

水産総合研究センター(旧日本栽培漁業協会)によるク ロマグロ栽培漁業技術の開発

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2024-08-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 升間, 主計 メールアドレス: 所属:
URL	https://fra.repo.nii.ac.jp/records/2010446

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.



技術小史

水産総合研究センター（旧日本栽培漁業協会）による クロマグロ栽培漁業技術の開発

升間 主計*

Development on Techniques of Stock Enhancement for Pacific Bluefin Tuna *Thunnus orientalis* by the Fisheries Research Agency (formerly, Japan Sea Farming Association)

Shukei MASUMA*

Fisheries Research Agency (formerly, Japan Sea Farming Association), at the Yaeyama Station had worked on the technical development of broodstock and seedling production of Northern Pacific bluefin tuna in captivity at Ishigaki island of Okinawa prefecture between 1985 and 1997. Young bluefin tuna were transported to Ishigaki over a long distance (1,300-1,500 km) and time (74-113 hours) by boats. The broodstock raised did not spawn, but its growth in the subtropical region was demonstrated to be faster than that of the other farming sites. The Amami Station began research from 1994 at Amami Island, Kagoshima Prefecture. Spawning of bluefin in captivity started in 1997, and occurred in every year since then. In their research, many findings on the spawning ecology, behaviors, and so on of bluefin tuna in captivity were obtained. Further, the food sequence, management of water in rearing tanks, and countermeasures against VNN disease for seedling production of bluefin tuna have been developed.

This report was prepared after reviewing the findings and practices of JASFA and FRA during 20 years (from 1985 to 2005).

2008年5月12日受付, 2008年8月27日受理

かつて世界のマグロ総漁獲量の50%以上を占めていた日本のマグロ類漁業は、現在では僅かに15%を占めるに過ぎなくなっている¹⁾。主な漁獲対象となっているマグロ類は太平洋のクロマグロ *Thunnus orientalis*, 大西洋・地中海のクロマグロ *Thunnus thynnus*, キハダ *Thunnus albacares*, メバチ *Thunnus obesus*, ビンナガ *Thunnus alalunga*, ミナミマグロ *Thunnus maccoyii* の6種であるが、このなかで、クロマグロは最大で体長300 cm, 体重で600 kg以上にまで達するマグロ類中で最も大型となる種であり、また魚価は、時期、市場、サイズ及び肉質により大きく変動するものの、平均1,000～5,000円/kg, 高値の時は約3万円/kgにまで達すること

もある高級魚である。このように、クロマグロは他魚種に比べて魚価が高いことから国際的な漁業管理が行われているが、国際的なルールを逃れるためのFOC（便宜置籍船）、これらの船によるIUU（違法、無報告、無規制）漁業が問題となっている。また、1992年に第8回ワシントン条約（絶滅の恐れのある野生動植物の種の国際取引に関する条約）締約国会議において西大西洋のクロマグロを付属書I（取引禁止品目）、東大西洋のクロマグロを付属書II（貿易監視品目）に掲載するように提案が行われ、クロマグロを含むマグロ類への資源管理に関して、初めて国際的に強い関心が示されるようになった。

* 独立行政法人水産総合研究センター 宮津栽培漁業センター 〒626-0052 京都府宮津市小田宿野1721
Miyazu Station, National Center for Stock Enhancement, FRA 1721 Odashukuno, Miyazu, Kyoto, 626-0052 Japan
masuma@fra.affrc.go.jp

一方、1960年代後半、沿岸資源増大のための栽培漁業への関心が高まるなか、海洋開発宣言（1961年）に端を発した世界的な海洋開発時代の幕開けを背景に、資源培養型漁業開発のための研究が我が国の主導的な役割を果たして推進すべきプロジェクトとして位置づけられ、1970年から3年間、「大規模海中養殖実験事業」として、クロマグロの「つくり育てる漁業」に向けた取り組みが開始された²⁾。さらに1980年から1988年には、「近海漁業資源の家魚化システムの開発に関する総合研究（マリーナランディング計画）」のなかで近畿大学、養殖研究所を中心としてクロマグロの親魚養成試験が行われ、そのなかで、1979年には近畿大学において、満5歳となった養成クロマグロが世界で初めて網生簀内で自然産卵し、ふ化後47日目（全長57mm）までの飼育に成功した^{*1)}。その後も近畿大学では、親魚養成から得た卵を用いて、クロマグロ仔稚魚の発育過程における種々の形態学および生理生態学的特性を明らかにするとともに、その完全養殖への足がかりを得るための研究を進め³⁾、2002年に完全養殖に成功した^{*2)}。

このような社会的、技術的背景のなかで、日本では世界に先駆け、栽培漁業による資源増殖手法の開発を目的として、1985年に水産庁の委託を受けた日本栽培漁業協会八重山事業場（現独立行政法人水産総合研究センター八重山栽培漁業センター、以下八重山事業場）においてクロマグロ、キハダの種苗生産技術開発が開始された。また、1994年からクロマグロに関する技術開発は日本栽培漁業協会奄美事業場（現独立行政法人水産総合研究センター奄美栽培漁業センター、以下奄美事業場もしくは奄美栽培漁業センター）に移され、今日まで研究開発が続けられている。さらに、近年のクロマグロの養殖事業の拡大に伴い、養殖種苗を天然に依存する養殖形態から、天然に依存しない人工種苗による養殖産業の振興を目指した大型のプロジェクトが独立行政法人水産総合研究センター（以下水産総合研究センター）を中心として2007年から開始された。

以上のようにクロマグロを取り巻く情勢は近年とくに急速な展開を示しており、それは日本のみにとどまらない状況にある。

そこで、本報告では、これまでに日本栽培漁業協会から始まり、水産総合研究センターで得られた2005年までの20年間の成果を整理することで、今後のマグロ類、とくにクロマグロに関した栽培漁業（親魚養成、種苗生産等）、養殖事業等の技術開発への取り組みが、より効率的に実施されるための参考とすることを目的とした。

1. 八重山および奄美への事業場設置の経緯

八重山事業場 社団法人日本栽培漁業協会八重山事業場として、1985年に沖縄県の石垣島に開所し、クロマグロ・キハダの種苗生産技術開発が開始された。本間⁴⁾は、八重山事業場の対象魚種としてクロマグロが挙げられた理由として、マリーナランディング計画のなかでクロマグロの産卵場所が南西海域、とくに沖縄県石垣島周辺が主産卵場であることが明らかにされつつあったが、プロジェクトのなかで親魚を養成する拠点が亜熱帯の南西海域に他になかったこと、「台風が多いものの、サンゴ礁に囲まれた水深の浅い礁湖に大型生簀網を設置することが技術的に可能である」との保証を水産総合研究センター水産工学研究所の解析によって得られたことを挙げている。また、クロマグロの先行的な技術開発魚種として成熟がクロマグロに比べて早いキハダが加えられ、2種のマグロ類を対象とした技術開発が始まった。それまでに亜熱帯、低緯度域でのクロマグロの飼育例はなく、八重山事業場での取り組みから重要な多くの知見が得られた。八重山事業場での取り組みは、奄美事業場での産卵が始まった1997年まで継続された。

奄美事業場 奄美事業場は鹿児島県の奄美大島の南側対岸にある加計呂麻島に建設され、1994年4月から親魚養成への取り組みが開始された。八重山事業場から奄美事業場へクロマグロに関する増殖技術開発の拠点が移行された経緯について、本間⁴⁾は、八重山でのクロマグロの成熟・産卵が後述するように高水温環境により不調であったことから産卵適水温を26℃前後と考へ³⁾、さらに、夏場の高水温時の水温が29℃以下の環境を有する適地として事前に奄美大島の調査を実施していたことと、1992年3月の京都で開催されたワシントン条約会議の影響により、国としてクロマグロ資源培養に、より積極的に取り組む方針が示されたためであったと述べている。また、大洋を回遊する本種を既存の生簀網形式でなく、より広い環境で飼育することが順調な成熟に効果があるとの考えにより、小湾を網で仕切った施設を建設するに適した地形を加計呂麻島が有していた点も挙げられる。

2. 親魚養成（輸送および飼育、成熟、採卵）

(1) 八重山事業場

輸送と親魚養成 八重山事業場では1985年から1992年までの間に6回、ヨコワ（以下、当歳魚を示す）および1歳魚の輸送及び収容が実施された（表1）⁵⁻¹⁰⁾。それま

*1) 原田輝男、熊井英水、村田修、中村元二、岡本茂、乗田孝雄（1979）クロマグロの人工種苗生産の研究 - I 養成クロマグロの成熟と産卵。昭和54年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, 85.

*2) 宮下盛、村田修、澤田好史、岡田貴彦、倉田道雄、熊井英水（2003）クロマグロの完全養殖。2003（平成15年）度日本水産学会大会講演要旨集, p151.

表 1. 八重山事業場におけるクロマグロ親魚候補魚の収容概要

年級*1	施設	種苗の入手		輸送		収容			
		場所	時期 (年.月.日)	時間 (時)	生残率 (%)	年.月.日	年齢	尾数	体重 (kg)
1984	フロート式角形網 (40×21×8.9m)	高知県大月町 柏島の民間養 殖業者	不明	74	100	1985.11.9	1	34	4.8
1986	〃	高知県沖	1986.7.28~8.4	113	65.5	1986.8.11	0	226	0.12
1987	フロート式角形網 (35×35×9m)	高知県沖	1987.7.24~8.4	120	41.5	1987.8.10	0	160	0.11
1988	フロート式角形網 (45×25×11m)	高知県沖	1988.7.23~7.25	126	49.3	1988.8.8	0	340	0.19
1990	〃	高知県沖	1990.7.23~7.29	74	29.5	1990.8.6	0	192	0.18
1991	フロート式円形網*2 (直径47m)	沖縄県本部町 の民間養殖業 者	不明	24	98	1992.11.1	1	90	12.5~19.8

*1 級群はクロマグロの生まれた年を示す。

*2 1988年級群で使用していた角形生簀網の張りロープによって、生簀網の形を円形に保つように調整した。

で 500 g 以上のクロマグロは活かして輸送できないとされていたが、1985 年の秋に体重 4.8 kg のクロマグロ 34 尾が高知県大月町柏島から沖縄県石垣市まで約 1,300 km, 74 時間を掛けて輸送（活魚船 99 トン）され、輸送後の生残率は 100% であった⁴⁾。さらに、ヨコワ（0 歳魚）の輸送例では 1986 年に 1,500 km, 113 時間の輸送（活魚船 349 トン）に成功し、続いて 1987, 1988 及び 1990 年にも輸送を実施し、29.5 ~ 65.5% の輸送後生残率が得られている（表 1）。最も低かった 1990 年の 29.5% の例では輸送中水槽壁面への衝突死が多く、その原因としてこれまでに比べて輸送中の水温が 29 ~ 30℃ と 1 ~ 2℃ 高かったこと、波浪が高かったこと、活魚水槽壁面の色が従来のダークグリーンではなくライトグリーンであったこと等から、魚群が落ち着かなかつたためと推察された⁹⁾。このことから、輸送中の水温、波浪条件、活魚水槽壁面の色などが長距離輸送にとって輸送後の生残率を上げるための重要な要素であることが推察された。

