

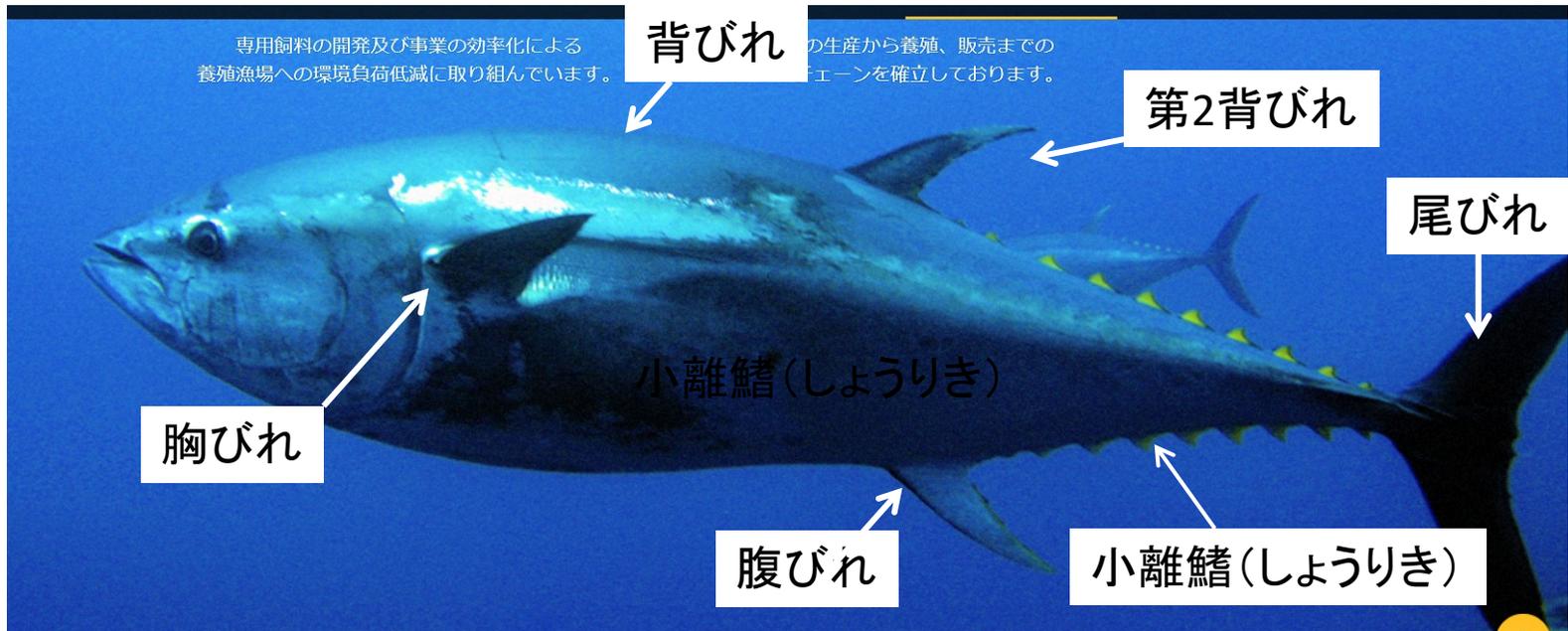
易しい科学の話
2019・1・16

近畿大学が成功したクロマグロの 完全養殖とマグロの知られざる特徴

吉岡 芳夫

内容

- マグロの種類と特徴
- マグロの生活史
- 食べ物としてのマグロ
- 畜養と養殖
- 養育のむつかしさ
- 完全養育までの困難な道のり
- 完全養殖を成し遂げた人たち



高速遊泳のため、遊泳中は背びれは体に収納
えらは小さく、口を開けて水を吸い込み 酸素を取り込む。
口に入った水は、えらから出ていく

高速遊泳中は、この背びれが隠れてしまう。



この尾びれも隠れる



マグロの生態や驚くべき機能

- マグロが泳ぐスピードは、時速80～100kmぐらいです。
- これは外敵から逃れる時や餌を捕捉する時などの最高スピードです。空中に飛び上がるのもこのためです。
- 普段は20～30kmぐらいの速度で、大海原を回遊します。マグロは外洋で直線的に泳ぐことから、普段は背鰭（せびれ）、腹鰭（はらびれ）の使用は少なく、体の窪みに折り畳んで格納されています。
- 格納可能な鰭なので、泳ぎにブレーキを掛けたり方向を変える時に、この2つの鰭をパッと広げて水の抵抗を増やし制御するのです。

マグロの生態や驚くべき機能（2）

- 尾鰭（おびれ）は三日月形をしており、振るのに大きな力を使わなくてもよく、長距離を疲れず、泳ぐのに都合がよいのです。
- また胴体の後ろの細くなった上下には、いくつのも小離鰭（しょうりき）と呼ばれるギザギザ鰭が付いています。これで水流の乱れを防いでいます。

マグロの生態や驚くべき機能（3）

- マグロは外洋を回遊するので、大きな鱗は泳ぐ邪魔になってしまいます。外洋では体が物に当たることは全く想定していないため、鱗が退化したと思われる。マグロは、非常に肌が弱く繊細です。
- 常に泳いでいなければならないマグロは、眠るのでしょうか？外洋での生態は、分からないことが多いようです。しかし葛西臨海水族園は、夜になると水槽にうっすらと常夜灯を付けます。すると時速数km以下でゆっくり泳ぐ始め、恐らくその時が睡眠ではないとされています。

マグロの生態や驚くべき機能（４）

- マグロは、常に泳ぎ続けなければ呼吸ができません。
- そのため、少し口を開けて泳ぎます。そうすることによって、常に口から鰓に新鮮な海水が流れ込み、鰓の内側から水を排出します。
- すなわち、鰓を動かさなくても、呼吸ができるのです。一生泳ぎ続けなければならない、回遊魚が得た機能です。
- 泳いでいる最中は、両脇にある胸鰭（むなびれ）が左右に水平に開きます。顔のほうから見ると、さながら高性能なジェット戦闘機のようなようです。
- 胸鰭は、まさしく飛行機の両翼と同じで揚力を担当しています。マグロは筋肉質で高密度なので比重が重く、揚力を与えないと沈んでしまいます。

マグロの生態や驚くべき機能（5）

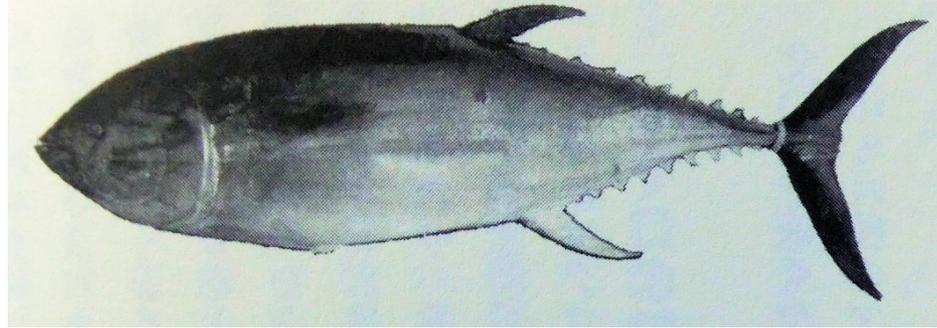
- 瞬発力を発揮する普通筋は、反面、乳酸が蓄積して疲労しやすい短所があります。マグロは、ある程度の高スピードを維持しながら、白身の魚より長い時間疲れずに泳げるのは、普通筋も赤身であるのが大きな特徴です。
- 赤身はミオグロビンとミトコンドリアという呼吸に関係する成分をふんだんに含んでいます。そのためマグロは、水中の酸素を大量かつ効率的にエネルギーに変えて、長時間泳ぎ続けることが可能となるのです

マグロの生態や驚くべき機能（6）

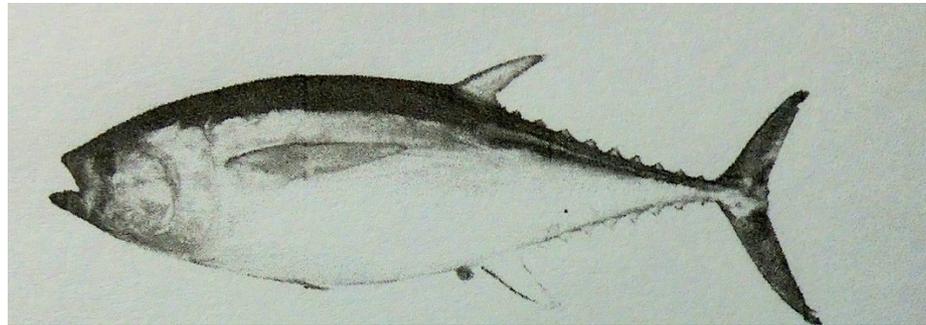
- さらには、マグロは熱交換システムが非常に発達しています。この場合の熱交換システムとは、酸素を取り込んだ冷たい血液を常に温める仕組みのことです。
- 血液が温かくなれば筋肉も温かくなり、結果として常に泳ぎ続ける巡航が可能なのです。このようにマグロは他の魚に比べ、異色の持ち主です。それも、“魚の王様”と言われる所以（ゆえん）ではないでしょうか。やはりマグロは、体形・肉質・呼吸法・酸素の利用方法など、外洋で生活することに特化した魚と言えます。

