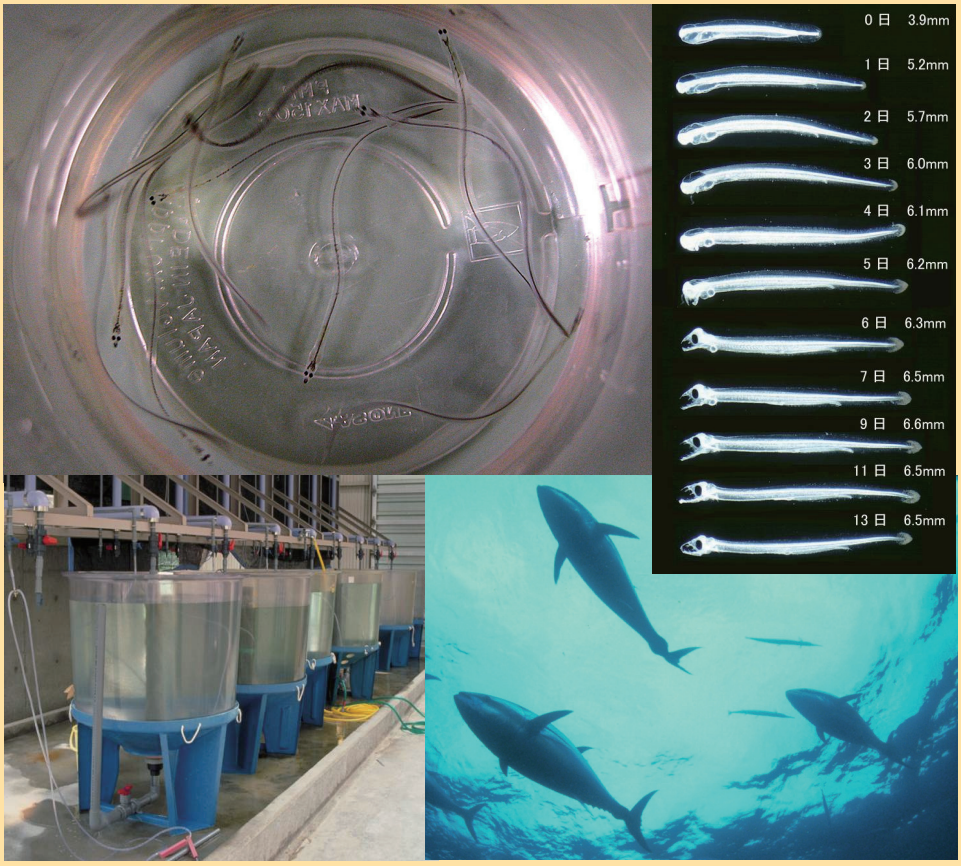
農林水産研究開発レポート No.26（2009）
農　林　水　産　技　術　会　議

広域回遊魚類（ウナギ・マグロ）の完全養殖技術開発



農林水産省

「広域回遊魚類（ウナギ・マグロ）の完全養殖技術開発」 ポイント

１－１．謎の多いウナギの繁殖生態とシラスウナギ資源の減少

私達日本人にとってウナギは馴染み深い食材ですが、実はその繁殖生態は、よくわかっておらず、最近まで何処で生まれるのかさえ不明でした。出荷されているウナギのほとんどは､養殖されたウナギですが、これらはシラスウナギと呼ばれるウナギの稚魚を沿岸で漁獲し、これを種苗として育てたものです。しかし、近年、シラスウナギの漁獲は減少しており、ヨーロッパでは絶滅危惧種に指定されて出荷制限が実施されることが決定されました。このため、シラスウナギの人工生産技術の開発が強く求められています。

１－２．ウナギ種苗生産技術の開発

ウナギ種苗の人工生産のために下記の研究を実施し、初めてシラスウナギの生産に成功しました。

１）ウナギの繁殖生態の解明

２）親魚の催熟（人工成熟）技術の開発

３）仔稚魚の人工飼料開発

４）仔稚魚の飼育装置の開発

天然の繁殖生態を解明して種苗生産技術にフィードバックするとともに、研究室レベルでこれまで蓄積したデータを元に完全養殖技術を開発しています。

２－１．クロマグロ種苗生産技術開発の必要性

マグロ類は日本人が最も好む魚であるばかりでなく、先進国を中心に世界中で消費量が増加し、養殖生産量も急速に増大しています。現状のマグロ養殖は種苗として若魚（ヨコワ）を漁獲して飼育するため、味が良く人気の高いクロマグロ養殖が盛んになるにつれ著しい資源の減少が危惧されています。そこで、クロマグロ資源の維持・増殖のために種苗を人工で大量に生産する技術の開発が急務となっています。

２－２．安定大量採卵と種苗生産技術の確立

完全養殖は達成されたものの、クロマグロは一般的な養殖魚と比べ桁外れに大きく、コスト面等の課題が残されています。高効率、低コストな完全養殖を目指して、以下の研究開発を進め、安定採卵と種苗生産技術の確立に取り組んでいます。

１）産卵生態の解明と３歳魚（従来は５歳魚以上）からの早期採卵

２）飼育水槽の改良による仔魚の初期減耗の低減

３）摂餌行動の解明による稚魚の共食いの低減

４）配合飼料の開発による生き餌から人工飼料への転換

これらの技術を開発、改良していくことにより、養殖用種苗の20％を人工生産した種苗に置き換えることを目標に種苗生産技術の開発を着実に進めています。

目　次

はじめに……1
コラム１　完全養殖……1

1. ウナギ人工種苗の実用化を目指して……1
(1) ウナギ養殖と研究開発……1
(2) 謎の多いウナギの生活史……2
コラム２　ウナギ天然親魚の捕獲に成功……3
(3) ウナギの成熟制御と親魚養成……4
1) 飼育環境下でウナギに産卵させる……4
2) 雌ウナギは簡単に手に入らない？：ホルモンによる雌化技術の開発……5
コラム３　養殖ウナギは雄ばかり？……5
3) 仔魚の正常な発育のために重要な親魚の資質向上……6
コラム４　ウナギ種苗生産研究の歴史……6
(4) ウナギ仔魚の正常な育成のための飼料の開発と飼育環境……6
1) 仔魚の発生……6
2) 人工飼育を実現した飼料の開発と仔魚の成長……7
コラム５　天然海域でウナギレプトケファルスは何を食べているのか……8
コラム６　仔魚の変態過程……9
3) 飼育装置と飼育方法の工夫、改良……10

