mm×5mm	108	215	0.12	0.00	0.58	0.00

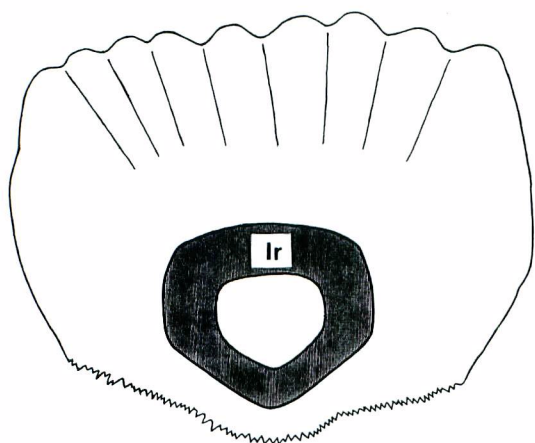


Fig. 11. Distribution pattern of Ir in scale of red sea bream.

次に耳石中のIr重量のマダイの成長にともなう変化を検討した。耳石1対の重量(10尾の平均重量)はIr投与終了時で23.0 mg, 30日で24.1 mg(Ir投与終了時の1.05倍), 61日で36.5 mg(1.6倍), 92日で40.9 mg(1.8倍), 187日で50.6 mg(2.2倍), 361日で109.6 mg(4.8倍), 743日で213.8 mg(9.3倍)及び1,120日で277.5 mg(12.1倍)と増加した。

Ir投与終了後における耳石のIr重量及びIr濃度の時間的変化を図12に示す。Ir重量はIr投与終了時の 22.4×10^{-3} mgから10日で10.0(当初の45%), 30日に7.8(35%)と急激に減少した。その後92日に

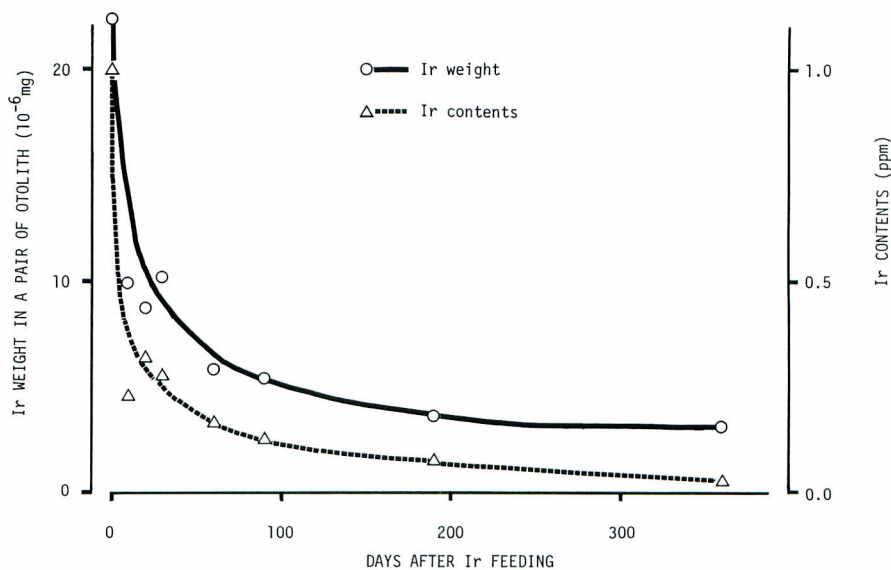


Fig. 12. Change of Ir weight and Ir contents in a pair of otolith of red sea bream. Each plot shows average value.