マグロの種類

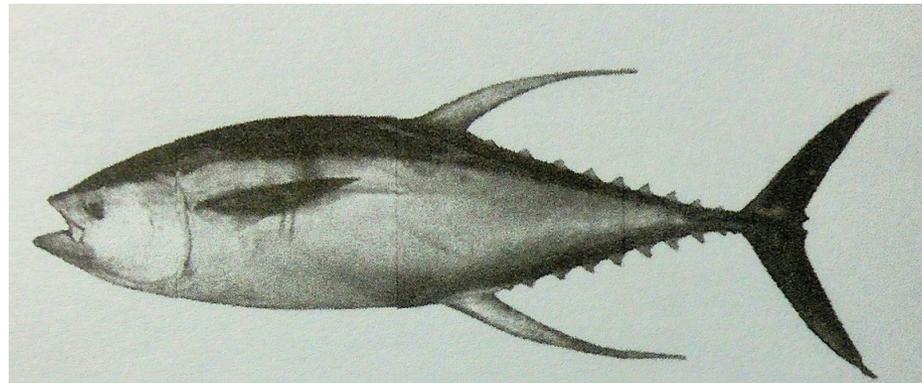
- クロマグロ



- ミナミマグロ



- キハダ・メバチ
(熱帯性マグロ)



bluefin tuna *Thunnus thynnus*

分布域
産卵場

図 1-2 クロマグロの分布図

Southern bluefin tuna *Thunnus maccoyii*

分布域
産卵場

図 1-4 ミナミマグロの分布図

Yellowfin tuna *Thunnus albacares*

分布域
産卵場

図 1-6 キハダの分布図

マグロの追跡方法

- 標識漂流
 - プラスチック製のタグをつけて放流。漁業で捕まった位置から判断する。
- 人工衛星を使った追跡
 - 水面に出る魚でないとダメ
- 電子標識(タグ)を使った方法
 - 内部にICメモリーをつけておく。水温、圧力、照度などが分かる。回収が難しい。
- ホップアップタグ
 - 浮力を付けたICタグを一定時間後切り離す方法。

食べ物としてのマグロ

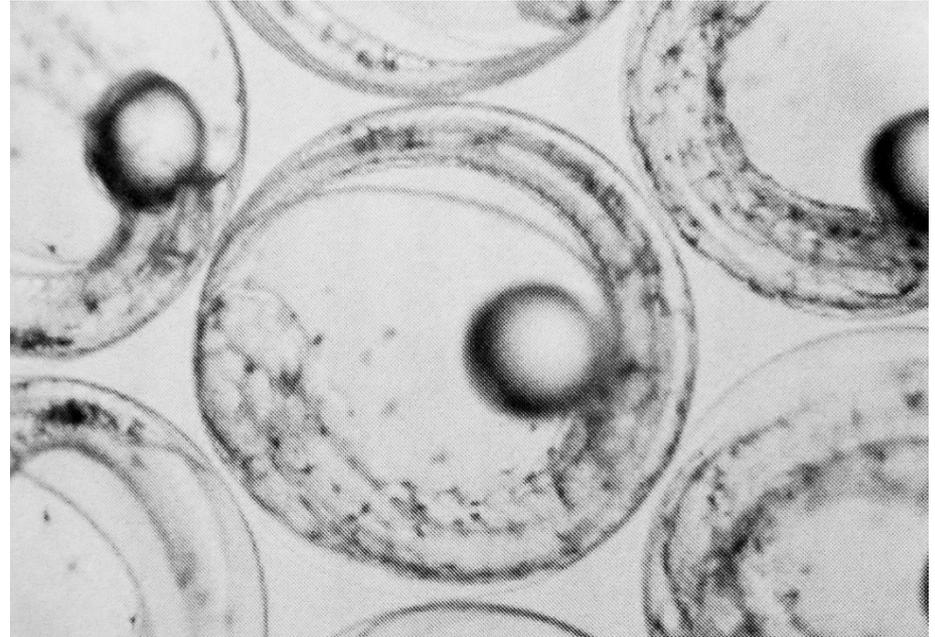
- 赤身は高蛋白、低カロリー
 - 高血圧や、脳卒中予防に効く
- 脂質
 - 中性脂肪、悪玉コレステロールを減らす効果脳の老化予防。記憶力向上、ボケ予防の効果
- ビタミン
 - ビタミンB, D, Eがある。血行を良くする。赤身は貧血の予防効果も。
- 心筋梗塞、脳こうそくの予防効果
- 情緒安定効果も。

クロマグロの生活史

- 沖縄の南、南西諸島、台湾の沖合の暖かい海が、産卵場。
- 三月から五月にかけて、親魚が海の表面に集まり、メスが数百万粒の卵（直径1 mm）を放出、オスが同時に精子をかけて受精卵を作る。
- 受精卵は、24時間でふ化。ふ化仔魚は3 mm。
- 稚魚は成長に従い自力遊泳を始め群れを作る。
- 夏には15～20 cmになり、九州、四国沖に来遊する。さらに成長しながら本州南岸、日本海沿岸と生息域を広げる。マグロの幼魚は、メジあるいはヨコアと呼ばれる。
- 秋から冬に日本各地で漁獲される。
- 翌年は50 cmに、生育領域は、太平洋やアメリカ、メキシコ沿岸にまで広がる。

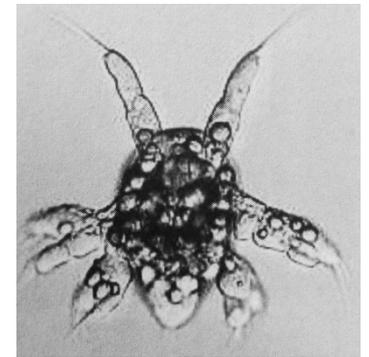
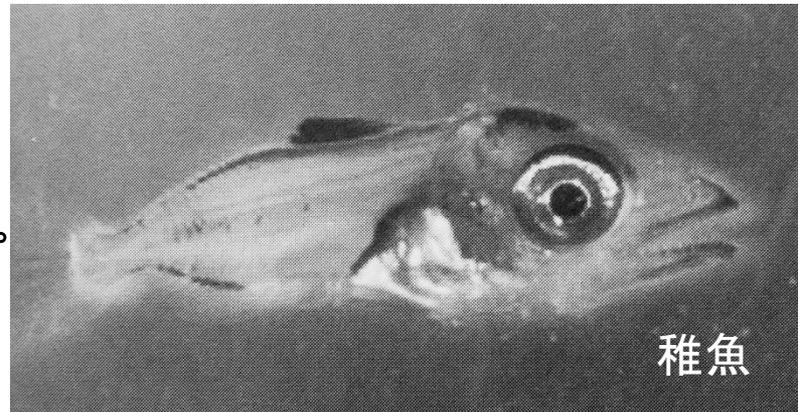
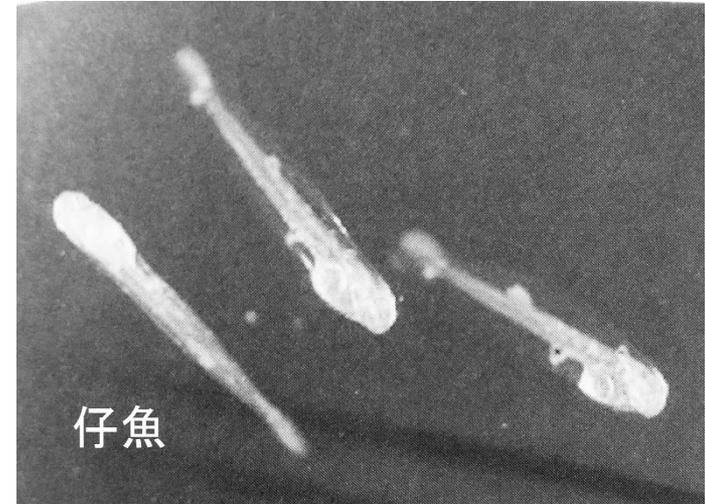
マグロの卵

- メスの卵巣の中の卵子の数は、200kgのマグロで、1600万粒。
- 産卵時には、ばらばらになった卵が水中に浮遊する。
- 中にキラキラ輝く油の玉が入っている。卵を浮かせる役割を持つ。