2. クロマグロ完全養殖に貢献する研究開発……10
(1) 国内のクロマグロ養殖業……10
1) 天然由来の種苗に頼っているマグロ養殖業……10
コラム７　クロマグロとはどんな魚……11
2) クロマグロ養殖の現状……11
3) 卵から稚魚を育てる技術開発の歴史……13
(2) クロマグロ親魚を産卵させる……13
1) 親魚の成長……13
2) クロマグロはどのように産卵するのか……13
3) 親魚養成の研究の展望……14
(3) クロマグロの仔稚魚をいかに育てるか……14
1) 仔稚魚飼育の工程……14
コラム８　クロマグロの卵、ふ化仔魚……15
2) 種苗生産における問題点の解決に向けて……15
コラム９　シオミズツボワムシとは……16

おわりに……17

はじめに

農林水産省農林水産技術会議事務局では、農林水産分野の研究開発について広く国民の皆様に理解していただくため、農林水産研究開発レポートを発行・配布しています。

ウナギとクロマグロはともに日本人の大好物です。天然魚の捕獲だけでは食の需要に応えきれないため、養殖が盛んに行われています。この２種は卵から産まれ、仔稚魚から親魚になり産卵するまでの間、太平洋の広い範囲を利用するという共通点があります。ウナギはマリアナ海溝付近で産卵し、仔魚は成長しながら長い旅をして日本へ到達するころにはシラスウナギとなって河川を遡上します。また、クロマグロはフィリピンから日本海西部の海域で産卵し、暖流に乗って仔稚魚が成長し、成長した幼魚の一部は日本近海から北アメリカの西岸近くまで回遊します。これら２種類を人為的環境で産卵させ、仔稚魚を飼育することは大変難しく、現在のところ養殖用に大量の稚魚が生産できるまでには至っておりません。日本人の大好物であるウナギ、クロマグロの将来にわたる安定供給は、養殖用の大量人工種苗の生産技術にかかっています。

そこで、本レポートではこの２種について、人為的な環境で世代にわたり飼育する完全養殖（コラム１）をキーワードに、そのための技術として親魚養成および種苗生産の研究開発をご紹介します。農林水産省農林水産技術会議事務局は、ウナギについては、平成17年度から「ウナギ及びイセエビの種苗生産技術の開発」を開始し、独立行政法人、大学、県、民間企業の連携のもとでプロジェクト方式の研究開発を推進しています。当初の目標であったふ化後100日目までの生残率を従来の10倍に引き上げることはほぼ達成されました。その成果を中心にご紹介します。同様にクロマグロについては、平成19年度から「マグロ類の人工種苗による新規養殖技術の開発」を推進しています。クロマグロ養殖に使われる天然幼魚総数は約20万尾と推定されていますが、その20% を人工種苗に置き換える技術の開発を目標として取り組んでいます。クロマグロ養殖に実用的な人工種苗を供給し貢献するための研究開発の現状についてとりまとめました。

1. ウナギ人工種苗の実用化を目指して

（1）ウナギ養殖と研究開発

土用の丑の日に鰻を食べる習慣については、平賀源内

コラム1

完全養殖

対象となる生物の生活史を人工飼育下で完結させることを完全養殖といいます。魚類の場合、親魚から卵をとり稚魚を育て、その稚魚を親魚まで育成し、さらにもう一度卵をとることで完全養殖になります（図１）。人工生産が困難な魚類では、クロマグロで完全養殖に成功していますが、ウナギでは人工生産した魚からの採卵に成功していないため、完全養殖には至っていません。完全養殖が可能になることで、養殖種苗の採捕により懸念される天然資源への影響を少なくできる他、優れた特性を持つ魚を育てる育種も行えるようになります。完全養殖技術が確立しているマダイやヒラメでは、成長の良い魚や、病気に強い魚が作られています。完全養殖技術が確立することで、成長が良く病気に強いウナギやクロマグロの開発も期待されます。

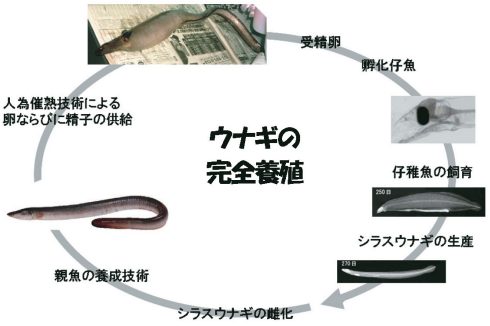


図１　ウナギの完全養殖

の発案という説が最もよく知られています。とある鰻屋が、夏に売れない鰻を何とか売るため源内に相談したところ「本日丑の日」と書いて店先に貼ることを勧められました。その鰻屋は大変繁盛したことから、他の鰻屋もそれにならい、土用の丑の日に鰻を食べるようになったと言われています。

我が国におけるウナギ養殖は、1879年（明治12年）に東京深川で始められました。1971年頃、配合飼料の開発やハウス加温式養殖の導入などの技術開発により生産性が飛躍的に向上し、現在では、年間２万トン程度の我が国におけるウナギ生産のうち、天然の漁獲量は２％程度に過ぎず、ほとんどが養殖によるものとなっています。また、国内で流通するウナギの８割は中国、台湾からの輸入品であり、それらはすべて養殖生産によるものです（図２）。

ウナギ養殖は、冬から春にかけて河口域に来遊する天然のシラスウナギ（河川に遡上するウナギの稚魚で全長50～60mm）を養殖用の種苗として捕獲し、養殖池に収容して行われます。このため、養殖産業にとってシラスウナギを安定的に確保することが重要となっていますが、シラスウナギの漁獲量は年によって大きく変動します。世界的に見ても各種ウナギの資源水準が低下していると言われています（図３）。一方、中国のウナギ養殖ではヨーロッパウナギも種苗として利用されていますが、資源の枯渇を懸念して2007年のワシントン条約締約国会議において、ヨーロッパウナギの国際的な取引が規制されることになりました。このようなことから、天然の種苗に頼らずにウナギ養殖用種苗を供給するため、人工的に種苗を作る技術の開発が求められています。