生簀網へ収容後の生残率は低く、とくに当歳魚（0 歳魚）を収容した 1986 ~ 1988, 1990 年級群では 1 年後（1 歳魚）で 7.5 ~ 17.7 %, 2 年後で 2.7 ~ 16.5 % となった（表 2, 図 1）。一方、民間養殖場で 1 年間飼育された 1 歳魚を収容した 1984 年級群では、その 1 年後で 20%, 1991 年級群では 60.7% と最も高い値を示した（表 2）。死亡は収容直後から約 1 ヶ月間に多く、死亡率は 1987 年級群で約 70 % であった（図 1）。また、とくに網替え後に死亡が多く認められた（図 1）。八重山事業場先海域では春から夏にかけて貝類を中心とした付着物が多く、網の沈下を招くために、年 1 回程度の網替えを実施せざるを得なかった。網重が増すとフロート式生簀網の場合、網が内側に寄せられ、平面積が狭められた。とくに 1991 年級群では沈下によって狭められた網への衝突が頻発し、約 20% の個体が死亡した（図 1）¹¹⁾。八重山

事業場の各養成事例での生残はいずれも低く、死亡の原因は生簀網への衝突死、網との擦れによる衰弱死であった¹²⁾。

八重山での養成では 1994 年に成熟調査のため取り揚げられたが、1987 年級群で 7 歳、1988 年級群で 6 歳にまで達した¹³⁾。

成長 成長は和歌山、高知、鹿児島県での養成例¹⁴⁻²⁰⁾ と比べ、最も早い成長を示した²¹⁾。八重山での年間平均水温は約 25℃ で最低で 20℃、最高で 31℃ にまで達した（図 2）。升間ら²¹⁾ は水温変化率と摂餌変化率の関係を調べ、25 ~ 28℃ への水温の急上昇期と 25 ~ 21℃ への下降期にやや摂餌が低下するものの、28 ~ 30℃ の高温期でも摂餌が活発であり、夏期の高温はクロマグロの養成にとって、必ずしも決定的な障害条件ではないことを示唆した。また、升間ら²¹⁾ は摂餌転換効率についても試算し、当歳魚で養成開始から 1.5 年間で 10.1%,

表 2. 社日本栽培漁業協会八重山事業場におけるクロマグロ養成親魚の収容 1, 2 年後の生残状況

年級	収容時 年齢	生残率 (%)	
		1年後	2年後
1984	1	20.0 (7)	-
1986	0	16.8 (36)	2.7 (6)
1987	0	17.7 (28)	16.5 (26)
1988	0	12.4 (35)	9.7 (28)
1990	0	7.5 (15)	6.5 (13)
1991	1	60.7 (54)*	-

* 括弧内は尾数を示す。

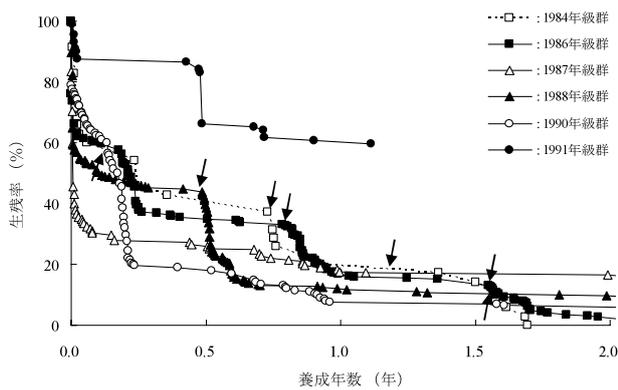


図1. (社)日本栽培漁業協会八重山事業場におけるクロマガゴ養成親魚の収容から2年後までの生残の推移 (図中の→は網替えを示す)

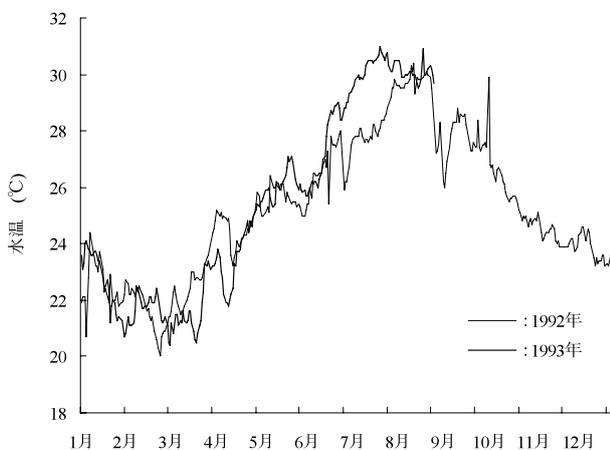


図2. (社)日本栽培漁業協会八重山事業場沖における10m水深での水温の推移

次の1年間で7.6%、さらに1年後では4.6%と徐々に低下し、荒巻¹⁹⁾が鹿児島県で実施したクロマガゴの養殖試験結果と一致することを示した。

これらの亜熱帯域でのクロマガゴの成長、餌料効率などのデータは²¹⁾、前述のヨコワの長距離輸送の成功と共に⁵⁾、その後の南西諸島域でのクロマガゴ養殖事業の発展に大きく寄与した。

成熟 3歳以上の個体で得られたGSI (生殖腺体指数) の変化を図3に示した¹³⁾。雌雄共にGSIが1を越えた個体は1尾のみであった。GSI 2.15の雌個体では卵巣内の最大卵径は0.64 mmに達していた。これらの結果を基に、共同研究を行っていた養殖研究所の香川博士 (現宮崎大学) は、①石垣島でもクロマガゴの成熟は可能である、②最も生殖腺が発達するのは4月頃③雌雄共に5月には生殖腺が退縮する、しかし④6～7歳で未熟な雌が出現することを考えると石垣島はクロマガゴの産卵環境にとって、必ずしも良いとは考えられない、との見解を示した¹³⁾。

ホルモン注射による産卵誘発試験 1992年7月2、15～17日にホルモン注射による催熟試験を実施した。打注方法には吹き矢 (Telinject 社製) を使用した²²⁾。シリ

ンジにはゴナトロピン 10万単位を封入し、クロマガゴが餌に誘われて表面に上がってきた時や体の一部を表面に出して泳いでいる時を狙って発射した。計7回試行し、その内6回で魚体に突き刺さり、魚体へ薬液が注入されたと認められたが、その後産卵は観察されなかった。

精液保存試験 1985年7月31日に京都府丹後半島沖で中型巻網船によって漁獲され、翌8月1日に鳥取県境港に水揚げされた平均体重 (鰓腹除去) 145 kgのクロマガゴ2尾の精巢から精巢内精子を採取し、凍結保存を実施した⁵⁾。後に精子が活発に運動するのを確認した。

(2) 奄美事業場

海上施設 奄美栽培漁業センターのクロマガゴ養成施設の特徴は2つ挙げられ、1つは小湾を網仕切した (以下、仕切網) 広さ14 haの養成施設、2つ目は採卵作業の際に筏枠の上を安全に歩行可能である直径40 mの棒鋼製円型筏で、クロマガゴの養成施設としていずれもこれまでに例を見ない施設であった (図4)。

親魚養成 親魚候補魚の活込みは、1994年から2005年までの間に6回実施し (表3)、活込み時の年齢は当歳 (0歳)、1、4歳および8・9歳魚 (混養群、以下同様) であった。

1994年6月に沖縄県本部町から活魚船により輸送した1歳魚189尾を円型生簀網に収容して養成を開始し、1995年9月に、それまで生残していた172尾のうち95尾を仕切り網へ移し (以下仕切網群)、77尾は引き続き円型網生簀 (以下生簀網群) で養成し、両施設での比較 (成長、生残、産卵等) 試験を開始した。その結果、成長に差は認められなかったものの、生簀網群と仕切網群の生残に大きな違いが認められ、安定的な大量採卵を目的として長期間に亘って同一年級群を養成する必要がある場合、死亡率の低い仕切網施設が有利であることが示唆された²³⁾。また、生簀網群では長期間、狭い範囲で同一方向 (左回り) に遊泳していたことから、尾鰭が左に変形して曲がり、一方、仕切網群では、2歳時まで生簀網内で養成していたことから若干の変形は見られるものの、ほぼ体軸に沿って正常に近い形を維持していたことから、長期に亘る狭い環境での養成は尾鰭の形態異常を引き起こすことが分った²³⁾。尾鰭の変形は正常な遊泳の妨げとなり、生簀網への衝突死の原因となる可能性が示唆される。さらに、精子の密度と活力を両群で比較したところ、精子密度に違いは認められなかったが、精子活力が生簀網群の雄に比べて仕切網群で高いことが認められ、養成方法が精子活力に影響することが示唆された²³⁾。また死亡 (網に衝突し、網を突き破って逃亡したケースも含む) 時期について、8月に多く、養成7年 (年齢8歳) 以上でやや高くなる傾向があること、ほぼ毎日給餌する場合、体重に対する日間給餌率は養成後2年目 (3歳) (体重で約80～90 kg) までに急速に低下

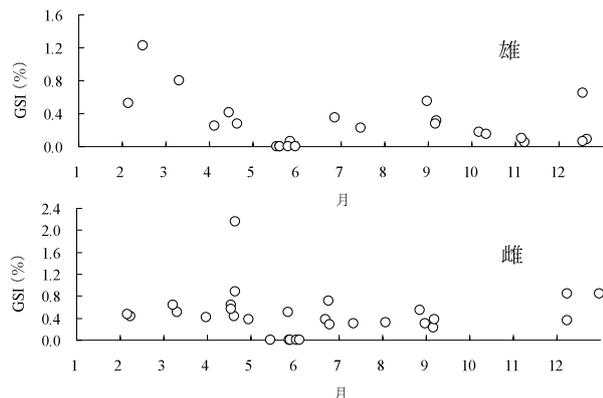


図3. 八重山事業場におけるクロマグロ養成親魚の成熟状況 (上段：♂ 下段：♀, 岡¹³⁾を改変)