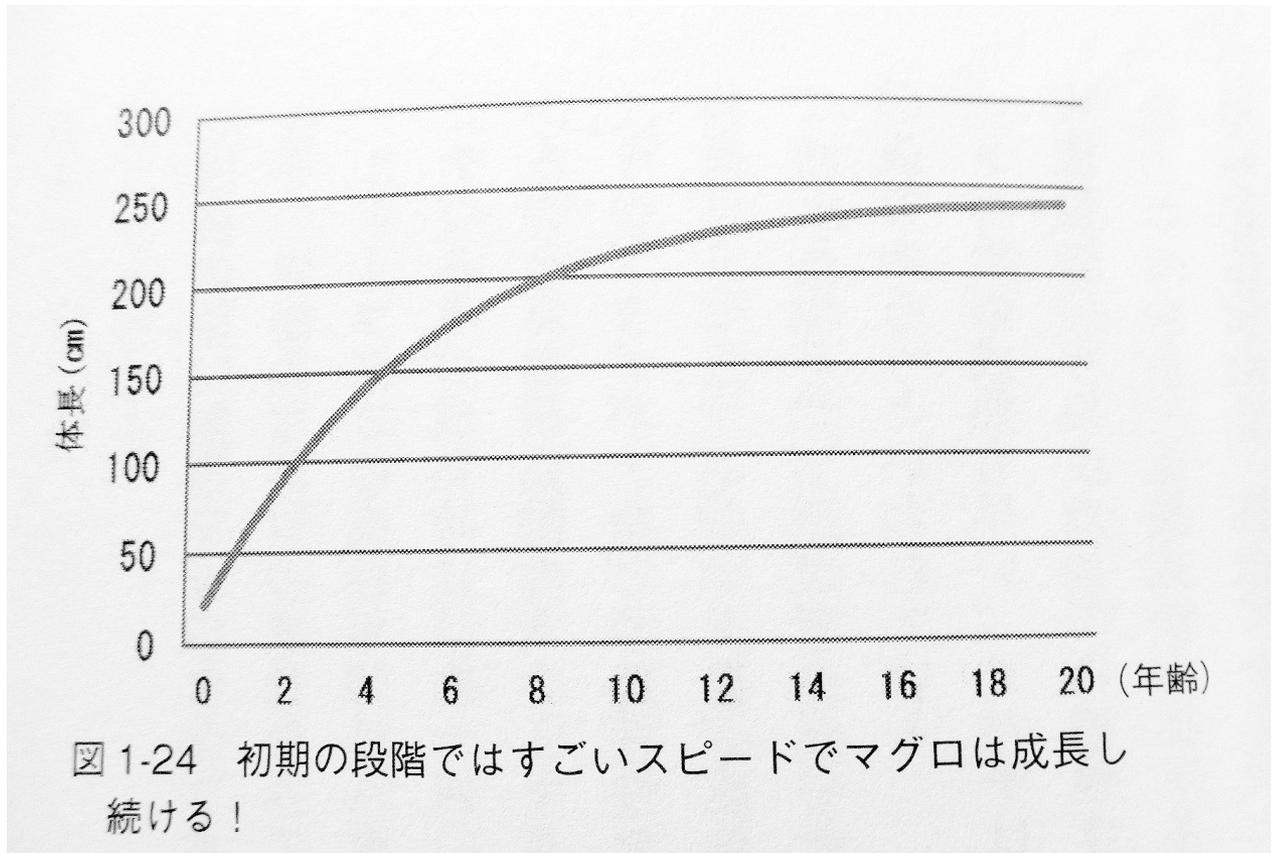
心化後の仔魚、稚魚

- 仔魚、稚魚の死亡率が高い。
- 仔魚は5mm以下で、自力で遊泳できない魚
- おなかに卵黄嚢という栄養分の塊を持ち、この栄養を使って成長し、自力で泳げるようになる。
- その後の栄養は、プランクトンを食べてとる。
- 稚魚は、数cmの成魚と同じ形になる魚。頭が大きい。
- わずかな水温変化、渦の発生などで大量の仔魚、稚魚が死亡する。他の魚に食べられることも多い。
- 初期減耗という。



コペポータ
「プランクトン」

マグロの成長速度



4か月で、30cm。1年後には 5cm。2歳で1m。13歳で2.5m
寿命は、太平洋では10歳以上。大西洋では 25～30歳。

クロマグロの養殖には 畜養と完全養殖の2種類がある

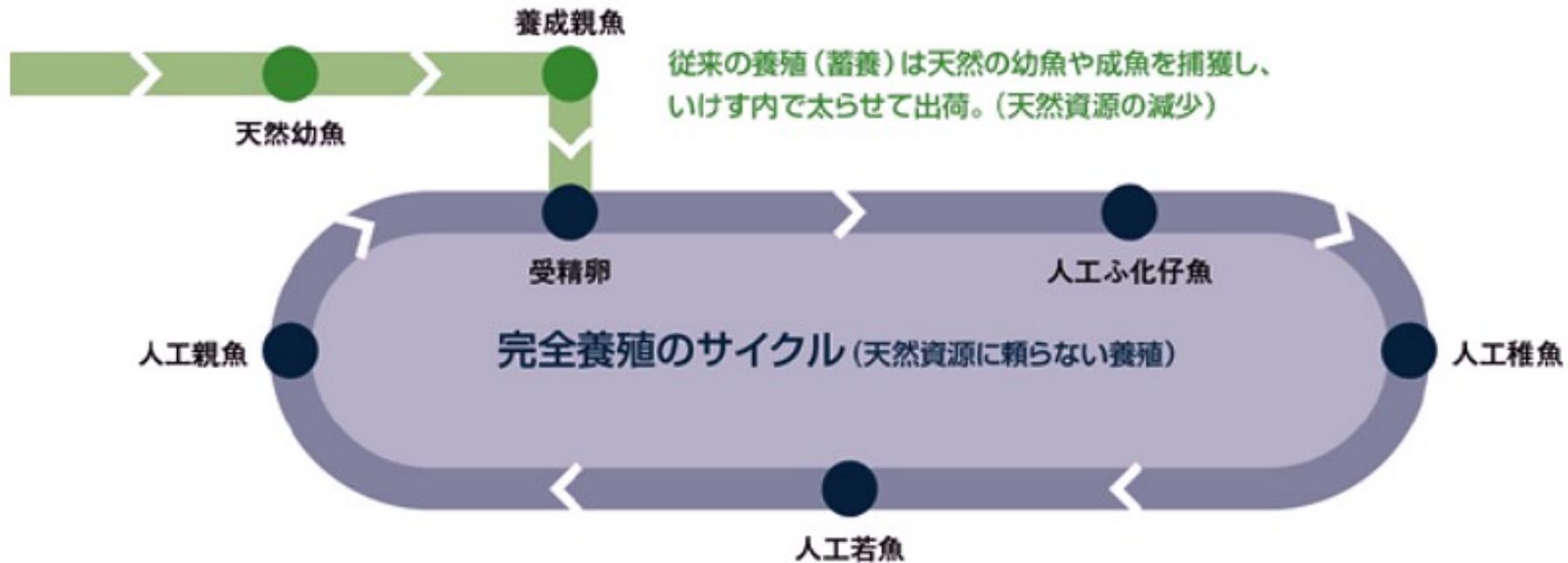
• 畜養

- 現在販売されている養殖マグロと表示されているもののほとんどは、完全養殖ではなく、蓄養（ちくよう）という方法で養殖されているものです。
- 蓄養は、海で引縄または一本釣りで獲った全長20～30cm、体重100～500g程度のマグロの幼魚を生け簀（いけす）の中で2～3年飼育して成長させ、脂の乗った状態で出荷する方法です。
- このように養殖されたマグロは餌を豊富に与えられるため、天然のものより倍近い成長速度で成魚になり、品質がそろっていて計画的に出荷することができます。
- 日本国内でも行われていますが、海外では地中海、メキシコ、豪州などで行われており、日本へも輸入されています。