5.4 (24%), 187日に3.8 (17%)及び361日に3.1 (14%)とゆっくりと減少した。Ir濃度は投与終了時の1.03 ppmから10日に0.23 (当初の22%), 30日に0.28 (27%), 61日に0.17 (17%), 92日に0.13 (13%), 187日に0.08 (8%)及び361日に0.03 (3%)となり、Ir濃度と同様の減少傾向を示した。

耳石中のIrは時間の経過と共に減少した。鱗と異なり、耳石はその中心部分においても新陳代謝があり、一度蓄積したIrが時間の経過と共に次第に排出することを示した。

考 察

マダイに対するEu標識元素の投与・飼育実験(加藤, 1982; 1983)において, Euは鱗, 肝臓, 背鰭の鰭条及び脊椎骨で約1年間にわたり比較的高濃度で蓄積するのに対し, 筋肉や耳石では短期間しか蓄積しないという結果が得られた。今回の実験でもIrはマダイのそれぞれの器官・組織においてEuと同様の挙動を示した。同じ硬組織でも標識元素は鱗によく蓄積し, 背鰭の鰭条及び脊椎骨ではやや低く, 耳石には殆ど蓄積しなかった。また, 軟組織でも肝臓にはよく蓄積するが, 筋肉には蓄積しなかった。このことは各器官・組織により代謝機能が異なるためと考えられる。特に鱗は標識元素を蓄積するのみで, 排出を殆どしない器官であることを実験結果は示している。おそらく, 肝臓も同様の生理作用をもつと考えられる。肝臓の代謝機能は一般的には大きい, Irのような重金属は例外的に排出され難いことを示している。一方耳石は硬組織であるが, 代謝機能の点から見ると活動的な器官と見られる。

鱗, 肝臓及び背鰭の鰭条においてIr標識は約1,500日にわたり追跡がなされ, マダイに対し非常に有効な標識元素であることを示した。この結果を同じマダイに対するEuの投与飼育実験結果と比較してみた(表3)。標識元素投与時の体のサイズ及び投与元素濃度には大きな相異はなかった。しかし, 鱗における追跡可能期間はEuでは300~370日と短く, また標識元素濃度は元素投与後300~370日でEuは0.03~0.27 ppmに対しIrは1.25 ppmと非常に大きく, 1,480日でも0.17 ppmを示した。なぜこのように蓄積濃度に相違が生じたのであろうか。加藤(1985)によると, Euはシロザケによく蓄積し, 2年以上にわたり追跡が可能であった。Euの蓄積に関する両魚種の相違の原因として①魚種そのものによる生理学

Table 3. Feeding period of element, element contents in food, fork length at end of element feeding, maximum duration of element traced and element contents at last scale samples of red sea bream.

Element	Feeding period of element			Element Contents in food (ppm)	Fork length at end of element feeding		Element traced in scale		Remarks
	Year	Month and day	Number of days		Average (mm)	Range (mm)	Maximum duration (day)	Element contents (ppm)	
Eu	1978	Aug. 23-Sept. 22	31	1,861	94	81-106	300	0.03	Kato (1982)
Eu	1981	Aug. 26-Sept. 9	15	2,398	102	96-112	370	0.27	Kato (1983)
Ir	1979	Aug. 13-Sept. 12	31	1,374	90	82-104	(360) 1,480	(1.25) 0.17	Present study

的な相違及び②Eu投与時の環境条件の相違、即ち、シロザケでは淡水、マダイでは海水であったことが考えられる。

①については、表3に示すように、ほぼ同じ元素投与条件下におけるマダイの器官・組織のIr及びEuの濃度は大きく異なった。これはEuがマダイに蓄積されにくいことを示す。また、ヒラメに対する希土類元素テルビウムTbの投与実験(投与Tb濃度2,000 ppm)(加藤ほか, 1987)によると、Tb投与終了後は120日の鱗、肝臓、背鰭の鰭条及び脊椎骨のTb濃度は1.0~1.2 ppmであり、これらの値はマダイのEu投与実験結果(0.2~1.0 ppm)と大きな相違はなかった。しかし、筋肉、胃及び耳石のTb濃度は0.3~3.1 ppmと鱗等より高く、マダイのEu投与実験結果(検出皆無)と大きく異なった。(表4)。Tbの化学的性質はEuとほぼ同じと見られるから、筋肉等の器官・組織のTbとEu濃度の相違は元素の相違によると推定できるかも知れない。シロザケ、マダイ及びヒラメは進化の段階や生態が異なるので、魚種により標識元素に対する消化、吸収、蓄積、排出等の生理作用が異なることは十分考えられる。

Table 4. Element contents of red sea bream and flounder in 120 days after elements feeding.