し、その後1.5%前後に収束する傾向が認められ、升間ら²¹⁾が八重山で養成したクロマグロの日間給餌率について得た結果とほぼ一致していたこと、今回養成したサイズでは1日1～2回の給餌が適当であろうと推察されたこと等、仕切網群と生簀網群を比較養成した結果から多くの知見が得られた²³⁾。

4歳および8・9歳魚の収容では、クロマグロ養殖業者の生簀網から直径40m棒鋼製筏・円型生簀網へ魚を移し、養殖場から奄美栽培漁業センターまでの約7kmをタグボートで約4時間掛けて曳航した(表3, 図5)²⁴⁾。移動時の平均速度は約1.8km/時であった。1994年(4歳魚)には平均体重約80kgの親魚45尾、1997年(8・9歳魚)は推定体重250kg、17尾を移動し、いずれの移動事例においても、移動中の死亡は見られなかった²⁴⁾。

1996、1999および2004年に高知県で活け込んだヨコワの奄美への輸送は、これまでに八重山事業場で利用していた100～300トンクラスの活魚船ではなく、20トン未満の漁船で実施したが、200尾程度の輸送には問題なかった。

2004年9月12日に高知県上ノ加江沖で捕獲されたヨコワ198尾(337±89.3g, n=14, 平均値±標準偏差と測定数を示す。以下同様。)を直径40m円型生簀網へ収容し(以下、太平洋群)、同年11月13日に同じ生簀網へ島根県隠岐沖で捕獲されたヨコワ251尾(以下、日本海群)(541±121g, n=39)を追加収容し飼育を行った。収容時期の違いから日本海群を収容した時点で太平洋群は既に2～3kgに達しており、サイズに約5倍の違いが認められた。しかし、輸送や収容時のハンドリングの影響と推測される死亡が少なくなる収容14日目以降の生残率を比較すると、やや日本海群の生残率が低い傾向が認められるが(図6)、収容時のサイズ差による大きな影響はなかったものと推察した。

生簀網へ収容後の生残率を図7に示した。2004年級群では生残率が他の年級群より低くなったが、この年級

群では、収容時にIDタグを全個体へ装着したことから、そのハンドリングの影響により死亡率が高くなったものと思われる。1歳魚で収容した1993年級群は、先述した八重山での生残と同様に2年後までの生残率が0歳魚で収容した他の群よりも遙かに高い結果となった。

奄美では八重山ほどには付着物による網の汚れがひどくなく、さらに棒鋼製筏を用いることによって従来のフロート式生簀よりも浮力が大きかったことから、網替え後に死亡が多発した八重山での経験を生かし、網替えを極力少なくすることで、八重山での生残率に比べて、奄美では非常に高い結果を示した。

麻酔試験 2000年からクロマグロの成熟、行動調査及び標識装着等のためにストレスを与えず、体表に擦れないようなハンドリング方法の技術開発を目的として、釣針などの電極を通して魚体に電気刺激を加えることで「暴れ」等の行動を制御できるかどうかを検討するための試験を実施した。これらの試験は広島大学難波教授(当時)の指導の元で実施した。2001年にはギンガメアジ *Caranx sexfasciatus*, ボラ *Mugil cephalus*, クロマグロ人工種苗を用い、2002年にはミナミクロダイ *Acanthopagrus sivicolus*, クロマグロ成魚を用いた電気麻酔試験を実施した^{25,26)}。成魚(推定FL200cm, BW180kg)を用いた試験では釣によって生簀網手前まで寄せた後、頭部を海面より露出させて、1～7mAの電流を流し、麻酔状態を観察した後にリリースしたところ、翌日は頭部に電極の痕が認められたが、3日後には痕も目立たなくなり回復した。また、2002年には電気麻酔後に採血を試みたが、リリース後に蘇生せず死亡した(全長233cm, 体重217kg)²⁵⁾。これらの結果から電気麻酔についてはその効果は認められるものの、通電する電流量、釣の場合には針先からの漏電、人間への影響など幾つかの解決すべき問題を残していた。

生簀網内の行動観察 生簀網内でのクロマグロの行動を観察するために幾つかの試みを行った。1996年にはFURUNO製スキヤニングソナーCH34を用い、仕切網内、生簀網内のクロマグロ魚群の行動観察を実施した²⁷⁾。また、ビデオによる行動観察も試みたが、いずれも、潜水による目視観察を補うほどの効果は認められなかった。

そこで、1999年にデータロガーをクロマグロに装着することによって生簀網内での遊泳行動の情報を一定期間連続的に得ることを目的として、遠洋水産研究所と共同で試験を実施した。供試魚には推定体重80～100kgの3歳魚を用いた。データロガー(LTD100, Lotek社製)は水温(精度:±0.2℃)、水深(精度:±5m)、照度を1分毎に約130日間記録するようにセットした。データロガーはナイロン製ダートタグに取り付けられたアクリル製ケース内に収納し、ケースは脱落したときに浮くように浮力調整した。装着は釣りで引き寄せたクロマグロに銚を用いて魚体背部に差し込むことによって行っ

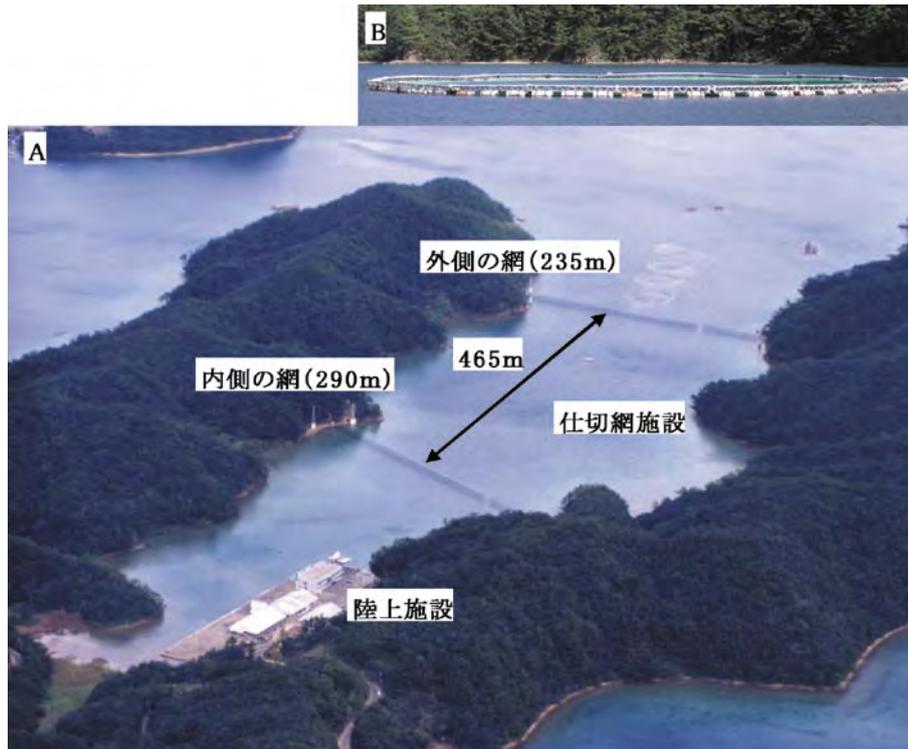


図4. 奄美栽培漁業センターにおけるクロマグロ親魚養成施設
A：センター施設全体 B：棒銅製直径40m円形笥

た。10月5日から7日にかけて各1尾、計3尾にデータロガーを装着し、その内、1尾で約1ヶ月間の行動を記録することができた。この個体について表層（0～5m）、中層（6～10m）、深層（11m以深）の日周行動の変化を解析したところ、装着後翌日から群れに加わって遊泳しているのが潜水観察され、2日目までは昼夜共に深層を遊泳し、3日目からは昼間中層～深層、夜間中層、21日目からは昼間中層から深層、夜間表層を遊泳していることが明らかとなった。24日目頃から昼間に急潜行、急浮上する行動が頻繁に記録され天然クロマグロで報告されている行動と類似していた*。

水中写真撮影（ニコノスRS、フィッシュアイレンズ）により生簀網内の生残尾数の推定を試みた。生簀網最深部から水面方向に数枚撮影し、映った魚を計数して、最大尾数を推定尾数とすることで大まかな推定は可能であった²⁷⁾。また、半導体レーザー（レーザー光間を3cmに設定）とVTRカメラを組み合わせ、魚体に映ったレーザースポット2点（2点間の距離は3cm）から魚体長の推定を試みた。魚体の向き、ビデオで視認できるスポットの強さ、同一個体を測定する可能性等の問題点はあったが、高い精度を求めないのであれば利用は可能と思われた²⁷⁾。

成長 奄美事業場での養成では11歳で最大581kgに

達するまでの成長が認められた。奄美事業場での養成クロマグロの成長は八重山事業場での成長と差が認められなかった（図8）。奄美事業場での10m水深の水温は12年間の平均で年間20.1～28.1℃の範囲にあり（図9）、八重山事業場の水温（図2）に比べると低いが、周年活発な摂餌行動が観察された。以上の結果から、奄美事業場の環境はクロマグロの成長に適した環境であると考えられた。

1999年には収容したヨコワ122尾の内51尾にワイヤーレスIDタグ（AVID社製）を装着し、同時に全長測定を行った。死亡時に回収されたIDから死亡するまでの日平均成長率を求めた²⁸⁾。収容時平均全長33.8cmの個体で、収容1～3ヶ月の日平均成長速度は2～3mmと推定された²⁸⁾。

成熟・産卵 1990～1999年の間にサンプリングや死亡により得られた魚の体重、生殖腺重量からGSIを求め、また一部の生殖腺は定法により薄片標本を作製してヘマトキシリン・エオシンによる二重染色を行い、顕微鏡下で成熟状態を観察した。雌のGSIは5～9月に比較的高く、比較的大型の卵巣卵を持った個体は6と9月でのみ確認されたが、卵黄球期に達した卵は1～9月下旬までの卵巣に認められた（図10）²⁹⁾。とくに、2002年9月30日に第三次卵黄球期の卵を持つ個体が認められた

* 升間主計，手塚信弘，小磯雅彦，鶴巻克己，神保忠雄，武部孝行，新田朗，山田陽巳，馬場徳寿（2000）データロガーを用いた生簀網内クロマグロの行動観察，平成12年度日本水産学会春季大会，p65.