しかしながら、ウナギは極めて特殊な生活史を持つ魚類であることから、人為的に成熟させ、採卵、授精、ふ化、仔魚の飼育を経てシラスウナギ（養殖用種苗）とすることは容易ではありません。我が国では、2002年に（独）水産総合研究センター養殖研究所において世界に先駆けてシラスウナギの人工生産に成功し、現在ウナギ種苗の人工生産の実用化に向け、安定生産に不可欠な基盤研究がすすめられています。

（２）謎の多いウナギの生活史

ウナギは飼育下あるいは河川や湖沼、沿岸など人目に

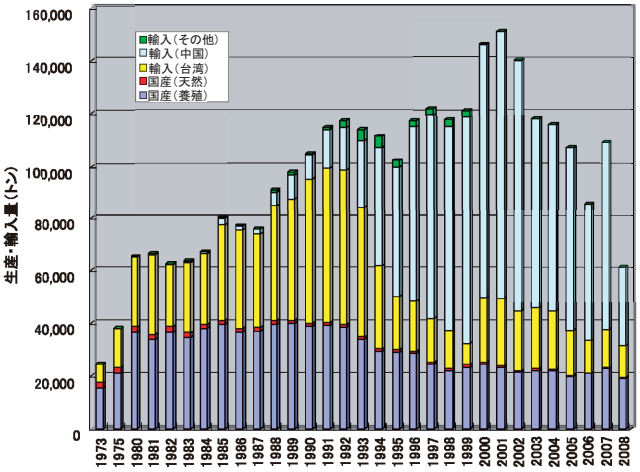


図２　我が国において流通するウナギの内訳

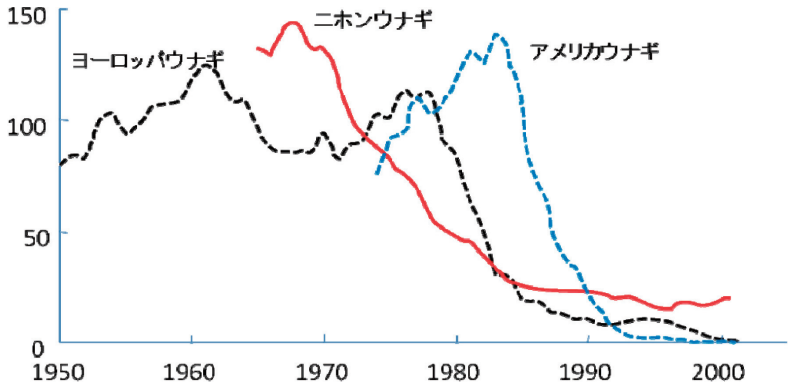


図3 各種ウナギ類稚魚の漁獲量(1960～70年代を100としたときの推移)

触れる所では、どんなに大きくなっても、どんなに年をとっても、決して自然に成熟・産卵することはありません。図４に示したように、シラスウナギと呼ばれる全長50～60mm の透明な稚魚が初冬から春先にかけて南西日本や朝鮮半島、中国、台湾の沿岸や河口に来遊し、河川や湖沼、沿岸などで魚類や底棲生物などを食べて育ちます。雄は全長50cm、体重200ｇ、４～５歳程度、雌は全長75cm、体重600ｇ、６歳以上で成熟を開始して産卵場をめざす旅に出るとされており、産卵場までの回遊の過程で成熟が進むと考えられています。これまで、産卵場に向かう親ウナギが黒潮より南側で発見された例はなかったので、産卵場までの経路は明らかではありませんが、小笠原海嶺に沿って緩やかに南下する小笠原海流を利用して産卵場に向かうという説が有力です。

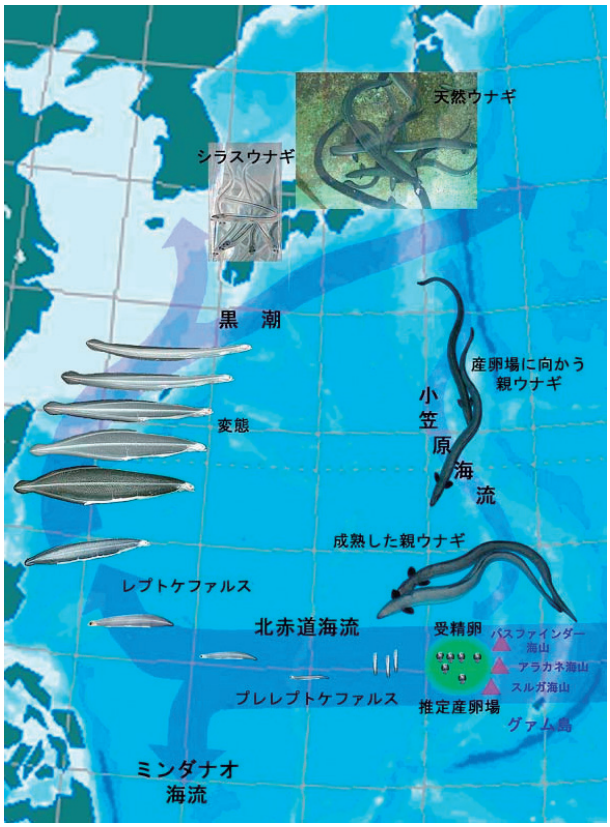


図４　ニホンウナギの回遊経路

1991年には、東京大学海洋研究所の塚本勝巳教授らの産卵場調査で北緯12～19度、東経131～137度の海域で全長7.6mm というふ化後10日程度のものを含む約1000尾ものウナギの仔魚が採集され、それらのふ化後日数とその海域の海流の方向および速度から、産卵場は北緯15度、東経142～143度付近であると推定されました。グアム島の西側に当たるこの海域には深海底から海面近くまでそびえ立つパスファインダー、アラカネ、スルガと名付けられた３つの海山があり、これらの海山周辺で６、７月の新月の夜を中心にウナギの産卵が繰り広げられていると考えられています。さらに、2005年６月にはスルガ海山の西方約100km の地点でふ化後２～５日の目も口もまだできていない仔魚（プレレプトケファルス）が約400尾採集され、産卵場はさらにピンポイントで絞り込まれました。また、採集されたプレレプトケファルスのふ化後の日数と発育・成長過程を人工ふ化して様々な水温で育てた標本と比較することによって、天然の仔魚は水温28℃、水深65m程度のところに生息していたと推定されています。