完全養殖

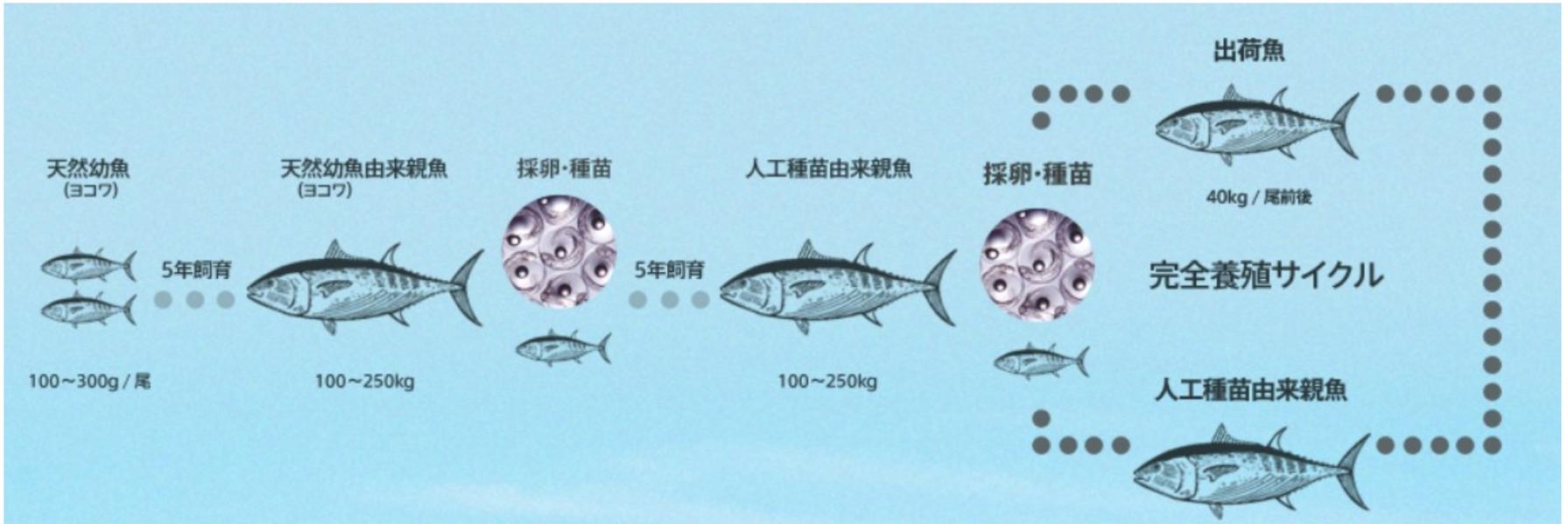
- 近畿大学水産研究所で行われているのは完全養殖です。
- 完全養殖とは海で採った天然マグロを飼育し、この親魚が産卵し、人工ふ化で育った親魚が産んだ卵を再びふ化させることを言います。
- 既にマグロ以外のほとんどの魚では完全養殖に成功していましたが、マグロだけは成功していませんでした。

完全養殖とは？



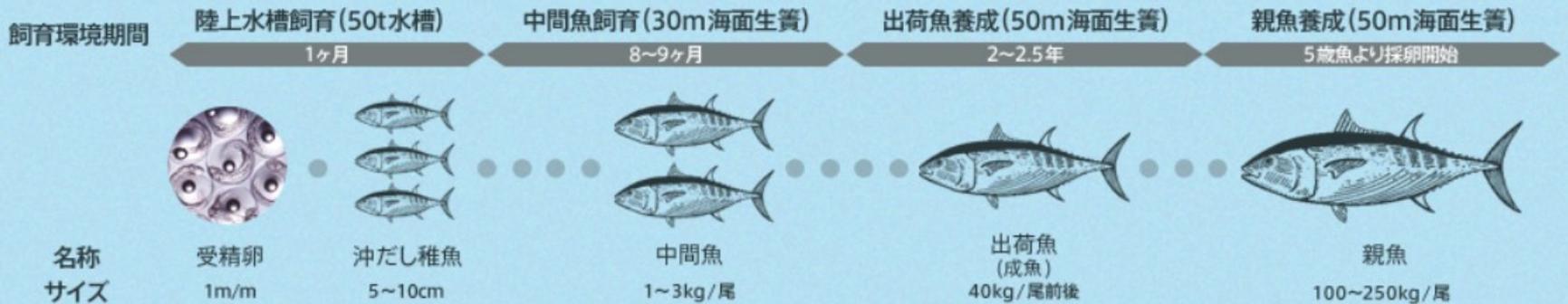
完全養殖することの意味

- クロマグロは今太平洋北部において、深刻な資源危機にさらされている
- 日本は全世界のクロマグロの90%を消費している消費大国、資源が枯渇するなら、養殖すれば解決するのではと考えるかもしれません。
- しかし、畜養も養殖ですが、飼育するマグロを海から獲って来るので、マグロ漁と同じく天然資源を利用しているため、マグロ資源保護の解決策にはならないのです。
- そこで完全養殖が望まれるのです。
- 完全養殖は先に記載したように人工ふ化で育った親魚が産んだ卵を再びふ化させるため、天然のマグロ資源を使うことがありません。



飼料体系の確立を目指しています。

人工種苗による養殖システム



A : 心化直後 (全長 2.8 mm)

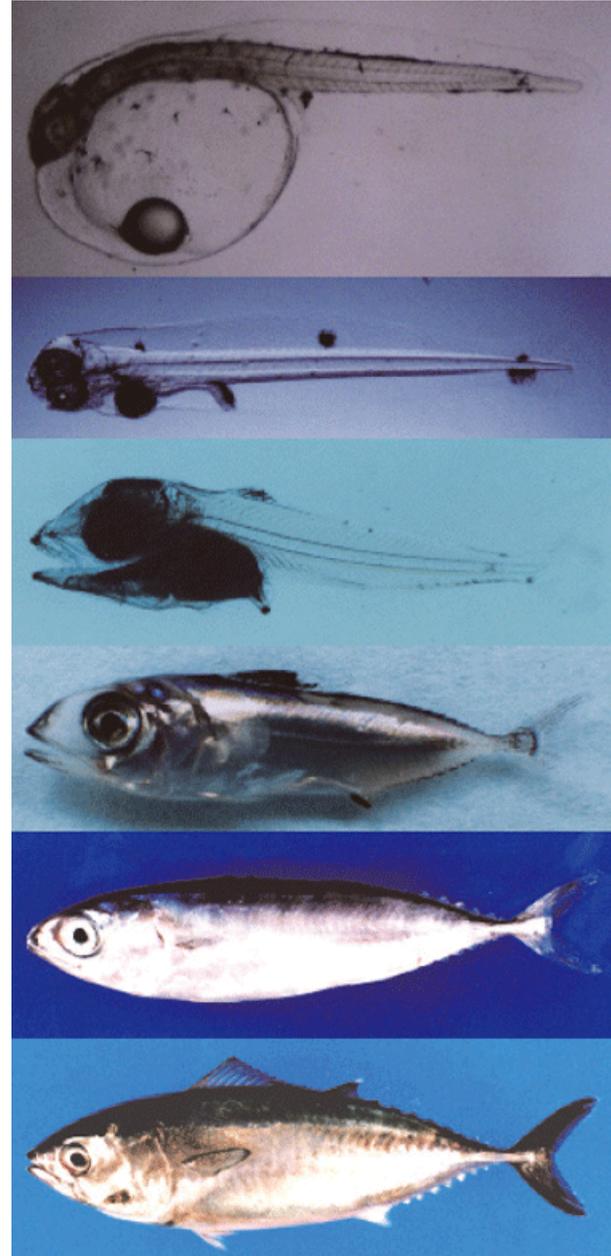
B : 2 日齡 (全長 3.8 mm)

C : 10 日齡 (全長 7.5 mm)

D : 22 日齡 (全長 30.5 mm)

E : 38 日齡 (全長 90.2 mm)

F : 74 日齡 (全長 253.0 mm)



なぜマグロの完全養殖は難しいの？

- マグロは赤ちゃんの生態がほとんど分かっておらず、非常にデリケートですぐに死んでしまいます。
- クロマグロはふ化して数ミリの仔魚は、約1ヶ月で6~7cmの稚魚になり、数ヶ月で約30cmの幼魚となり、早ければ3~5年ほどで1.5~2mの成魚になります。
- 最初のうち卵から稚魚になるまでの生存率は0.1%でしたが、現在は10%まで高めることができています。
- なぜこんなに生存率が低いのでしょうか？

産卵させることが難しい

- 採捕して飼育していた天然のマグロが初めて産卵したのは近畿大学が研究を開始してから9年目の1979年です。
- その後、1983年から1993年までは産卵なしの状態が続きました。
- 研究を開始して完全養殖に成功するまでの32年間のうち、約20年が産卵なしの状態が続いたということです。
- 成魚のマグロは生け簀で飼育しますが、水温、水質、海流、エサ、生け簀の大きさや形状など、全く手探りの状態から研究が開始されたので、産卵させるまでに、こんなに長期間かかったのでしょうかね。