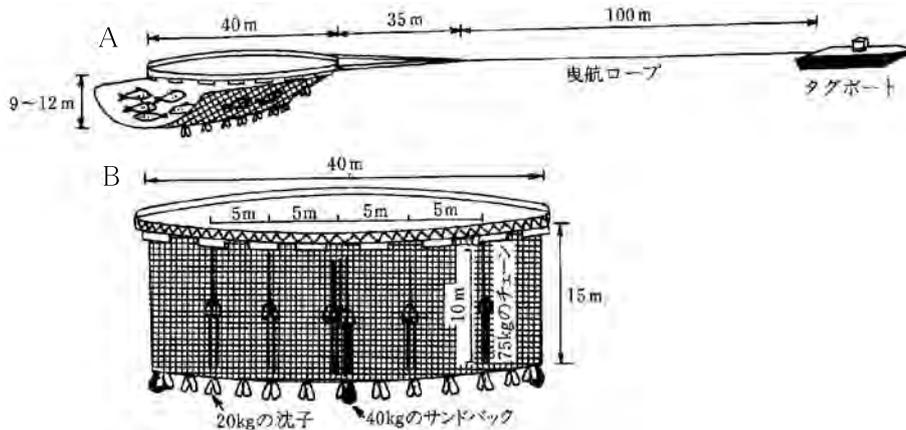


図 5. クロマグロの移動作業の概略 (升間²⁴⁾より引用)

- A 曳航時の筏, 生け簀網の形状と曳航方法
 B 生け簀網吹かれ防止のための錘装着状況

ことから, 10月以降の産卵の可能性が示唆された。雄では4~9月にGSIが高く, 雌のGSIが高い時期とほぼ一致した²⁸⁾。雄では取り上げ時に精液が流れ出る個体がしばしば観察された。しかし, 雌ではほとんどの個体でGSIが低く, 養成魚群の群成熟度(群れの全親魚尾数に対する成熟した親魚の割合, ここではGSIが1.0以上を成熟とした)が著しく低いことが示唆された(図10)²⁸⁾。

2004年収容群では太平洋群と日本海群の識別ができるように全個体にIDタグを装着し, また遺伝子解析用として胸鰭の一部を切り取って保存した。この養成の目

的は, 天然魚の成熟調査から太平洋群の産卵開始年齢が5歳, 日本海では3歳と推定されていたことから³⁰⁾, 海域による成熟の違いの有無を検証するために実施した。さらに, 先述したように養成魚の群成熟度が低かったため, 収容尾数を多くして成熟個体数を増すことで, 産卵の可能性を高めることを目的として実施したところ, 2004年群は3歳で産卵を開始した。また, 4~8月に雌5~6尾をサンプリングし, 卵巣の成熟を調査したところ, 日本海と太平洋で採取された個体間に成熟状態に差のないことが示唆された*。

1997年5月13日, 奄美の民間養殖業者から譲り受け

表 3. 奄美栽培漁業センターにおけるクロマグロ親魚候補魚の収容概要

年級	施設	種苗の入手		収容時				
		場所	時期 (年.月)	年月日	年齢	尾数	体重 (kg)	備考
2004	棒鋼製筏・円型生簀網 (直径40m, 深さ15m)	高知県沖	2004.8	2004.9.12	0	198	0.38	
		島根県隠岐	2004.10	11.13		251	0.60	
1999	高密度ポリエチレン製筏・ 円型生簀網 (直径20m, 深さ12m)	高知県沖	1999.8	1999.9.7	0	122	0.53	
1996	棒鋼製筏・円型生簀網 (直径40m, 深さ15m)	高知県沖	1996.8	1996.9.3	0	291	0.33	
1993	〃	沖縄県本部町の民間養殖業者	不明	1994.6.8	1	189	8.3	収容後約16ヵ月後に生残していた172尾の内95尾を仕切網へ移動し, 飼育を継続した。
	仕切網	〃	〃	1994.10.16	2	77	61*	
1990	棒鋼製筏・円型生簀網 (直径40m, 深さ15m)	鹿児島県奄美大島の民間養殖業者	不明	1994.11.5	4	45	90*	
1987・1988	〃	〃	不明	1997.3.23	8,9	17	250*	年齢組成は不明

*目視による推定体重

* 玄浩一郎, 武部孝行, 二階堂英城, 香川浩彦, 松原孝博, 澤口小有美, 東藤孝, 平松尚志, 原彰彦, 武部孝行, 井手健太郎, 塩澤聡, 西明文, 升間主計 (2008) クロマグロ高度化—奄美栽培漁業センターにおける養成3歳魚雌クロマグロの繁殖特性. 平成20年度日本水産学会春季大会, p238.

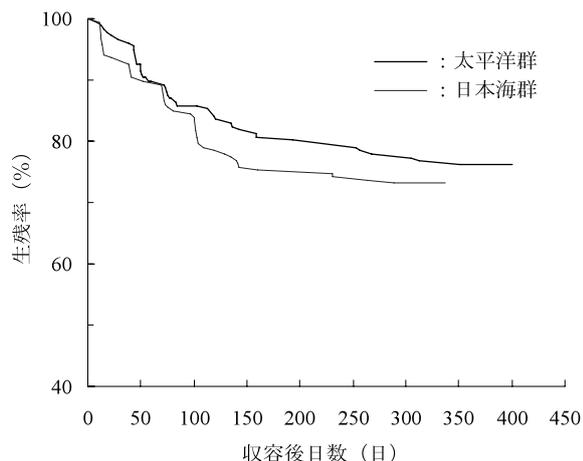


図6. 同じ生け簀網に収容時点で大きさが異なるクロマグロ養成2群の生残率の推移

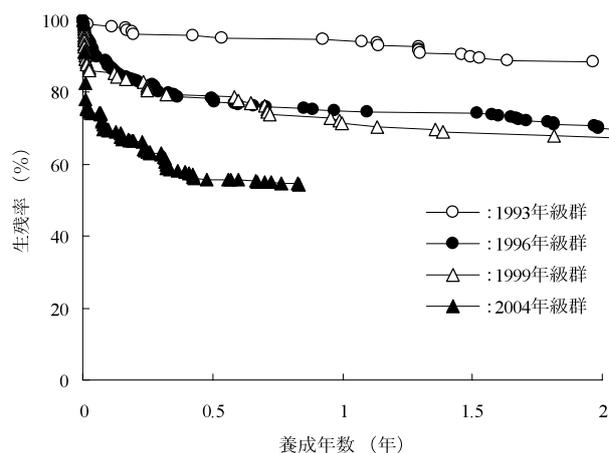


図7. 奄美栽培漁業センターにおけるクロマグロ養成親魚の収容から2年後までの生残の推移

た親魚群（1987，1988年群の混養）9・10歳魚で産卵が始まり，その後，5歳以上の各親魚群で毎年産卵が続いた（表4）。とくに，2002年に採卵数が最も多く，約5億粒を採卵した（表4）。産卵期間は，5月中旬から最も遅くまで産卵したケースでは11月初旬まで続いた（表4）。しかし，産卵ピークは6，7月と推測された。

本種の産卵生態に関して，これまでの産卵結果から多くの知見が明らかになってきている³¹⁾。産卵開始時期については，5月以降で23℃からの水温上昇が急であるほど産卵開始が早まり，産卵期間も延長し，逆に，水温上昇が緩慢であれば産卵開始時期が遅れ，長すぎる場合には，ほとんど産卵しない場合もありうることを示唆した³¹⁾。また20例の産卵例から，その内7例が9月以降も産卵し，4例は8月下旬まで産卵が続き，とくに，2001年では11月10日まで産卵が続いていること，産卵が終了した時に水温は産卵を開始した水温と同じ24.3℃であったことなどから，本種の産卵の終了が主に水温の下降と光周期の短日化にあることが想定されるが，短日化要因は水温の下降要因に比べて産卵抑制への影響が弱い可能性のあることが示された（表4）³¹⁾。卵径については，本種は最小で0.8mmサイズの小型卵を産卵し，卵径と水温には負の相関が認められ³¹⁾，産卵は17:31～23:36の時刻に行われ，さらに，産卵時刻と水温の間には一回帰で示される強い相関が認められた³¹⁾。

2001年からは，卵から抽出したmtDNAのD-Loop領域をPCR法で増幅し，そのPCR産物をRFLP（制限酵素断片長多型）法を用いて解析することで産卵雌を推定し，産卵雌毎に産卵生態の解明に取り組んだ。その結果，本種の多回産卵性，複数個体が同調して産卵に関与すること，数日間連続して産卵すること，同じ個体が6月から11月まで産卵していたこと等を明らかにした³²⁾。

3. 種苗生産

本種への種苗生産技術開発への取り組みは1993年から始まった^{33,34)}。1997年から奄美事業場で採卵が可能となるまで，日本配合飼料(株)内海水産バイオテクノロジー開発センター（現中央研究所海洋開発センター）（1993～1995年），マルハ(株)（1996）より卵を譲り受けて実施した。また，奄美栽培漁業センターでの産卵が不調であった年には拓洋(株)と近畿大学（2004，2005年）より卵の譲渡を受け，種苗生産試験を行った。

表5にこれまでの種苗生産結果の概要を示した³³⁻⁵⁵⁾。以下では初期飼育，海上飼育における各項目について，これまでの取り組み経過を取りまとめた。

ふ化仔魚・卵輸送 クロマグロ受精卵及びふ化仔魚は，ビニール袋（通称ウナギ袋，容量約15ℓ）に酸素と共に封入し輸送された^{32-40,42)}。高知県にある古満目事業場でふ化させた仔魚を3袋に収容し，29時間（着時水温27.5℃）を要して八重山事業場まで輸送したところ，到着時に若干海水の白濁は認められたが，死亡した仔魚はごく僅かで，合計0.67万尾のふ化仔魚を飼育水槽へ収容することができている³⁴⁾。この他の例では約3千～5.5千尾/ℓのふ化仔魚を15～17時間掛けて輸送している³⁴⁾。受精卵輸送とふ化仔魚輸送の比較では，数時間の輸送においても，ふ化仔魚輸送の方が高い生残が認められた³⁶⁾。

飼育海水 飼育海水にはろ過海水，またはこれをUV（紫外線）殺菌した海水が利用されていたが，2000年に奄美事業場でウイルス性神経壊死症（以下，VNN）による死亡が確認されたことから⁵³⁾，VNN防除対策として2002，2003年にUVの照射レベルをウイルスが殺菌可能とされている104μw・秒/cm²とし，また，電解装置（荏原実業製）によって得られたオキシダント殺菌処理海水を飼育水とする比較飼育試験を実施した^{54,55)}。これらの試験は全て上浦事業場（現養殖研究所病害防除部