その後、プレレプトケファルスは北赤道海流にゆっくりと西に運ばれながら成長し、次第に体の幅が広くなって透明なヤナギの葉のような形態のレプトケファルス幼生へと成長します。レプトケファルスは成長とともに浮力が強くなり、夜間表層近くまで浮上して北に流され、黒潮の源流にたどり着くと考えられています。全長50～60mm に達したレプトケファルスは急激に体の幅が狭くなり、筒状のウナギらしい形に変わるとともに、比重が大きくなり遊泳力も強くなります。このレプトケ

コラム2

ウナギ天然親魚の捕獲に成功

天然のウナギ親魚について、2008年の夏、大きな新発見がなされました。水産庁の漁業調査船「開洋丸」によって、ニホンウナギの産卵場と想定されるマリアナ諸島西方海域で大型の中層トロールによるウナギ親魚捕獲を目的とした調査を実施したところ、産卵に関与したと考えられる天然の雌雄の親ウナギが世界で初めて捕獲されたのです。これらの標本の解析は現在進行中ですが、今後さらに多くの成魚が産卵場付近で採集され、天然の成熟個体の生理・生態が詳しく解明されれば、ウナギの資源研究や種苗生産技術開発にも大きな進歩がもたらされるものと期待されています。

ファルスからシラスウナギへの劇的な形態変化を変態と呼び、天然ではふ化後80～170日目ぐらいに始まり20～40日間ぐらいで完了すると推定されています。黒潮内で変態を完了したシラスウナギは、その後黒潮を離脱して、台湾、中国南部、日本、朝鮮半島の生息域へと接岸回遊を始めると考えられています。

ウナギの生活史の概要は以上のように考えられていますが、実際には天然魚の海洋生活史は断片的にしか分かっておらず、親魚の成熟状態、卵やふ化仔魚のサイズや栄養状態、仔魚期の餌や棲息環境にはまだ多くの謎が残されています。

（3）ウナギの成熟制御と親魚養成

1）飼育環境下でウナギに産卵させる

ウナギから卵をとるには、まず性成熟させて卵を産める状態にする必要があります。魚類の性成熟や産卵リズムは、性成熟機構、すなわち視床下部－脳下垂体－生殖腺系で合成されるホルモンによって厳密に制御されています。通常、天然環境下では光や水温等が性成熟機構の最初の部分を刺激することで魚自身の性成熟機構が自然に動きます。しかし、人工飼育下ではホルモンによる情報伝達系が正常に働かなくなるため、結果として性成熟の進行や産卵が起こりません。このため多くの養殖対象魚では、飼育環境下で成熟・産卵リズムが停止した魚にホルモンを投与することで、成熟に関する情報伝達系を修復し、それをスムーズに動かすことで性成熟の進行や産卵の誘導を行っています。

養殖研究所で開発された成熟誘導技術は、卵の発達段階に応じて投与するホルモンの種類を変えるものであり、効率的なウナギの成熟・採卵方法として多くの機関で使用されています（図５）。これまでの研究で、魚類の卵は栄養を卵内に蓄える期間（成長期）と受精のための準備を整える期間（最終成熟）といった２つのプロセスを経て形成されることが明らかになっています。このうち卵の成長は、脳下垂体で合成される生殖腺刺激ホルモン（GTH）によって支配されており、その期間はサケでは数年に及ぶなど魚種によって様々です。他方、卵の最終成熟は、生殖腺で合成される卵成熟誘起ステロイド（DHP）によって誘導され、極めて短期間（数時間～数日）で起こります。残念ながら現時点では、ウナギの卵形成や最終成熟が自然状態でどれぐらいの期間かかるかは定かではないのですが、飼育環境下では、性成熟がごく初期で停止したウナギにGTHを含むサケ脳下垂体抽出物を２～３か月間、毎週注射することで卵を成長させることが可能です。他方、十分に成長した卵をもった雌ウナギにDHPを投与することで、短期間（およそ18時間）で受精のための準備が完了した卵を得ること、すなわち排卵が誘発できることがわかっています。

雄の精子形成は、その最終段階で精子変態という形態が劇的に変化する過程を経るものの、雌の卵形成と比較

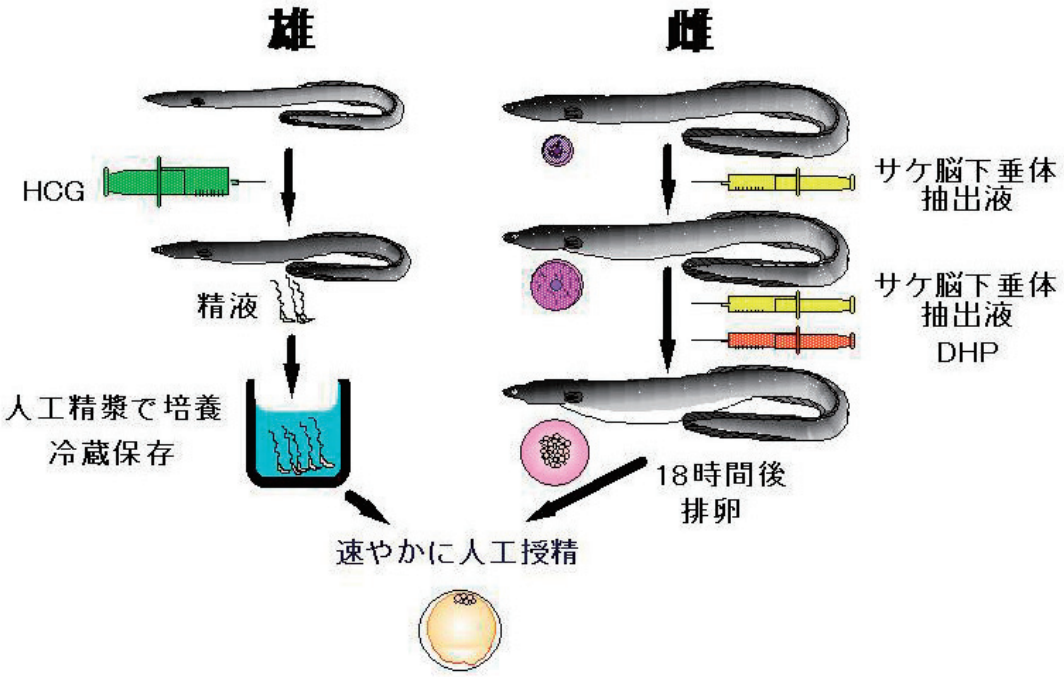


図５　ホルモン投与によってウナギから卵や精子をとる方法

するとその形成過程は極めて単純で、ヒトGTHの一種（ヒト絨毛性ゴナドトロピン：HCG）を複数回投与することで、ウナギから精子を得ることが可能となっています。また、養殖研究所で開発された精子の保存技術によって、得られた精子をストックすることで常時使えるようにもなってきました。