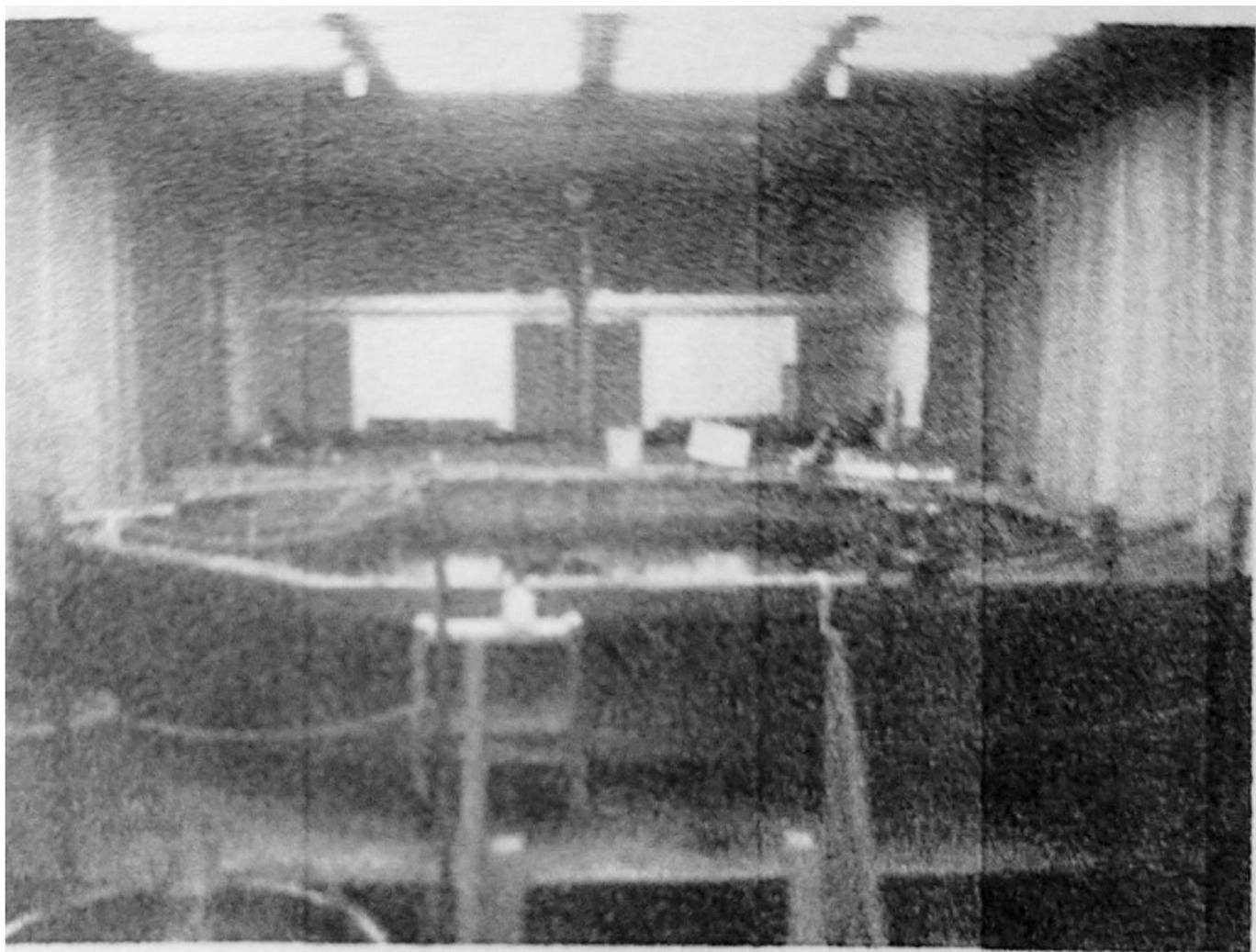


図 5-11 種苗生産水槽 (50 キロリットル水槽)



図 5-6 生け簀内で産卵された受精卵を網で集める

徹底した観察により32年目に課題をクリア

水産研究所は1970年にクロマグロの完全養殖に向け研究に着手。2002年6月に成功しました。

実現に32年もの歳月を要したのは、クロマグロがデリケートな魚であり、生態もよく知られていなかったためです。実現の鍵は、クロマグロを徹底して観察したことにありました。

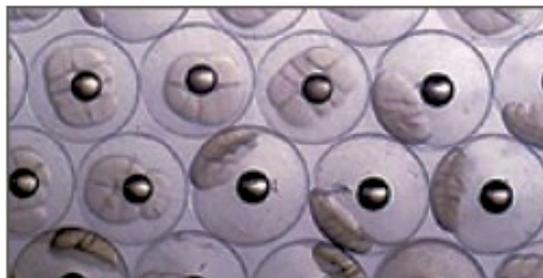
研究の過程で人工ふ化した稚魚が突然死する原因がわかってきます。そこで、適切な飼育環境を変えるさまざまな対策を講じてきました。

そして成魚に育て上げた個体から産卵があり、完全養殖を実現しました。



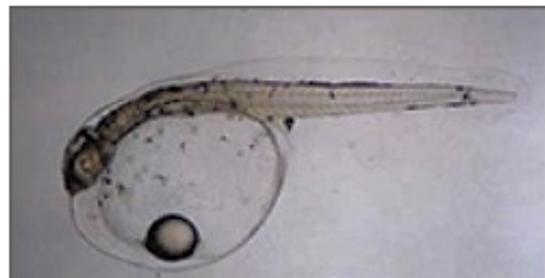
親魚

5年以上飼育して親魚とします。全長2m、体重200kg以上に成長します。



受精卵

受精した卵は水面に浮上し、それを採集します。直径約1mmほどで、1尾の雌から数百万粒の卵が採れると推定されています。



ふ化仔魚

およそ32時間でふ化します。ふ化直後の仔魚は全長約2~3mmで、最初にプランクトンを餌に育てます。



稚魚

ふ化からおよそ20日後に稚魚となり、この頃、陸上水槽から海上の網いけすに移されます。



若魚

ふ化から約3ヵ月で全長約30cm、体重約300gに成長します。



成魚

約3年で全長1m、体重30kg以上の成魚となり、出荷されるようになります。

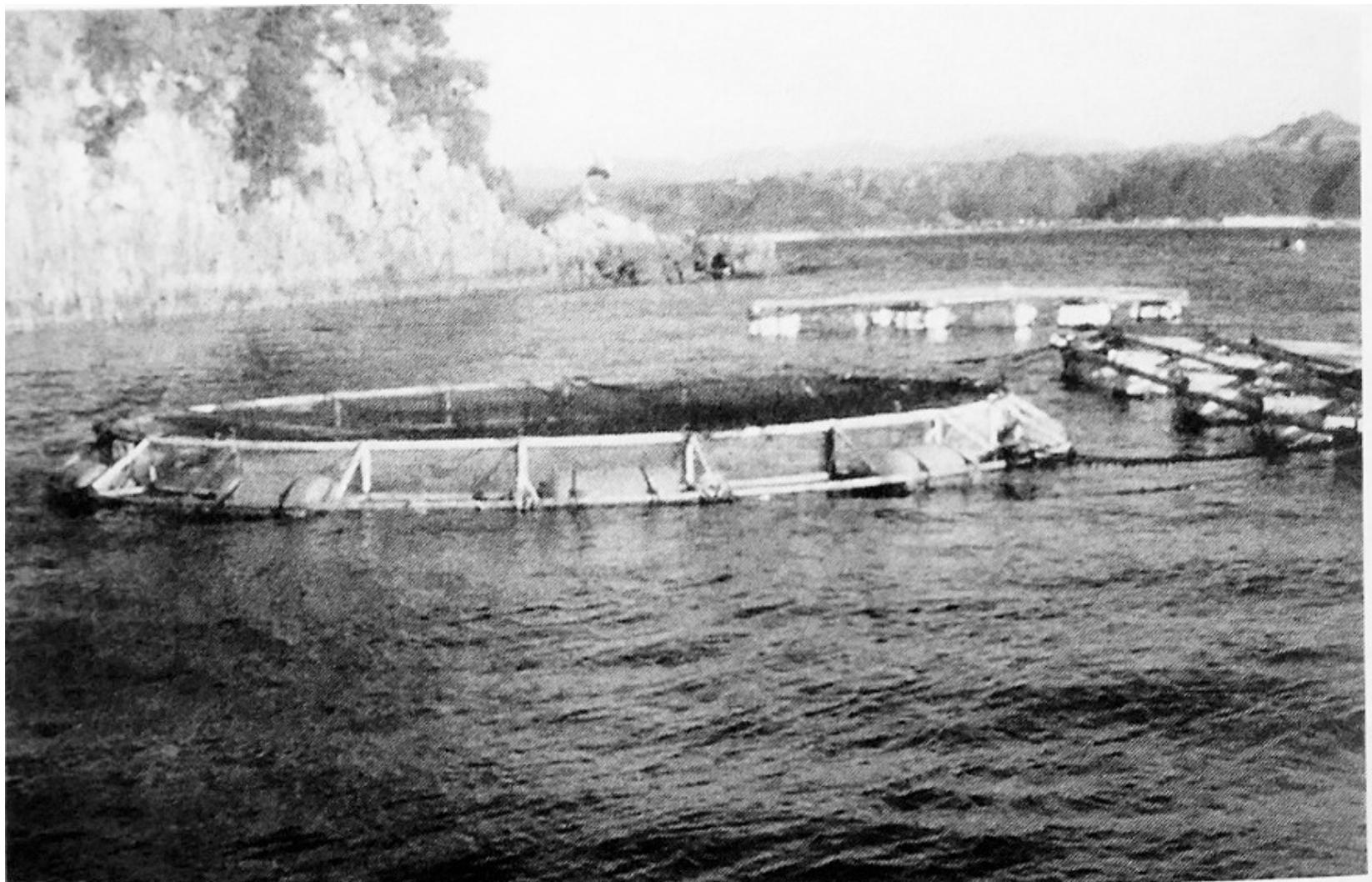
■ 飼育用卵の供給基地

1986年に開設した本施設は、近隣に養殖場がないことから清浄な海水を利用できる立地条件を生かし、各種養殖用種苗の大量生産を行うとともに、大型の採卵用水槽を複数備えて飼育用卵の供給基地としての役割も担当しています。