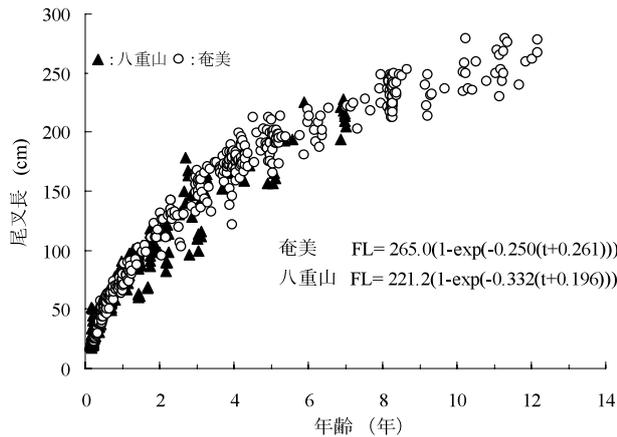


図8. 奄美、八重山で養成したクロマグロの成長
(図中の式は推定した von Bertalanffy の成長式を示す)

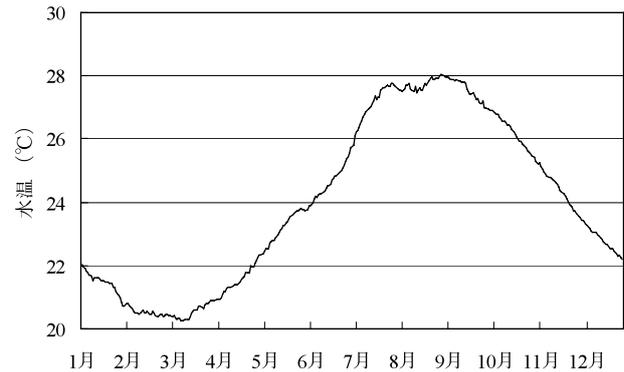


図9. 奄美における過去12年間の平均水温(水深10m)の推移

および浦栽培技術開発センター)の協力の下で実施された⁵³⁾。イソジンによる卵洗浄、UV殺菌海水による飼育例では、全てにおいてRT-PCR検査の結果VNNの発生またはNNVの陽性が認められた⁵⁶⁾。電解装置によるオキシダント卵洗浄、同処理海水での飼育を行い2003年の種苗生産では、Nested PCR検査でNNVが検出されたが、RT-PCR検査では検出されなかった⁵⁶⁾。2004、2005年は、RT-PCR検査で稚魚からNNVは検出されず(武部、今泉、未発表)、本方法によってVNNを防除できることが示唆された。

一方、今泉ら⁵⁷⁾は、オキシダント処理海水を用いたふ化管理は、活性炭処理後僅かに残留したオキシダントがふ化に影響を及ぼす危険性があることを指摘し、その残留量を常に把握する必要性を報告した。

飼育密度 ふ化仔魚の収容数は約1~3万尾/m³を目処として行ってきた⁵⁰⁾。しかし、VNNの発生を機に2003年以降では収容尾数を1万尾以下とするようになった⁵⁴⁾。

飼育水温 1994年に行った適正飼育水温試験(22, 24, 26及び28℃)では、全ての試験区において日齢7で0~5%までに生残率が低下したため、明瞭な結果は得られなかったが、26℃が適正水温と推定された³⁵⁾。一方、26℃に比べて28.5℃で飼育した仔魚でワムシ摂餌数が多く、成長も早かったという結果が得られている⁴⁹⁾。また、竹内⁴⁶⁾は水温29.1~30.6℃で飼育し、生残率0.22%、約1,400尾(平均全長24.2mm)の稚魚を育て、高水温下での飼育が可能であることを示した。

飼育照度 八重山事業場に比べて奄美事業場では、初期生残で低い傾向が認められていた。その違いを検討したところ、奄美事業場での水面照度が100~500lxであるのに対して八重山事業場では約5,000lxと高かった⁴⁹⁾。奄美事業場での飼育例を整理すると、日齢8の生残は800lx以下では5%以下と低く、それ以上では30%以上と高いことが明らかとなった^{49,58)}。このことから、

飼育初期の照度条件がクロマグロ仔魚の生残に強く影響することが示唆された⁴⁹⁾。

餌料系列 種苗生産の基本となる餌料系列を決定するために、ワムシ、アルテミア幼生、餌用ふ化仔魚、配合飼料、生餌(イワシシラス、イカナゴシラスの細片、ミンチ)の利用法(時期、種類、量等)、有効性について試験が実施された(表5)。手塚⁴¹⁾は開口(ふ化後3日)からふ化後8日の仔魚にS型(S区)またはL型ワムシ(L区)(近大株)を給餌し、生残、成長および日間摂餌量を調べた。その結果、L区で成長、生残ともに高く(8日目:L区平均全長4.92mm、生残率8.6%、S区4.66mm、1.7%)、摂餌量も体重に対する乾燥重量%でL区が49~66%、S区で21~48%とL区で高い値を示し、L型ワムシの有効性を示唆した⁴¹⁾。また、全長7~10mmの仔魚でイシダイ *Oplegnathus fasciatus* ふ化仔魚を十分に給餌した飼育例では生残が良好で、共食い行動の沈静化が観察されたが、給餌量が1/3~1/2と少なかった例では餌不足、共食いによる大量死亡が起こったことを観察した⁴¹⁾。竹内⁴⁰⁾はワムシに続く餌料系列としてアルテミア幼生、ふ化仔魚(ハマフエフキ *Lethrinus nebulosus*)、シラス、配合飼料について検討し、ワムシの後はふ化仔魚からシラスへ続く餌料系列が成長、生残ともに良かったことを示した。手塚⁴⁷⁾はアルテミア幼生を餌用ふ化仔魚と交互に1日5回に分けて給餌することによって餌用ふ化仔魚の不足を補うことができると述べている。また、手塚⁴¹⁾はクロマグロ仔魚のイシダイ仔魚摂餌数について求め、本種の飼育に大量のふ化仔魚が必要であることを示した。これらの結果から、クロマグロ種苗生産における餌料系列はL型ワムシ(近大株)→アルテミア幼生/ふ化仔魚→ミンチであろうと考えられている(手塚氏私信)。

手塚⁴²⁾は、クロマグロ仔魚がアルテミア幼生を摂餌する最小サイズが全長5.2mm、イシダイふ化仔魚の摂餌は全長6.5mmであることを報告し、餌料系列での各

餌料の給餌時期について示唆した。

栄養強化 ワムシについて市販の栄養強化剤4種を用いた比較飼育試験(2000年)⁴¹⁾では明確な結果が得られていない。また、ワムシのタウリン強化の効果試験が、現・東京海洋大学との共同研究により実施され(2002～2005年)(表5)、クロマグロ仔魚の初期の生残、成長に対してタウリンが有効であることが示された*。

通気方法・水流管理 本種の飼育初期、とくにふ化後10日目までの生残率が極めて低く、初期に安定して高い生残率を得るための技術開発は最重要課題として取り組まれてきた。開口までと開口後における流水・止水飼育^{44,51)}、飼育初期の通気量(微通気、約0.4ℓ/分・強通気、約3ℓ/分)⁴⁴⁾、通気方法(エアストーンの設定個数、エアブロック)^{47,51)}等の検討がなされた。なお、エアブロック方式とは約1mmの穴を約10cm間隔で開けた直径13mm、長さ1～2mの塩ビ製パイプを飼育水槽底面に同じ方向に向けて数カ所設置し、通気によって発生する泡を利用して水流を起こさせる方式である⁵⁹⁾。1997年に塩澤⁵⁹⁾はキハダの飼育においてエアブロック方式によって飼育水に水流を発生させ、ふ化後5日目で88%と高い生残率を得た。この成果を受けて、八重山⁴⁵⁾、奄美^{46,50,53)}(2004, 2005年, 武部・二階堂未発表)においてエアブロック方式による飼育試験が実施された。また、2000年の0.5m³水槽での飼育試験で、夜間に仔魚が沈下する現象が観察された(升間, 未発表)。経験的に夜間に減耗することが知られていたことから、その原因が仔魚の沈下にあると推察された。そこで、仔魚の沈下を防止するため、慶徳ら⁶⁰⁾がマガダイの飼育に用いた方法を参考にし、換水用ネットの中に設置した水中ポンプによって吸い上げた飼育水を、直径40mmのホース

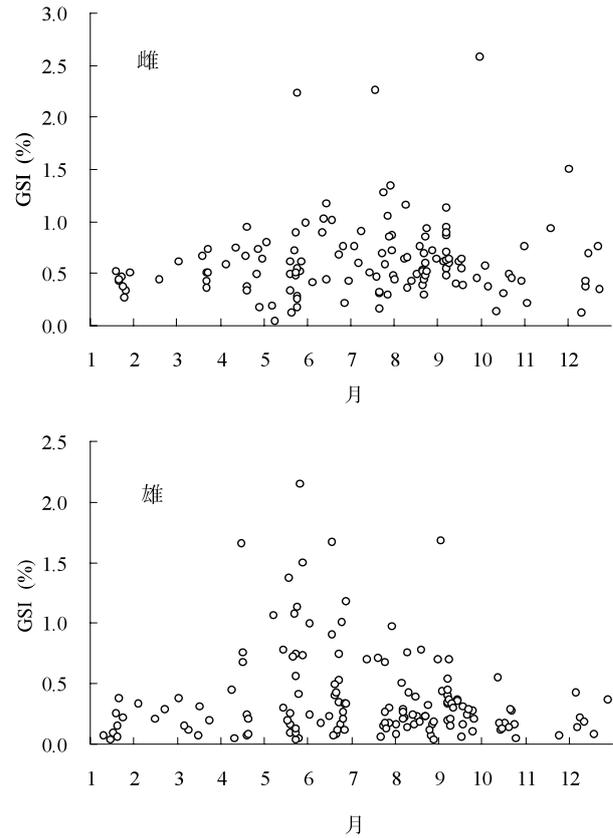


図10. 奄美栽培漁業センターにおける養成クロマグロの成熟(升間²⁹⁾を改変)

から水槽底に直交させた2本のパイプ(同じ方向に約7.5cm間隔で直径1.5mmの穴を穿った約2mの塩ビ製パイプ)に通し、その穴から吐出させることで巡流を発生させる方法(以下、水中ポンプ方式)が試みられ

表4. 奄美栽培漁業センターにおけるクロマグロ採卵結果

年	産卵群(生簀網)数	年齢	産卵期間	親魚尾数 ^{*1}	総採卵数(×10 ⁴ 粒)	平均浮上卵率(%)	平均正常ふ化率(%)
1997	1	9,10	5.13～7.12	17	433	99.1	83.3
1998	3	5,10,11	5.23～8.24	7～48	19,121	98.1～100	83.6～91.1
1999	3	6,11,12	5.27～9.14	3～73	4,258	93.3～97.6	58.3～83.9
2000	2	7	6.10～10.27	35, 68	4,212	96.6～99.2	72.9～81.3
2001	3	5,8	5.25～11.10	32～96	1,633	87.7～97.1	79.6～82.9
2002	3	6,9	5.13～9.29	22～75	48,212	88.8～94.9	76.0～86.3
2003	3	7,10	5.19～8.26	10～65	6,482	96.0～94.4	65.4～78.8
2004	4	5,11	6.6～7.18	2～55	707	100	65.1～69.6
2005	3	6,12	7.15～7.16	12～40	8	100	85.2

*1 産卵を開始した日付での生残尾数。

* 高木康太・竹内俊郎・二階堂英城・武部孝行・今泉均・井手健太郎・升間主計・高橋隆行(2005) タウリン強化ワムシのクロマグロ仔魚への給餌効果。平成17年度日本水産学会大会, p101.