2）雌ウナギは簡単に手に入らない？：ホルモンによる雌化技術の開発

これまで述べてきたように、ホルモンを投与することで飼育環境下のウナギから比較的容易に卵や精子をとることができるようになりました。しかし、卵や精子を生産していくうえで大きな問題が残されていました。それは雌ウナギの確保が非常に難しいということです。従来、卵や精子をとるために、天然の下りウナギ（秋に川を下り産卵に向かうと推定されるウナギ）を使ってきましたが、下りウナギは入手できる時期が限られており、年によって採捕できる量が大きく変動するので、親魚の安定的な供給を考えると不向きです。他方、養殖ウナギはほとんどが雄であり、外見から雄雌を見分けて選別するのが非常に難しいという問題があります（コラム３）。

このため、産卵用の親魚としての雌ウナギを効率良く育成する技術の開発が強く望まれていました。魚類ではホルモンによって性転換が起こることが古くから知られていますが、愛知県水産試験場はこの生理現象に着目して、雄が雌になるホルモン（エストラジオール17β：Ｅ２）を餌に混ぜてシラスウナギに食べさせることで雌化を試みました。その結果、シラスウナギを効率良く雌化できること、雌化したウナギにホルモンを投与すると卵がとれること、さらに得られた卵から孵化仔魚が得られることが明らかとなりました。この雌化技術は、ウナギの安定的供給に必要不可欠であり、成熟誘導技術同様、ウナギの種苗生産を進めていくうえでの大きなブレイクスルーと考えられています。

コラム3

養殖ウナギは雄ばかり？

私たちが食べる養殖ウナギはほとんどが雄であることはあまり知られていません（図６）。このように書くと、ウナギの性比は極端に雄に偏っていると思われるかもしれませんが、実際天然で取れるウナギの雄雌比はほぼ１対１です。このように養殖ウナギが雄に偏っている主な原因は、魚類では遺伝的な性が完全に固定されていないことがあげられます。すなわち、私たちヒトと違って、魚は雄から雌あるいは雌から雄になりうる性転換が可能な生物なのです。これまでに、ヒラメやキンギョでは仔魚期に高水温で飼育することで遺伝的な雌が雄になることがわかっています。また水温以外に、年齢や社会的環境によって性転換がおこることがいくつかの魚種で報告されています。残念ながら養殖ウナギではどのような要因で雄に偏るかは未だにわかっていません。現在この問題を明らかにするために、ウナギ養殖特有の高密度飼育との関係を解析しています。養殖ウナギの性の統御は、卵を産む雌親魚の安定的供給に必要不可欠であり、今後の研究成果に大きな期待が寄せられています。

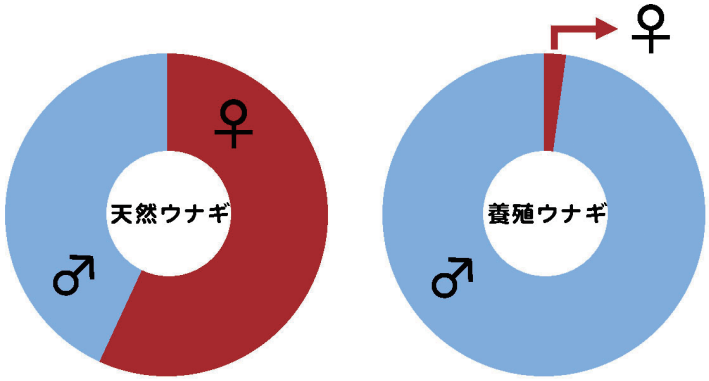


図６　天然ならびに養殖ウナギの性比

3）仔魚の正常な発育のために重要な親魚の資質向上

養殖研究所では2002年に世界で初めて受精卵からシラスウナギまでの人工飼育に成功しました（コラム４）。しかし、これまでのところ受精卵からシラスウナギまでの生残率は非常に低く、種苗生産技術を開発するうえで大きな問題となっています。この主な原因のひとつとして、様々な形態異常が高頻度で起こることがあげられます。これまでの研究で、形態異常の出現には、飼育環境に加えて、得られた卵の質の影響が大きいことがわかりました。現在、卵の中の遺伝子や栄養成分などを指標に卵質と仔魚の形態異常との関係を解明するとともに、これらを指標にした生残率向上のための新しい卵質診断技術の開発に取り組んでいます。

良質な卵や精子を得るためには、親魚を適切に成熟させることが、非常に重要と考えられます。現状では人工飼育下で性成熟を進行させるために、哺乳類のGTH（生殖腺刺激ホルモン）やサケの脳下垂体抽出物（GTHが多く含まれる）を投与していますが、異種生物のホルモンは成熟促進効果が低かったり、予期しない副作用が出たりすることがあるため、本来はウナギ自身のGTHを投与すべきと考えられます。しかし、GTHは非常に複雑な構造をもつ物質であるため化学的に合成することができません。そこで養殖研究所を中心に、遺伝子工学的手法を用いたウナギホルモンの生産システムの開発を進めています。また、ホルモンの投与法も、現在行っている２～３か月の間毎週注射をする方法では親ウナギに多大なストレスを与え、親魚としての資質を低下させている可能性があると考えられるため、１回だけのホルモン投与で成熟可能にするなど、よりストレスの少ないホルモン投与技術の開発も進められています。