天然ヨコワの活け込みと親魚養成

- ヨコワを網いけすに活け込む研究では当初の3カ年、全参画機関で1年以上の長期飼育ができなかったため、プロジェクト終了とともに本研究から撤退した。
- しかし近畿大学では、試行錯誤の末1974年から長期飼育・養殖への道を拓き、同年産群が満5歳となった1979年に初の自然産卵、仔魚から稚魚までの飼育に成功した。
- しかし、稚魚は47日齢（全長57mm）で全滅し、1980および82年の飼育でも最長記録は57日齢（全長79mm）止まりで、さらにその後11年間産卵が途絶えたことで、技術開発は休止状態に陥った。
- 魚類における種苗生産では、全長数cmの稚魚にまで育てれば成功、というのがそれまでの常識であったがクロマグロには通じず、今日に至る本格的な技術開発は、1987年産親魚群が自然産卵を開始した1994年以降となった。



1974 (昭和 49) 年 9 月、一本釣りのヨコワに絞って、飼育が再開された。新兵器は直径 8 メートルの巨大な生け簀。そこでヨコワは順調に育った。

人工種苗生産技術開発と3大減耗期

- 1994年には、全長約5cmの稚魚1,872尾を初めて海面いけすに移動（沖出し）できたが1年以内に全滅した。
- それまでの経過から、完全養殖を達成するための課題は
 - （1）不安定な産卵、
 - （2）10日齢ごろまでの初期減耗、
 - （3）以後数週間にわたる激しい共食い、
 - （4）30日齢以降に頻発する衝突死の4つに大別できることが分かった。
- これらの課題には、水産研究所を挙げて以下の研究と対策が行われてきた。

産卵の安定化

和歌山県串本町大島での産卵が不安定なことから（産卵年確率約5割）、1998年から奄美大島での親魚養成を開始し、2003年以降の安定産卵を実現した。

10日齡ごろまでの初期減耗

10日齡ごろまでの初期の大減耗は、現象として浮上死と沈降死に大別できる。

この最大の原因は、遊泳を休止する夜間に起こる沈降死であり、体比重と飼育水の比重およびその流動の関係から発生すると考えられた。

そこで、体比重変動要因の究明および通気量制御法（日中微量・夜間増強）の研究などにより、当初10%程度であった生残率を30%以上にまで改善させた。

浮上死とその対策

- 浮上死とは仔魚が水槽の中でエアープンプによる水流で水表面に押し上げられた時、表面張力により、水面にくっついたままの状態になり、もぐれなくなってしまうことです。
- この対策として水面に魚油の膜を張って、表面張力を小さくすることにより浮上死は大幅に減らすことができました。

沈殿死とその対策

- 心化後、3日目くらいから夜間に発生するのが沈降死と呼ばれる現象です。夜間に遊泳活動が弱まった仔魚が底に沈んで体を傷つけて死んでしまうと考えられています。
- 心化した後、仔魚の体内の浮袋は閉じた状態のため、底に沈んで沈降死が起こります。空気を吸って浮袋を膨らませる必要があり、そのタイミングは心化後3日目がいと分かりました。3日目には張った油膜を一旦除去し、仔魚が空気を吸えるようにし、浮袋が膨らんだ後に再び油膜を張るようにしました。この対策で沈降死も大幅に減らすことができました。

激しい共食いとその対策

共食いは餌料不足によって激増し、初期生存仔魚の80%以上が減耗します。対策として、餌に小さい魚を与えることにより共食いを減少することができました。

餌料系列は当初、ワムシ等の動物プランクトン、イシダイ等の魚類ふ化仔魚、そして魚肉ミンチへと、全て生物餌料であり、特にふ化仔魚の供給が最大の課題です。

最近、ようやく魚肉への移行期である25日齢ごろ（全長約25mm）から使える配合飼料が開発されたが、ふ化仔魚供給問題は依然として解決されていません。

クロマグロは14日齢ごろ（全長約8mm）からふ化仔魚を摂餌し始めると急激に成長し、18日齢（全長約15mm）以後の摂餌量が激増するので、25日齢ごろまでのふ化仔魚供給が最重要課題でした。

衝突死とその対策

- 衝突死は、沖出し以後90日齢前後までの中間育成期に多発し、最終的に全滅に至ります。ふ化後25日経過すると猛スピードで泳ぐようになり、水槽にぶつかって死にます。
- 原因は、全長約5cm（30日齢）から30cm前後（90日齢・ヨコワ）までは、尾びれによる遊泳推進力の発達に対し、遊泳を制御する他のひれの発達が遅いことが分かり、衝突しやすい発育段階であるという結論を得ました。
- 夜に生け簀に車などのライトが当たると驚いて突進して衝突してしまいます。これに対しては夜間にライトをつけることにより、急激に明るさが変化しないようにしました。

衝突死の対策（２）

- また、衝突の確率を低減する目的で沖出しいけすのサイズを大きくしました。
- 1994年に用いたいけすは一辺6mの角形であったが、1995および96年の沖出しで直径12mの八角いけすにしました。
- その結果、1カ月後の生残率は24.9および16.4%へと顕著に高まり、2年後に17および35尾を生存させることができ、少ないながらも初めて実用種苗の生産に成功した。
- さらに、5,476尾の稚魚を生産できた1998年の沖出しには、直径30mの円形いけすを採用した。