表 5-1. 水産総合研究センター (旧日本栽培漁業協会) におけるクロマグロの種苗生産の概要

年	センター(事業場)名	使用水槽	収容			飼育方法			取り上げ			備考
			事例数	ふ化仔魚数(万尾)	水温(℃)	試験内容	事例数	日齢(日)	尾数(尾)	生残率(%)	平均全長(mm)	
1993	上浦	100kℓ	1	8	24.0	100m ³ 水槽では4日齢から換水、エアリフトによって弱く回転	-	-	-	-	-	日本配合飼料(株)内海水産バイオテクノロジー開発センターより卵を譲り受けた。
		0.5kℓ	2									
1994	八重山	5kℓ	5	6	24.0~25.0	流水、止水飼育の比較	-	-	-	-	-	輸送時間は1回目29時間、2回目以降が14時間であった(計4回輸送)。
		0.1, 0.5kℓ	22									
1994	上浦	25, 100kℓ	3	36	24.0~26.0	適水温試験 (22, 24, 26, 28℃) 初期餌料試験(ワムシ、天然コベ+ワムシ)	2	24	58	0.13	18.3	日本配合飼料(株)内海水産バイオテクノロジー開発センターより計5回卵を譲り受けた。輸送卵密度830~4,770粒/尾。
		0.1, 0.5kℓ	21				34	4	0.002	33.8		
1995	奄美	5kℓ	1	3	24.0~26.0	水温24.9℃に調整して飼育、餌料系列ワムシ→アルテミア(幼生、養成)およびスズメアブラ卵→配合飼料を給餌、全長10mm前後に分槽	1	40	59	0.2	25	輸送時間は約15時間であった(計1回輸送)。密度は約1,500尾/尾。
		1, 5kℓ	3	8	24.4~29.6	餌料系列 (S型ワムシ, アルテミア幼生)	-	-	-	-	-	日本配合飼料(株)中央研究所海洋開発センターより計2回卵を譲り受けた。
1995	八重山	0.5kℓ	3									
		5kℓ	3	13	25.2~29.2	飼育水温比較 (冷却調温区、自然水温区 28~30℃)、ホルモン処理→生残・成長はホルモン区>自然水温>昨年(24.9℃区)>冷却調温区	3	23~32	7	-	-	卵の由来は同上。
1996	奄美	50kℓ	3	217	27.3~29.0	餌料系列の改善ワムシL, S型比較, ワムシ・ふ化仔魚の摂餌量推定, 沖出しハンドリング試験, 沖での死亡時刻の推定, 経口ALC投与試験	2	22, 26	771	0.18, 0.02	31.5, 35.9	(株)マルハより卵を計2回譲り受けた。
		5kℓ	8				2	21, 27	68	0.05, 0.05	20.0, 43.4	
1997	八重山	1kℓ	5	7.6	25.0~28.0	餌料系列の把握(アルテミア→配合、仔魚→シラス又は配合)、飼育水温試験(25, 28℃)、衝突防止試験(生實網、ブルーシート、エアカーテン)	3	26	85	0.12~0.29	26.3	(株)マルハより卵を譲り受けた。
		4kℓ	2	5.5			2	24, 29	402	0.47, 0.94	25.8, 21.4	
1997	奄美	50kℓ	4	453.3	24.6~27.8	仔魚の摂餌開始サイズはアルテミアでTL 5.2m	2	30	158	0.003, 0.008	41.6	奄美事業場での採卵に成功した。
		1, 5kℓ	17	220.6		m.ふ化仔魚でTL 6.5mm, ふ化から開口までの飼育管理(通気量+遮光, 自然光), 飼育水槽に衝突死防止用シートを設置, 選別	0					
1997	八重山	60kℓ	1	45	-	ふ化後11日目に全滅	-	-	-	-	-	奄美事業場より卵を輸送した。

表 5-2. 水産総合研究センター（旧日本栽培漁業協会）におけるクロマダグロの種苗生産の概要

1998	奄美	50kℓ	16	2,556	25.3～29.5	通気方法（エアブロック、エアストーン）、餌料系列（S.L.ワムシ・ふ化仔魚）、アルテミア給餌法の改善、仔魚の代謝量の測定、顎損傷防止への衝突防止シートの効果、海上飼育での網地比較（ゴース、テトロンフラックセル、モジ網）	8	27～39	11,813	0.01～0.26	29.9～69.4	仔魚の基礎代謝に関する研究では広島大学難波教授との共同研究として開始した。
	八重山	60kℓ	3	161	27.3～30.2	エアブロックで回流水流発生、TL8mmまでワムシ単独給餌、ふ化仔魚不足による減耗、2次飼育にゴースネット使用、海上生簀網に下顎の損傷を防止するための目合い比較試験(24節網、側網24節×底網220径)	2	25, 26	4,857	0.22, 0.63	24.2, 28.3	前年成功したキハダの種苗生産方法の再現を目的として実施された。
1999	奄美	50kℓ	9	761	26.1～29.0	飼育法の改善として収容方法比較（ふ化仔魚または卵収容）、流水飼育、ワムシ→ふ化仔魚給餌飼育、飼育照度の検討、I型ワムシ餌量推定、酸素消費・アンモニア態窒素の排出量測定、海上飼育用網生量の検討(側網200径、底網24節または200径)	4	32～38	1,016	0.009～0.05	49.4～68.8	以降、奄美事業場のみでクロマダグロの種苗生産技術開発は進められた。
2000	奄美	50kℓ 6kℓ	13 1	16,349	24.4～27.8	適正な餌料系列の開発（ワムシ栄養強化剤）、飼育管理手法（エアストーンの個数/水槽、換水方法）	1	33	103	0.007	63.3	NNVの感染が初めて確認された。
2001	奄美	50kℓ	11	556	-	シブへの早期餌付試験、微粒子配合飼料給餌試験、水中ポンプ方式を利用した巡流飼育、遮光と自然光飼育の比較、感震器官と行動の関連研究、上浦栽培漁業センターとの共同研究としてVNNN防除技術開発試験を開始	1	32	1,030	0.15	27.9	インジゲンによる卵洗浄を実施、配合飼料試験では東京水産大学、仔稚魚の感震器官と行動の関連について広島大学、鹿児島大学との共同研究が開始した。
2002	奄美	50kℓ	23	552	24.1～28.5	ワムシのタウリン強化の有効性、VNNN防除対策技術の開発（UV照射レベの改善、電解装置によるオキシダント処理海水の利用、インジゲンとオキシダント卵洗浄、目化石添加、低密度）、ポンプ・エアブロックによる巡流飼育の比較、天然幼魚と人工魚の外形状態の比較	2	29 28	1,300 537	0.3□0.3	21□33	全ての飼育例でVNNNが発生し、しかも早期発生した。
2003	奄美	50kℓ	4	1,319	24.1～28.5	ワムシのタウリン強化濃度試験、仔稚魚の脂質、蛋白、グリコーゲン分析、VNNN防除(オキシダント海水利用、卵発生と消毒時期の検討)、明(昼)・暗(夜)期の仔魚の成長	2	22～23 29	4,191 2,430	1.8□1.2	29.6□40.9	電解装置によるオキシダント処理海水を用いた飼育例でのみ、NNVが陰性となった。
2004	奄美	50kℓ	7	287	-	タウリンの有効性、餌料系列試験(ワムシ、アルテミアのみで19日齢(10.3mm))、ワムシ日間摂餌量の再調査、水流発生法の比較(水中ポンプ、エアブロック)、仔魚の生残に及ぼす乱流の影響	4	28～36	2,290	0.04～0.32	28.4～48.1	奄美での産卵が不調であったことから、近畿大学から2回、(株)拓洋から3回の卵の卵の譲渡を受けた。 東京大学海洋研究所と乱流に関する研究を開始。
2005	奄美	50kℓ	6	405	27.8～29.2	巡流とエアブロック飼育の比較、ワムシタウリン強化試験、飼育水の乱流強度が生残、摂餌に及ぼす影響	5	26～30	3,177	0.06～0.14	27.6～44.4	奄美での採卵が不調であったことから、近畿大学から1回、(株)拓洋から5回卵を譲り受けた。

た⁵¹⁾。その結果、日齢5の生残率は対照区（エアレーション7個設置）4.7%（0.5～13.0%）に比べて巡流区は91.0%（55.0～100%）と高く、初期の生残率の向上が認められた⁵⁷⁾。その後、エアブロック方式、エアレーション方式（エアレーションのみを行った方式）との比較^{50,51,53)}、2005年にエアブロック方式と水中ポンプ方式での比較飼育を行ったところ、水中ポンプで巡流を起こした飼育で明らかに初期の生残率が向上するのを確認した（図11）（武部、未発表）。

衝突防止 稚魚期に入り遊泳力が増すと水槽壁面への衝突による死亡が観察された。八重山事業場では全長5～6 cmの稚魚を用いて、60 kℓ水槽内に直径5 m×深さ1.8 mの生簀網区（水槽内に生簀網を設置した区）、エアレーションカーテン区（水槽壁面に沿って穴を開けた塩ビパイプを設置し、通気することで泡を発生させ、壁面に稚魚が近づかないように意図した区）及びブルーシート区（水槽壁面に沿ってポリエチレン製シートを張った区）を設けて衝突死防止試験を実施したところ、ブルーシート区で衝突死防止効果が高く、エアレーションカーテンでは衝突死防止効果が認められなかった⁴⁰⁾。また、水槽内に衝突時の衝撃を緩和する衝突死防止幕（壁はポリエチレン製ブルーシート、底は塩化ビニール製）を取付けた飼育を実施し^{44,47,49)}、顎に損傷のある稚魚の出現率が衝突死防止幕を設置した飼育例で平均2.5%であったのに対し設置しなかった飼育例では平均23.1%と大きな違いが認められた⁴⁷⁾。しかし、幕から仔魚が漏れ出る事例や幕のシワにふ化仔魚がトラップされて蝟集し、死亡するなどの事例が発生したことから、2000年以降の飼育から使用を中止した⁵¹⁾。