（４）ウナギ仔魚の正常な育成のための飼料の開発と飼育環境

1）仔魚の発生

人工授精した卵は水温19～28℃の範囲でふ化が可能ですが、19℃ではふ化率が低く、ふ化しても奇形をもつものが多く出現します。一方、高水温域では死卵の腐敗による水質悪化が起こりやすく、ふ化が不安定になる場合が多いので、かつては正常にふ化する低温限界に近い21～22℃で授精から摂餌開始まで管理していました。その後、濾過や紫外線殺菌による飼育水の管理技術が向上したので飼育水温を上げることが可能となり、最近は25℃で初期飼育を行っています。25℃は実験的に最も奇形の発生が少ない水温であり、また、最近初めて採集された天然のプレレプトケファルスも25～28℃前後の水温帯に分布すると推定されたことから、合理的な飼育水温であるといえます。

図７に示したのは23℃での発生過程ですが、受精後

コラム4

ウナギ種苗生産研究の歴史

ウナギを飼育環境下で成熟させる研究は、生物学的興味からヨーロッパで1930年代に始められました。我が国では養殖用種苗の安定供給に対する強いニーズから1960年代に人工ふ化技術の開発研究が始められ、40年以上にわたって精力的に研究が続けられています。

ウナギの人工ふ化は、北海道大学の山本喜一郎教授らによって1973年に世界で初めて成功し、仔魚はふ化後５日間生存しました。さらに、北海道大学の山内晧平教授らは1976年にふ化後14日間の生存を報告しました。しかしながら、ふ化仔魚の飼育が可能な餌が見つからなかったため、その後20年にわたり給餌飼育には成功しませんでした。その壁が破られたのは1996年のことです。養殖研究所の田中秀樹グループ長らがウナギ人工ふ化仔魚はサメ卵をよく食べることを発見したことにより給餌飼育が可能となり、その後飼料組成の改良によって1999年には全長30mmのレプトケファルス幼生まで、そして2002年にはついに養殖用種苗として利用可能なシラスウナギまで育てることに成功しました。

現在では、養殖研究所の技術を取り入れることによって国内の複数の研究機関でシラスウナギを作り出すことに成功していますが、海外では未だ人工ふ化仔魚の長期飼育に成功した例はなく、この分野の研究では我が国が世界を大きくリードしています。

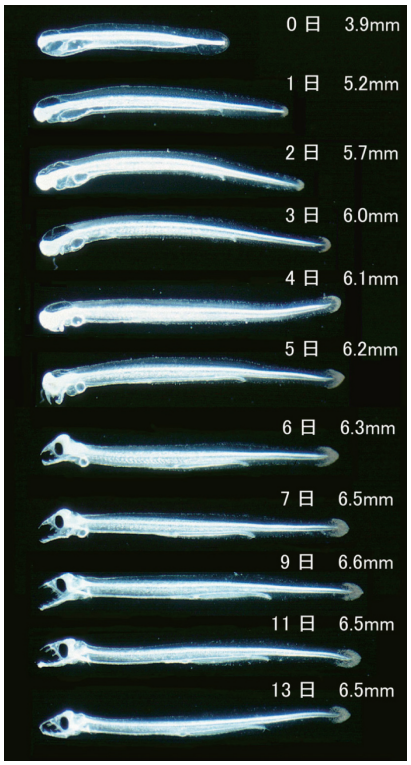


図７　ウナギ仔魚のふ化後の発生過程（23℃）

35～40時間でふ化し、ふ化後３～４日で口と肛門が開き、６日で目が黒くなるとともに口が前方に向きを変え、消化酵素も分泌されるようになって、７日目頃に餌を食べる準備が整います。卵に蓄えられた栄養分は喉の部分に油球となって残っていますが、９日目頃にはほぼ消失し、その後適当な餌を食べることができなければ、次第にやせ細ってふ化後２週間程度で死滅するという過程をたどります。

２）人工飼育を実現した飼料の開発と仔魚の成長

1973年に北海道大学で世界初の人工ふ化に成功して以来、90年代初めまでの仔魚飼育の試みでは、卵の栄養を使い果たすふ化後２週間、全長７ mm 前後まで生存させるのが限界でした。それは、仔魚の適正な餌が不明で、給餌飼育に成功していなかったためです。養殖研究所の田中秀樹グループ長らは海産魚の種苗生産には欠かすことのできない初期餌料であるワムシを、様々な発育段階の仔魚に繰り返し給餌することを試みました。その結果、1994年、ふ化後13日目の仔魚がワムシを食べているのを初めて確認しましたが、十分な量のワムシを持続的に食べさせることはできず、再三の給餌試験にもかかわらず、ワムシを餌とした飼育では卵黄吸収完了後の成長や生存期間の延長といった給餌の効果は現れませんでした。そこで、再び餌の候補を広い範囲から見直したところ、サメ卵低温乾燥粉末を非常に良く食べることを発見しました。しかし、サメ卵は短時間で飼育水中に分散してしまうので水質の悪化を招きやすく、長期の飼育には飼育管理法に工夫が必要でした。

サメ卵粉末を濾過海水に懸濁させたポタージュスープ状の餌を調製し、容量５ℓの小さなアクリルボウル水槽の底に、長いガラスのスポイトで静かに流し込んでやると、仔魚は光を避けようと水槽の底に集まって効率的に餌を飲み込みます。15分程度で仔魚の消化管は餌で満たされるので、注水によって残餌を洗い流し、水槽内を清潔に保つよう管理します。このようにして２時間間隔で１日５回給餌し、夜間にサイフォンを用いて仔魚を新たな水槽に移動させることによって継続的に飼育する方法を開発しました（図８）。この飼育法により、ウナギの仔魚が自ら食べた餌を消化吸収し、生存期間を伸ばすとともに成長することが世界で初めて確認されましたが、サメ卵粉末のみからなる餌ではふ化後約１か月間、全長10mm 程度まで成長させるのが限界で、その姿形は柳の葉のように幅の広い天然のレプトケファルスとはまだ大きな隔たりがありました。

非常に未熟な発育段階でふ化してくる海産魚の仔魚は、胃がないために消化機能が十分発達しておらず、餌に含まれる蛋白質を効率的に吸収できないので、ペプチドのような低分子のタンパク源を必要とします。そこで、サメ卵粉末をベースとし、消化機能の十分発達していない仔魚でも吸収しやすいオリゴペプチド（タンパク質を酵素によって分解したもの）を添加するとともにビタミン・ミネラルを強化し、オキアミ抽出液に懸濁させた餌が試作されました。その結果1998～99年には、従来の飼育方法では成長が停滞したふ化後20日目以降も順調な成長が続き、30日で平均全長は10mm、50日で15mm を越え、100日目には20mm 以上となりました。また全長10mm を越える頃から全長に対して体高が高くなり始め、その後、歯や鰭も発達して天然のレプトケファルスに近い形となって、大きいものは全長30mm 以上にまで