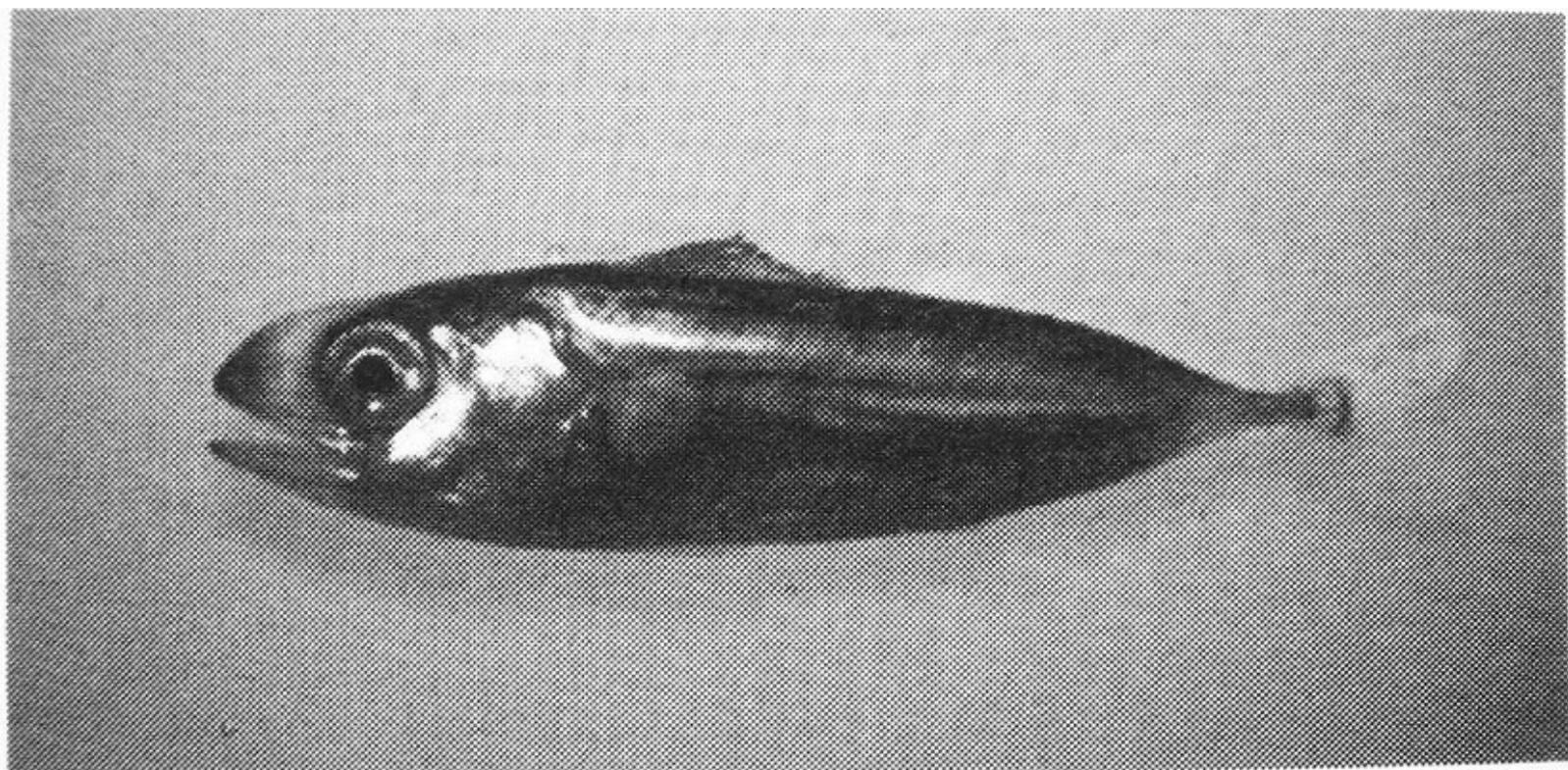
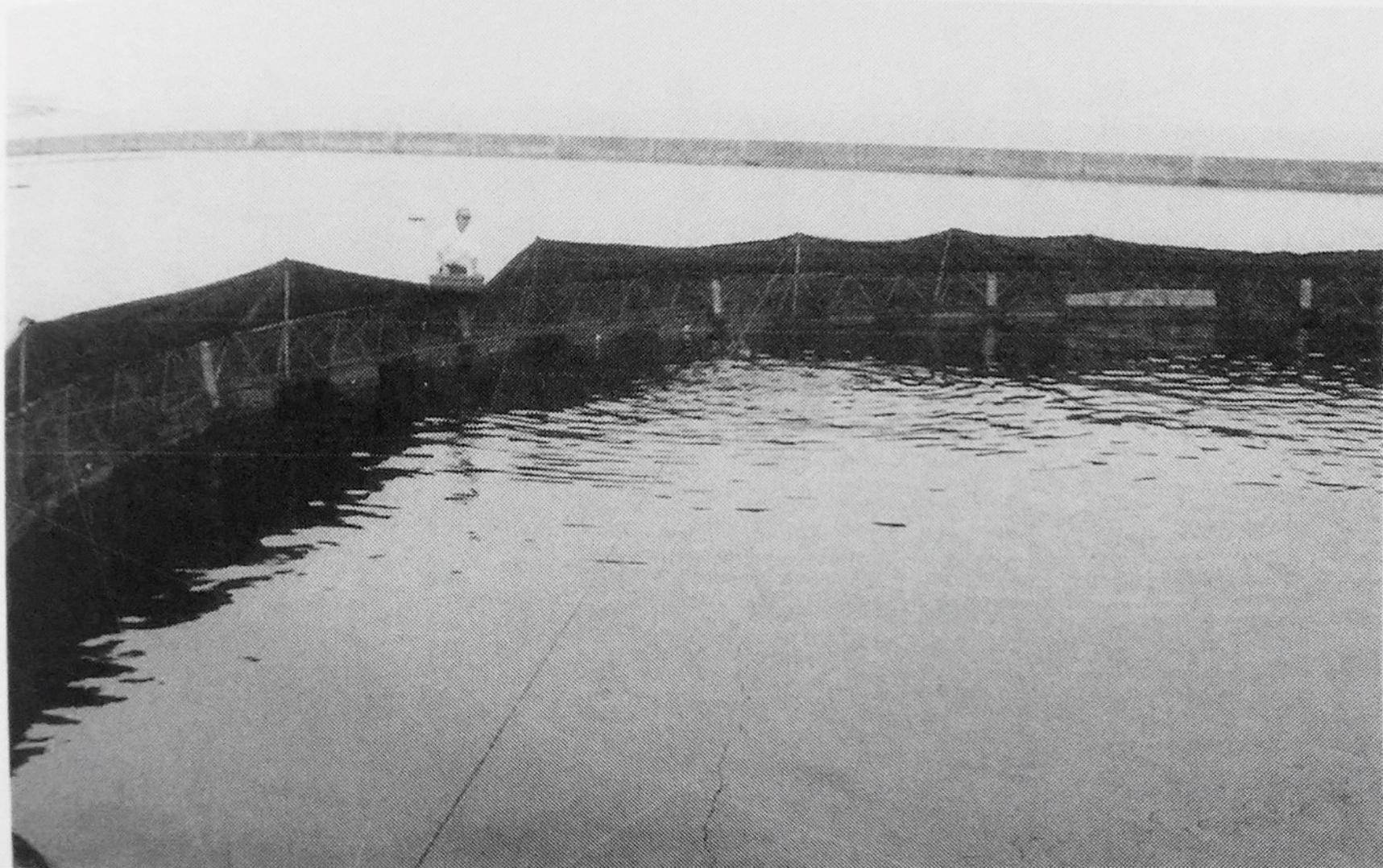


図 5-10 ふ化後 40 日、全長 50mm のクロマグロ稚魚



2度目の稚魚の沖出しのときがきた。夜間、魚がパニックを起こす光を遮るため、生け簀の周りは黒いシートで覆われた。以前のような大量死は見られず、1か月後、沖出しした数の4分の1、2000匹もの稚魚が生き残っていた。

餌の問題

- マグロは幽門垂という胃と腸の間にある消化器官がふ化後60日くらいまでは完成しません。
- このため若い稚魚の消化能力は高くなく、消化吸収率が劣る配合飼料では育たず、生の餌を与えないと育たないという常識がありました。
- しかし、酵素処理魚粉で作った配合飼料を与えたところ、生の餌と遜色なく成長することが分かりました。
- 配合飼料を使うことのメリットは冷凍保存しなければならない生の餌に比べてコストがかからないことや、他の魚資源を使用しないで済むことや、小さな魚に含まれている汚染物質の蓄積の影響を受けないことが上げられます。

餌の問題（2）

- 当社は約30年かけ、缶詰で有名な極洋さんと協力して、激減していたクロマグロの完全養殖を実現しました。しかも、この事業を大きく進化させる飼料の完成も間近です。
- クロマグロは6～8月の新月の夜に何百万個もの卵を産みますが、生き残るのはそのごく一部のため、完全養殖を始めても稚魚を海のいけすに出すまでの生存率は1%程度だったのです。
- 原因は、クロマグロは動いているものしかエサとして認識しないため、食いが悪いことでした。しかし当社の研究により、ホタテの内臓エキスを加えた飼料は積極的に食べてくれることがわかったのです。生存率が3～4倍に増えることが期待されています。

成果

- その結果、沖出し1および2カ月後の生残率を、それぞれ50および30%前後にまで高めることに成功し、満2歳で約400尾（体重 5～15kg）を生存させ、いけす単位での企業化水準を達成した。
- しかし大型いけすの場合、生産ロットの生残尾数によっては、収容密度の関係から合理的な給餌作業に支障を来すことになる。
- そこで、夜間電照により12m角形いけすで大型いけす並みの生残率を得られるように改善を図った。

完全養殖の達成

- 1995および96年に生産した2群は、先述のように生存数が少なかったため合併飼育したところ、それぞれ満6および7歳を迎え体重110～150および70～120kgに成長した2002年6月に、産卵を開始し完全養殖を達成した。
- 得られた受精卵から飼育した稚魚（人工二世魚）は、2年後に体重約20kgに成長し、試験出荷を行い従来の養殖マグロと変わらぬ市場評価を得た。

産業化の現況

- 全長約30cmのヨコワまでの生残率は、初めて沖出しが可能になった1996年度では卵からの通算で0.03%であったが、現在、陸上水槽で3%内外、沖出し後の中間育成で約30%、通算で約1%にまで向上している。
- この通算生残率は、マダイやカンパチでのそれぞれ60~70%および20~30%などに比べていまだ著しく低い。現在の国内クロマグロ養殖用の種苗需要数約60万尾の1割前後に相当し、完全養殖の産業化は確実に近づきつつある。
- しかし、他魚種の流通種苗サイズが全長5~10cmであるのに対し、クロマグロでは、衝突死というハイリスクから約30cmと著しく大きい上に、許容飼育密度が他魚種より著しく低い。
- そのためヨコワ7万尾を生産するには、現段階では、マダイ稚魚700万尾以上に相当する施設が必要であり、量産には、漁業権の管理も含めて産官学の連携が不可欠である(図3)。