沖出し方法 陸上水槽から取り上げ、海上生簀網へ収容するまでのハンドリング（稚魚をタモ網またはバケツで掬い取り、移す操作）は沖出し後の生残に大きく影響する。取り上げから収容までバケツでの輸送を含めると3～4回のハンドリングを行っていた1996年⁴²⁾、1997年⁴⁵⁾では沖出し翌日の死亡率はそれぞれ9.7～75.9%と17.9%であった。1998年には小型クレーンを利用してハンドリング回数を2回としたところ、翌日の死亡率は3.8～16.3%にまで低くすることができた⁴⁸⁾。

海上飼育 海上での飼育試験への取り組みは1996年から始まり、沖出し後初期の大量減耗および飼育中に増加する下顎（歯骨）の損傷（左右の歯骨が外れ、片方または左右に開いた状態となる：以下、下顎損傷）の発生が問題となった⁴⁰⁾。発生のメカニズムとしては摂餌行動等によって生簀網に稚魚が衝突し、網目に掛かった下顎歯を外すために稚魚が暴れて下顎を損傷していることが観察により明らかとなった。1996年と1997年の海上飼育において、生簀網の目合をそれぞれ160径（約3 mm角）と120径（約4 mm角）にした結果、1997年は1996年に比べて下顎損傷個体が約2倍出現し、目合が下顎損傷の原因と推察された⁴⁵⁾。生簀網の大きさ、目

合について検討したところ、200径（約2.4 mm角）以下の目合の生簀網で飼育することで下顎損傷の出現率を低くできることが明らかとなったが、目合が小さいと汚れによる目詰まりを起こしやすく、酸素欠乏による大量死亡が懸念された⁴⁸⁾。そこで、1999年には底面網を24節（約6 mm角）、側面網を200径とした生簀網を製作し、全面200径の生簀網での飼育と比較したところ、生残率、下顎損傷の発生率は底面24節の網でそれぞれ45.6、3.5%、全面200径の網で38.3、7.3%と生残、下顎損傷率ともに底面24節網で良好な結果が得られた⁵⁰⁾。また、同じ収容密度（2.4～2.5尾/m³）にした直径5 mと10 mの生簀網での飼育試験では、生残、下顎損傷出現率ともに広い10 m生簀網で良好な結果が得られ、生簀網の広さがクロマグロ稚魚を海上で育てるために重要なポイントであることが示された⁴⁸⁾。

生簀網内での稚魚の死亡時刻について小磯⁴²⁾は、死亡個体の出現が朝6～9時の間に多く、生簀網内照度が0.1 lxから1.11 lxに変化するときに2尾の稚魚が生簀網に衝突して死亡したのを確認したことから、夜明け時に網への衝突死が起りやすくなっていることを示唆し、理由としては、早朝の急な照度の変化と強い空腹が強いストレスになると推測した⁴²⁾。さらに、鹿児島大学川村軍蔵教授との共同研究により、早朝に起る網膜運動反応において網膜適応の不調和が視覚的な方向感覚の喪失を引き起こすことが衝突の原因の一つであることを明らかにした⁶²⁾。

海上飼育での稚魚への給餌回数については、手塚ら⁶³⁾は1日4回程度が適当であると述べている。

奄美栽培漁業センター地先ではメジロザメ科のツマガロ *Carcharhinus melanopterus* が多く、とくに1998年には生簀網を食い破って侵入するケースが延べ5回起った⁴⁸⁾。原因は死亡して底に沈下したクロマグロ稚魚を、網の外から食べようとしたサメが網を食いちぎって侵入したものと考えられた。その後、底網を2重にするなどの対策を実施し、サメの被害は防止できたものの、網替えなどの作業性が悪く、この方法は実用性に欠けた。

放流 1998年9月14日にダート型標識を装着した全長30 cmの幼魚111尾⁴⁸⁾、1999年10月28日に同じ標識を装着した尾叉長約36 cm（体重約1.1 kg）の幼魚30尾をセンター地先に放流した⁵⁰⁾。2005年10月6日には全長31 cm、141尾を奄美大島東部の沖合に放流した。しかし、これまでに再捕された例はない。

4. その他

クロマグロ養成技術交流会 1991年に水産庁振興部開発課主催、日本栽培漁業協会後援として、第一回クロマグロ養成技術交流会が開催され、9機関が参集した。本会は国内または外地でマグロに関わっている日本の機関が集まり、意見交換を行うことで、親魚養成、仔稚魚

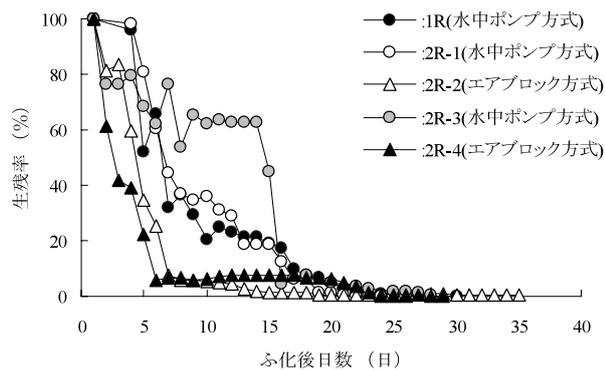


図 11. クロマグロ仔魚の飼育管理における水流発生法（水中ポンプ方式，エアブロック方式）の違いによる生残率の比較（武部，未発表）

飼育技術，養殖技術等々の技術開発を進展させることを目的とした。なお，1992年からは旧日本栽培漁業協会が主催となり現在までに18機関が参加し毎年開催されている。

栽培漁業研究と養殖研究 近畿大学では生簀網での採卵の成功から26年目に完全養殖に成功した。近畿大学は本種の種苗生産技術の先駆的研究，技術開発を現在も進め，その成果は「近大マグロ」，「完全養殖マグロ」のブランド名で人工種苗による養殖魚の生産・出荷にまで達している。一方，日本栽培漁業協会では放流種苗の生産に向けた技術開発を進め，親魚養成と共に放流種苗の遺伝的多様性を維持するための技術開発に取り組んできており³²⁾，両者の取組みは親魚養成，種苗生産技術開発の面で共通しているが，方向性を異にしていると考えられている。しかし，水産総合研究センターでは2007年2月にバーチャル研究所として「まぐろ研究所」を設立し^{*}，資源研究から経営，流通，加工および増養殖研究に及ぶ広範囲な研究領域へ取組みを広げることとして，クロマグロへの取組みは養殖産業への貢献を含めて実施されるようになってきていることから，両者の研究は大きく重なってきている。

5. 今後の課題

本技術開発史で述べたように親魚群の低い成熟率と産卵を開始する環境が，クロマグロの安定採卵に向けた親魚養成でポイントとなるであろう。しかし，数多くの親魚を維持するためには，施設，餌代，管理費等に多額の費用を必要とする。EU，オーストラリアが本格的にクロマグロ，ミナミマグロの催熟，採卵技術開発に参入しているなかで，日本の技術を確認たるものとし，優位性を維持するためには，産官学による，より一層の協力体制の下で進められるべきであると考えられる。

一方で2004年から4年間の計画で農林水産技術会議

の事業である「マグロ類の人工種苗による新規養殖技術の開発」への取り組みが産官学によりスタートした。このなかで，成熟・産卵に関する知見がさらに増し，安定採卵に向けた方向性は確立されるであろう。しかし，種苗生産に関する技術については，その技術開発に困難さを極めているのが現状である。本報告で述べてきたように，これまでの取り組みで本種特有の問題（初期減耗，共食い，衝突死等）について一定の知見が得られているものの，量産化に向けたレベルに達するためには解決すべき多くの問題が残されていると考える。今後，これまでの成果を下に本事業のなかで養殖種苗あるいは放流種苗としてクロマグロ稚魚の生産数を増大させるための技術開発の進展が期待される。

謝 辞

1985年10月から2005年10月までの20年間，日本栽培漁業の時代から水産総合研究センターまで一貫してクロマグロの親魚養成，種苗生産技術開発に関わってきたことから，今回の技術史の取りまとめの執筆を担当することとなった。これまで日本栽培漁業協会本間昭郎専務（当時），須田 明常務（当時）には，本種技術開発の大きな道筋を示して頂き，また，八重山事業場時代には伏見浩場長（現福山大学教授），石橋矩久場長（当時）をはじめ多くの上司，職員の方々に手助けして頂いたことに深謝の念を表す。また，奄美では手塚信弘主任技術開発員，小磯雅彦主任技術開発員（現能登島栽培漁業センター）には奄美でのゼロからのスタートを共に苦労し，また，その他の職員，関係者の協力の下で今の奄美栽培漁業センターの礎を築いてきた。本来ならば共著とすべき方も居られるが，余りにも多くの方々の協力によって得られた成果であることから，本報では謝辞とさせて頂いたことをご了解頂きたい。併せて，これまでのご努力に深甚な謝意を表したい。また，近畿大学熊井英水教授，宮下 盛教授には多くの点で貴重な情報，指導を頂き，また，熊井教授，日本配合飼料(株)石田 明参事，マルハ(株)草野 孝取締役，(株)拓洋山本宇宙社長には貴重なクロマグロの卵を快く譲って頂いたことに，厚くお礼を申し上げたい。

最後に本技術史を纏めるに当たり，纏まりのない文章を懇切丁寧に査読して頂いた査読者の方々にお礼を申し上げます。

文 献

- 1) 鈴木治郎（2005）まぐろ・かつお類の漁業と資源調査（総説）。「平成16年度国際漁業資源の現況」（水産庁・水産総合研究センター編），東京，pp.23-27.