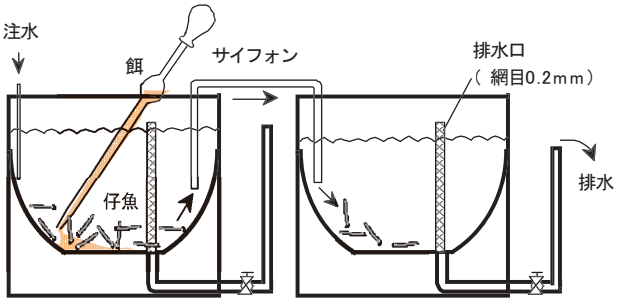


図８　ポタージュスープ状の餌を用いたウナギ仔魚の飼育方法

成長しました(図９)。しかし､天然に比べて成長が遅く、シラスウナギに変態するとされる全長50～60mm に到達せず、変態することなく衰弱死してしまうという状況が繰り返されました。

様々な観点から餌の検討が重ねられましたが、健全に成長しない原因はなかなか見つかりませんでした。そもそも、人工ふ化したウナギの仔魚は健全な状態で生まれているのかということも疑われ、親魚の養成や人為的に成熟させる方法についても検討が続けられました。そのような状況の中で、養殖研究所と共同研究をしていた企業から有益な情報が提供されました。すなわち、従来の飼料に添加していた大豆ペプチドにはフィチン酸と呼ば

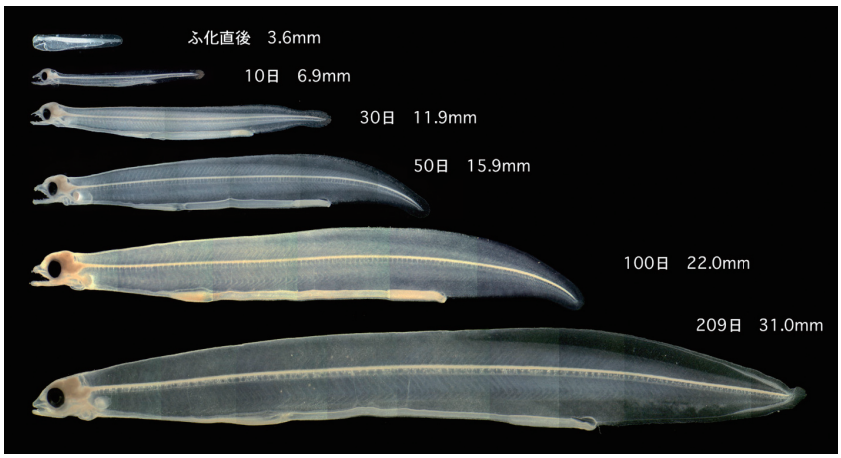


図９　新たな飼料によるウナギ仔魚の成長

コラム5

天然海域でウナギレプトケファルスは何を食べているのか

これまでに2000尾を超えるウナギのレプトセファルスが天然海域で採集されていますが、大部分の個体で消化管内容物は何もないか、形の不定な粘液質のものが見られるのみで、天然の餌についての明確な報告はありません。かつては、レプトケファルスの特異な形態と未発達な消化管から、体表から海水中の有機物や微小懸濁粒子を栄養源として取り込むとの説もありましたが、エネルギー収支の観点などから否定されつつあります。

様々なプランクトンに対する抗体を用いて、台湾東方海域で採集されたウナギやギンアナゴのレプトケファルスの消化管内容物を分析した研究では、オワンクラゲやクロカムリクラゲなどのクラゲ類やヒカリボヤなどの抗体に対する陽性反応が確認されています。この結果は、レプトケファルスがこれらのゼラチン質プランクトンを直接食べたかあるいは死骸や分泌物を含む有機懸濁物を食べた可能性を示しています。また、沿岸で採集されたウナギに近縁なマアナゴ、クロアナゴ、ハモのレプトケファルスの消化管からは動物プランクトンの糞粒や尾虫類の包巣（微小な餌粒子を濾しとって食べるためのゼラチン質の分泌物）が高い頻度で見つかっています。いずれも海水中の粒状懸濁物、いわゆるマリンスノーといわれるもので、海洋中には極めて豊富に存在し、有機物に富むものです。また、レプトケファルスの体を構成している窒素および炭素の同位体比の分析からも、生息海域の有機懸濁物を主要な餌としていることを支持する結果が得られています。

これらの結果を総合すると、天然のウナギレプトケファルスはゼラチン質プランクトンなどを起源とするマリンスノーを主に食べているという説が有力ですが、その構成要素や栄養成分の特定には至っていません。最近始められた消化管内容物の DNA 解析によるアプローチでは、これまでに真菌、珪藻、クラゲ類などの DNA 配列がわずかに得られていますが、餌生物を特定するにはさらなる研究が必要です。

れるリン化合物が含まれ、ミネラルやタンパクの吸収を阻害する可能性があるので、酵素処理によってフィチン酸を低減した大豆ペプチドを開発したので試してみないかとのことでした。また、別の共同研究相手からは様々なエキス成分やペプチドに富むオキアミの酵素分解物も提供され、その添加効果も検討されました。一方、同じ時期に餌の主成分であったサメ卵粉末が製造中止となったために、冷凍サメ卵を使わざるを得なくなりました。様々な飼料を調製して、多くの飼育実験を重ねた結果、最終的に冷凍サメ卵、フィチン酸低減大豆ペプチド、オキアミ分解物、オキアミ抽出液、ビタミンなどからなる餌が考案され、長期的な飼育試験が繰り返し行われました。その結果、ついにウナギ人工ふ化仔魚は全長50～60mmの変態開始サイズのレプトケファルスにまで