クロマグロ養殖の生け簀

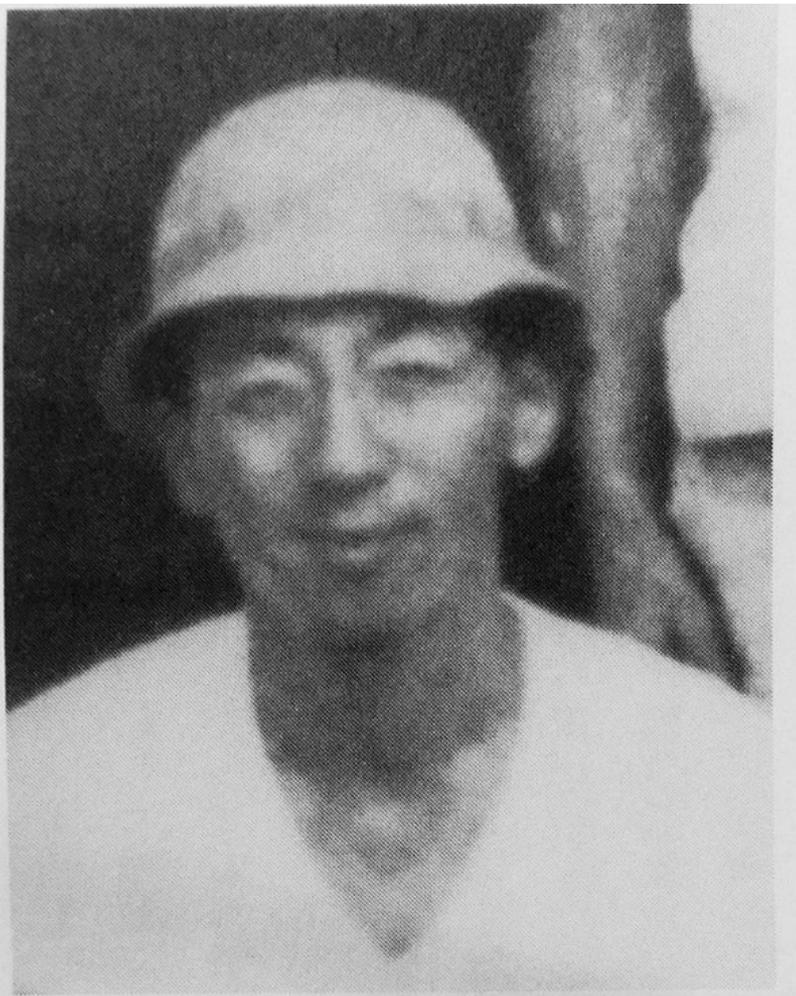


養殖マグロのつり上げ



年	魚種
1965	ヒラメ
1967	ヘダイ・イシダイ
1968	ブリ
1969	カンパチ
1970	イシガキダイ・キハダ
1972	ヒラマサ・マルソウダ・ヒラソウダ
1973	ハガツオ・イサキ・シマアジ
1975	シロギス
1979	クロマグロ
1980	
1988	クエ
1990	
1991	マイワシ
1999	マサバ
2000	

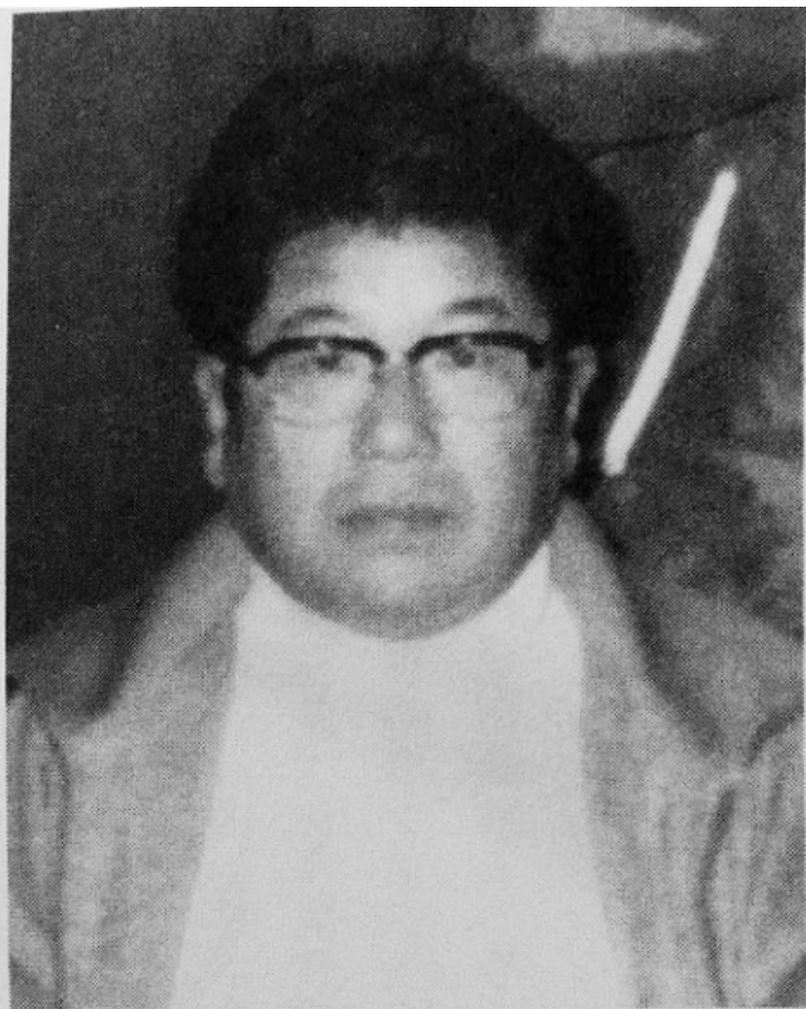




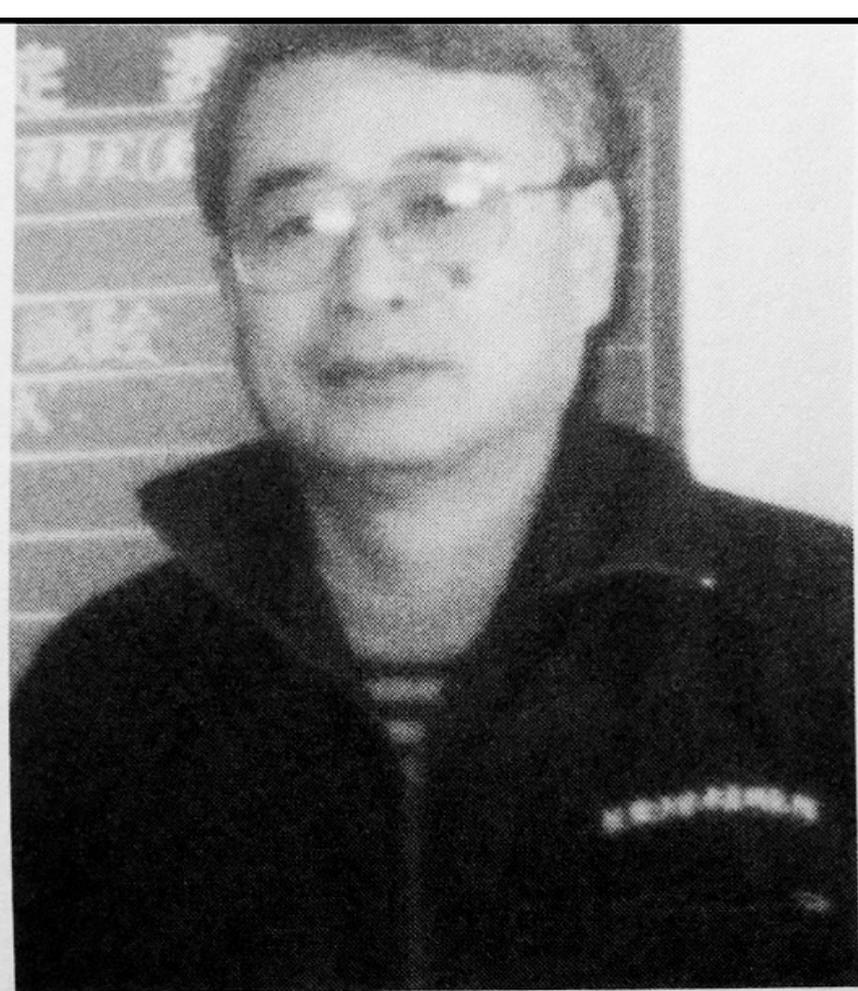
戦後の食糧難を経験した原田輝雄。高校の教師を辞め、日本で始まったばかりの「鹹水（海水）養殖」に挑む近畿大学附属白浜臨海研究所へ飛び込んだ。研究対象に選んだのはハマチ。1匹でも多く育て、日本全国の食卓に届けたいと思った。



熊井英水、当時22歳。広島大学の水産学科を出たが、意に沿う就職先が見つからなかった。学会誌で見つけた「ハマチを生け簀で育てる」という研究テーマに興味を持ち、研究先である近畿大学白浜臨海研究所へ向かった。



メンバーの岡本茂。1匹でも多くヨコワを生かすには、数を獲らなければならないと思った。すさみ町でカツオの一本釣りが行われていると聞いて、ヨコワだけの一本釣りを漁協に頼みに行った。



稚魚たちの大量死の原因究明に乗り出した、ベテランの宮下盛。停電がきっかけで、稚魚が光にパニックを起こすことを知った。さらに尾びれだけが早く発達するアンバランスが、衝突死を引き起こしていることも突き止めた。

参考文献

- 本資料は、以下の図書を基に作成しました。
- 産官連携ジャーナル2013年4月号 特集
 - 革新技術の実用化クロマグロの完全養殖技術の開発と産業化
- マグロのふしぎがわかる本
 - 水産総合研究センター叢書
- 曙光激闘の果てに
 - NHKプロジェクト制作版
- 海を耕せ
 - 近畿大学水産研究所 パンフレット

易しい科学の話
2019・1・16

近畿大学が成功したクロマグロの 完全養殖とマグロの知られざる特徴

終り

吉岡 芳夫