Organs and tissues	Eu*(red sea bream)	Tb**(flounder, Paralichthys olivaceus)
Scale	0.8 ppm	1.2 ppm
Liver	0.2	1.2
Dorsal spine	0.9	1.0
Vertebra	1.0	1.2
Muscle	0.0	0.3
Otolith	0.0	2.9
Stomach	0.0	5.4

* Kato et al. (1983)

** Kato et al. (1987)

②については、投与したEuの化合物EuCl₃は水に対し酸性でよく溶解し、アルカリ性で凝固する性質がある。Irの化合物IrCl₄はどのPH条件でも水によく溶解する。海水は弱アルカリ性なので、Euはあまりよく溶けない点でIrと相違が見られる。しかし、ペレット中の標識元素が直接海水に触れる割合は少ないこと、胃液は強酸性でむしろEuCl₃の水に対する溶解度は活発化すること等から見て、標識元素の水に対する溶解性の相違だけでは標識元素の魚体内蓄積濃度が大きく異なることは説明出来ない。

本研究では、標識元素Irのマダイ体内への吸収され易さ、器官・組織における蓄積濃度及び標識としての有効期間を知ることを目的としたため、比較的大型の幼魚に対し比較的高い標識元素濃度のIr混合飼料を長期間投与した。この結果、Irはマダイに対し非常に有効な標識元素であることが判明した。今後の研究課題として、実際の種苗放流に供されているサイズの小型種苗にこの標識元素を投与し、標識としての有効性を確かめる必要がある。より小型の種苗にIrを投与する場合には本実験ほど高濃度のIr標識の蓄積は期待出来ず、従って標識追跡期間が4~5年間より若干短くなるかも知れないが、幼魚時代の追跡には十分有効と見られる。

マダイの栽培漁業は種苗生産に関しては画期的な成果をおさめているが、今後はこの種苗放流がどの程度収獲を増大させることが出来るかを実証する必要にせまられている。マダイは1～2年間を沿岸の浅海域で生活し、その後沖合に移動し4～5年で成熟する(畔田, 1981)。人工種苗放流において種苗がどの程度生残り、再生産に寄与出来るかを知ることが必要である。この栽培漁業の評価に際して幼稚魚の標識放流が重要な手段となる。この点アクチバブル・トレーサー法はすぐれた特性を有しており、新しく開発された標識元素Irはその効果判定に大きな役割を果たすものと考えられる。

謝 辞

この報告を作るに当たり、遠洋水産研究所北洋資源部長吉田主基博士に御校閲をお願いした。また、マダイの飼育に協力をいただいた静岡県水産試験場栽培漁業センター大滝高明氏(現在静岡県衛生環境センター主幹)に厚く御礼申し上げる。

文 献

- 畔田正格 1981: 全生活史を通じてみた資源培養に関する諸問題。In: マダイの資源培養に関する検討報告書, 25-30, 九州水産振興開発協議会。
- 加藤 守・渋谷政夫・結田康一・大滝高明・増村和彦 1982: 魚類に対するアクチバブル・トレーサーの応用技術の開発研究(4)。昭和56年度原子力成果, 9 pp., 遠洋水研。
- 加藤 守・結田康一・大滝高明・増村和彦 1983: 魚類に対するアクチバブル・トレーサーの応用技術の開発研究(5)。昭和57年度原子力成果, 6 pp., 遠洋水研。
- 加藤 守 1985: シロザケに対するヨーロッパ標識技術に関する最近の知見。サケ・マス増養殖の強化。In: 1982年UJNR水産増養殖専門部会第11回日米合同合議シンポジウム, 漁政叢書15, 55-70。
- 加藤 守・興石裕一・吉田範秋 1987: 底魚類に対するアクチバブル・トレーサーの応用技術の開発(4)。In: 昭和61年度国立機関原子力成果報, (27-107), 1-5, 科学技術庁。
- 加藤 守 1988: 底魚類に対するアクチバブル・トレーサーの応用技術の開発研究(5)。In: 昭和62年度国立機関原子力成果報, (28-99), 1-5, 科学技術庁。
- 日本アイソトープ協会 1976: アイソトープ便覧。1006 pp., 東京。