* まぐろ研究所 (<http://tuna.fra.affrc.go.jp/>)

- 2) 農林水産技術会議事務局 (1989) 広域回遊性浮魚の資源増大をめざして—クロマグロの資源増大—。「海洋牧場」(農林水産技術会議事務局編集), 恒星社厚生閣, 東京, pp.8-59.
- 3) 宮下 盛 (2002) クロマグロの種苗生産に関する研究. 近大水研報, 8号, 1-171.
- 4) 本間昭郎 (1995) マグロ増養殖技術開発への取り組みとその周辺. さいばい 社団法人日本栽培漁業協会, No.76, 9-13.
- 5) 岡 雅一 (1986) クロマグロ. 日本栽培漁業協会事業年報 (昭和 60 年度), 日本栽培漁業協会, 53-56.
- 6) 岡 雅一 (1988) クロマグロ. 日本栽培漁業協会事業年報 (昭和 61 年度), 日本栽培漁業協会, 55-57.
- 7) 岡 雅一 (1989) クロマグロ. 日本栽培漁業協会事業年報 (昭和 62 年度), 日本栽培漁業協会, 47-48.
- 8) 兼松正衛 (1990) クロマグロ. 日本栽培漁業協会事業年報 (昭和 63 年度), 日本栽培漁業協会, 61-62.
- 9) 兼松正衛 (1992) クロマグロ. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 2 年度), 日本栽培漁業協会, 63-65.
- 10) 升間主計 (1994) クロマグロ. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 4 年度), 日本栽培漁業協会, 51-52.
- 11) 升間主計 (1993) クロマグロ. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 5 年度), 日本栽培漁業協会, 50-53.
- 12) 升間主計 (1988) クロマグロ. 日本栽培漁業協会事業年報 (昭和 61 年度), 日本栽培漁業協会, 54-57.
- 13) 岡 雅一 (1996) クロマグロ (1) 八重山事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 6 年度), 日本栽培漁業協会, 45-47.
- 14) HARADA, T. (1978) Recent tuna culture research in Japan. 5th Intl. Ocea. Develop. Pre print (1), C 1-55.
- 15) 広田仁志・生田敬昌・森田正一 (1976) クロマグロの養成について. 栽培技研, 5 (1), 1-9.
- 16) 荒牧孝行・北上一男・九万田一己 (1974) クロマグロ (ヨコワ) の養殖試験. 昭和 49 年度鹿児島県水産試験場事業報告, 1-6.
- 17) 荒牧孝行・九万田一己 (1975) クロマグロの養殖試験. 昭和 50 年度鹿児島県水産試験場事業報告, 1-6.
- 18) 荒牧孝行・九万田一己 (1976) クロマグロの養殖試験. 昭和 51 年度鹿児島県水産試験場事業報告, 8-17.
- 19) 荒牧孝行 (1980) クロマグロの養殖. '80 栽培漁業技術開発セミナー, 1-9.
- 20) 椿 智欣 (1981) マグロ養殖の試み. 伊豆分場だより, 202, 16-18.
- 21) 升間主計, 岡雅一, 兼松正衛, 手塚信弘, 照屋和久, 伏見浩, 石橋矩久 (1991) 八重山における養成クロマグロの摂餌と成長. 栽培技研, 20, 35-40.
- 22) 升間主計 (1992) クロマグロ. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 4 年度), 日本栽培漁業協会, 51-52.
- 23) 升間主計, 手塚信弘, 二階堂英城, 武部孝行, 井出健太郎 (2004) 2つの飼育方法を用いた奄美大島でのクロマグロ *Thunnus thynnus orientalis* の養成. 水研センター技報, 1, 19-26.
- 24) 升間主計 (1994) クロマグロ. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 6 年度), 日本栽培漁業協会, 47-49.
- 25) 尾花博幸 (2003) 奄美事業場 3 クロマグロのハンドリング技術の開発. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 13 年度), 日本栽培漁業協会, 446-450.
- 26) 尾花博幸 (2003) 奄美事業場 3 クロマグロのハンドリング技術の開発. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 14 年度), 日本栽培漁業協会, 367-369.
- 27) 山崎英樹, 升間主計 (1996) 仕切網, 生簀網の行動モニタリング手法の開発. 平成 8 年度奄美事業場報告, 81-82.
- 28) 升間主計 (2001) クロマグロ. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 11 年度), 日本栽培漁業協会, 82-90.
- 29) 升間主計 (2006) クロマグロ・キハダの親魚養成と産卵生態に関する研究. 九州大学学位論文, 1-197, 口絵 I - II
- 30) TANAKA, S. (2005) Maturation of Bluefin Tuna in the Sea of Japan. ISC PBF-WG/06/ Doc.9. 7 pp.
- 31) 升間主計・手塚信弘・小磯雅彦・神保忠雄・武部孝行・山崎英樹・尾花博幸・井手健太郎・二階堂英城・今泉 均 (2006) 養成クロマグロの産卵に及ぼす水温の影響. 水研センター研報, 別冊 4 号, 157-171.
- 32) 升間主計, 手塚信弘, 尾花博幸, 鈴木伸明, 野原健司, 張成年 (2003) ミトコンドリア DNA 分析から推定した養成クロマグロの産卵生態. 水研センター報告, 6, 9-14.
- 33) 兼松正衛 (1995) K-9 クロマグロ (1) 上浦事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 5 年度), 日本栽培漁業協会, 185-187.
- 34) 手塚信弘 (1995) K-9 クロマグロ (2) 八重山事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 5 年度), 日本栽培漁業協会, 187-189.
- 35) 高橋庸一 (1996) K-10 クロマグロ (1) 八重山事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 6 年度), 日本栽培漁業協会, 165-166.
- 36) 小磯雅彦 (1996) K-10 クロマグロ (2) くらまぐろ奄美基地. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 6 年度), 日本栽培漁業協会, 166-167.
- 37) 手塚信弘 (1996) クロマグロ (2) くらまぐろ奄美基地. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 6 年度), 日本栽培漁業協会, 167-169.
- 38) 高橋庸一 (1997) K-10 クロマグロ (1) 八重山事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 7 年度), 日本栽培漁業協会, 187-189.
- 39) 手塚信弘 (1997) K-10 クロマグロ (2) くらまぐろ奄美基地. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 7 年度), 日本栽培漁業協会, 189-191.
- 40) 竹内宏行 (1998) K-10 クロマグロ (1) 八重山事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 8 年度), 日本栽培漁業協会, 185-186.
- 41) 手塚信弘 (1998) K-10 クロマグロ (2) 奄美事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 8 年度), 日本栽培漁業協会, 186-196.
- 42) 小磯雅彦 (1998) クロマグロ (2) 奄美事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 8 年度), 日本栽培漁業協会, 196-199.
- 43) 竹内宏行 (1999) K-10 クロマグロ (1) 八重山事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 9 年度), 日本栽培漁業協会, 201.
- 44) 手塚信弘 (1999) K-10 クロマグロ (2) 奄美事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 9 年度), 日本栽培漁業協会, 201-205.
- 45) 小磯雅彦 (1999) クロマグロ (2) 奄美事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 9 年度), 日本栽培漁業協会, 205-206.
- 46) 竹内宏行 (2000) K-10 クロマグロ (1) 八重山事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 10 年度), 日本栽培漁業協会

- 会, 204-209.
- 47) 手塚信弘 (2000) K-10 クロマグロ (2) 奄美事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 10 年度), 日本栽培漁業協会, 209-214.
 - 48) 鶴巻克己・小磯雅彦 (2000) クロマグロ (2) 奄美事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 10 年度), 日本栽培漁業協会, 215-220.
 - 49) 手塚信弘 (2001) クロマグロ (1) 奄美事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 11 年度), 日本栽培漁業協会, 185-191.
 - 50) 鶴巻克己 (2001) クロマグロ (1) 奄美事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 11 年度), 日本栽培漁業協会, 192-194.
 - 51) 手塚信弘 (2002) 奄美事業場. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 12 年度), 日本栽培漁業協会, 379-383.
 - 52) 手塚信弘 (2003) 奄美事業場 4 クロマグロの種苗生産技術の開発. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 13 年度), 日本栽培漁業協会, 450-454.
 - 53) 西岡豊弘 (2003) 上浦事業場 (6) クロマグロの種苗生産過程で発生した VNN. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 13 年度), 日本栽培漁業協会, 319-322.
 - 54) 手塚信弘 (2003) 奄美事業場 4 クロマグロの種苗生産技術の開発. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 14 年度), 日本栽培漁業協会, 369-376.
 - 55) 手塚信弘・武部孝行 (2003) 奄美事業場 4 クロマグロの種苗生産技術の開発. 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 15 年度), 日本栽培漁業協会, 142-143.
 - 56) 手塚信弘, 升間主計, 武部孝行, 二階堂英城, 井出健太郎 (2004) クロマグロ種苗生産におけるオキシダント処理海水のウイルス性神経壊死症 (VNN) への防除効果. 水研センター技報, **1**, 76-79.
 - 57) 今泉 均, 武部孝行, 二階堂英城, 井出健太郎, 升間主計 (2006) 海水中に残留した微量オキシダントがクロマグロ受精卵のふ化に及ぼす影響. 水研センター技報, **5**, 34-38.
 - 58) 手塚信弘, 升間主計, 小磯雅彦, 武部孝行, 二階堂英城, 井出健太郎 (2005) クロマグロ仔魚の生残に及ぼす照度と水流の効果. 水研センター技報, **3**, 41-44.
 - 59) 塩澤 聡 (1999) K-11 キハダ (八重山事業場). 日本栽培漁業協会事業年報 (平成 9 年度), 日本栽培漁業協会, 206-211.
 - 60) 塩澤 聡・竹内宏行・廣川 潤 (2003) カンパチの種苗生産方法の改良. 栽培技研, **31**, 11-18.
 - 61) 慶徳尚壽・升間主計・勝山明里 (1981) 150m³ 水槽によるマダイの種苗生産についてⅢ 飼育水の水作りと攪拌の効果の検討. 水産増殖, **29** (1), 13-19.
 - 62) MASUMA, S, G. KAWAMURA, N. TEZUKA, M. KOISO, T. JINBO, K. NAMBA (2001) Retinomotor responses of juvenile bluefin tuna *Thunnus thynnus*. *Fish. Sci.*, **67**, 228-231.
 - 63) 手塚信弘, 升間主計, 武部孝行, 二階堂英城, 井出健太郎 (2004) クロマグロ稚魚の適正給餌回数. 水研センター技報, **2**, 51-54.

水産総合研究センター（旧日本栽培漁業協会）によるクロマグロ栽培漁業技術の開発
升間主計

水産総合研究センター（旧日本栽培漁業協会）八重山事業場では1985年から1997年まで沖縄県石垣島においてクロマグロの親魚養成・種苗生産技術開発を行った。幼魚は活魚船によって長距離（1,300～1,500km）、長時間（74～113時間）輸送され、親魚養成されたが、産卵には至らなかった。亜熱帯海域での成長は本土に比べて極めて早いことを示した。奄美栽培漁業センターは鹿児島県奄美大島において1994年から取り組みが始まった。1997年から毎年産卵に成功している。そのなかで、養成下での本種の産卵生態、行動に関する研究を進め多くの知見が得られた。また、種苗生産では餌料系列、飼育水管理、VNN防除法等に関する技術開発が進められた。本報は、日本栽培漁業協会・水産総合研究センターの研究開発によって得られた20年間の成果について取り纏められた。

水産技術, 1(1), 21-36, 2008