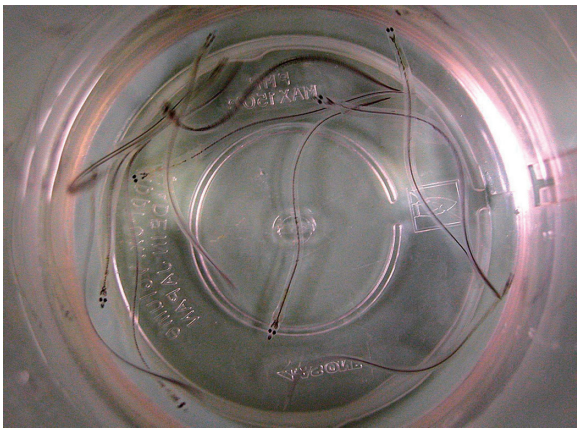


図10　人工生産されたシラスウナギ

コラム6

仔魚の変態過程

人工ふ化したウナギ仔魚は、ふ化後200～300日で全長50～60mmに成長したのち、透明な柳の葉のようなレプトケファルス幼生から筒状のシラスウナギへと急激に姿を変えます（図11）。この過程を、オタマジャクシがカエルになるのと同様に変態と呼びます。このときの変化をよく観察すると肛門と背びれおよび尻びれの始まる位置が前方に移動し、体高は低くなっていきます。牙状の歯が吸収されて細かい歯が出現し、眼が小さくなり、鰓（えら）が発達し、赤血球が出現して心臓が赤く見えるようになり、筋肉が発達して遊泳力が高まり、比重が重くなって水槽の底に沈み、尾びれから側線にかけて黒い色素が出現するなど多くの変化が見られます。変態に伴うこれらの変化は水温21.5℃では20日前後かかりますが、25℃ではわずか10日ほどの間に完了し、全長が若干短くなるとともに体重は５分の１ほどに引き締まります。天然のウナギに関してはこのような変態過程は詳細に観察されていませんが、ふ化から変態までに要する期間は耳石日周輪の解析から80～170日と推定されており、人工ふ化仔魚の飼育下での成長は天然のものには及びません。

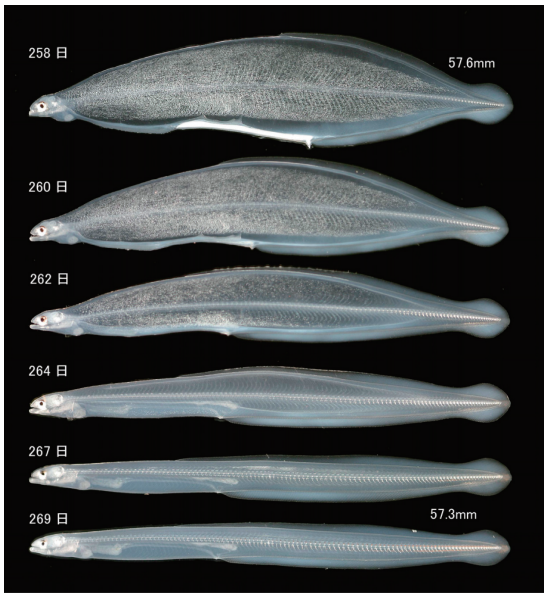


図11　レプトケファルス幼生からシラスウナギへの変態過程
（ふ化後258日、全長57.6mm～269日、57.3mm、水温25℃）

成長し、シラスウナギに変態するものが出現したのです（図10、コラム６）。

３）飼育装置と飼育方法の工夫、改良

天然の状態では、ウナギ仔魚はきわめて清浄な海域に生息していますが、人為的な環境下では給餌に伴う水質の劣化や汚れた水槽の壁面との接触は避けられません。このため、長期にわたる飼育期間中の生残率低下に影響があると見られる飼育環境中の微生物のコントロールなどとともに、飼育装置の改良など飼育環境の最適化に向けた技術開発を進めています（図12）。

内部の凹凸が少なく、自然な水流によって仔魚がなるべく水槽壁に接触しない形状の水槽の開発、水槽壁に汚れを残さない飼育管理法の徹底などが工夫されました。また、飼育の初期には、夜間、仔魚が水面に張り付いて死んでしまう浮上死が多数観察されたため、その対策として飼育水に微量の卵白を添加することによって浮上死を防止する方法が開発されました。小さな水槽での飼育だからこそ可能な卵白の添加によって、初期の生残率は大きく上昇しました。

天然のウナギ仔魚は、透明度の高い外洋のかなり水深のあるところに生息し、昼は深く潜り、夜間は浮上してくると推定されています。透明度の高い水中では青い光が最も透過性が高いので、天然のウナギ仔魚は青い微弱な光環境の中に住んでいると考えられます。そこで、飼育室の光の色や強さについても検討がなされました。当初は、強い光はストレスを与えるために、可能な限り暗くした方がよいだろうと思われていましたが、暗くすると仔魚の行動が不活発になり、摂餌活性も低下して飼育成績はかえって悪化しました。一方、一日中明るくすると、絶えず水槽の底に向かって懸命に泳ぐのでエネルギーの消費が高まって成長が悪くなります。結局のところ、給餌するときは500～800ルクス程度の照度とし、それ以外の時間は薄暗くしてやるのが最も良いことが分かりました。光の色に関しては、赤い光に対する感度が低いことが示唆されましたが、青い光と白い光では特に差が見られず、光の波長にはそれほど気を遣う必要のないことが分かっています。

2. クロマグロ完全養殖に貢献する研究開発

（１）国内のクロマグロ養殖業

１）天然由来の種苗に頼っているマグロ養殖業

魚食は健康的であるという認識が世界的に広がるとともにBSE（牛海綿状脳症）や鳥インフルエンザなどの問題に端を発した食への安全に対する意識変化も関連して、魚食のグローバル化が大きく進みました。その結果、増大した水産物の需要は過剰な漁獲をもたらし、資源量が再生産能力を維持できるレベル以下に陥ることで、スパイラル的に漁獲量の減少に歯止めがかからない水産物も多く見受けられるようになっています。

マグロ類も例外ではなく、とりわけ高価で取引されるクロマグロ（コラム７）、およびミナミマグロ資源の減少傾向が顕著となっています。このような情勢からマグロ類の資源を管理する国際機関は、対策として漁獲割当量の削減を打ち出しています。一方、今後もマグロ需要はさらに増え続けることが予想される中、1980年頃スペインで始まったマグロ養殖業の生産量が急速に増加し、

図12　様々なタイプの飼育装置が並ぶ飼育実験室

コラム7

クロマグロとはどんな魚

クロマグロ（図13）はスズキ目、サバ科、マグロ属に分類され、全世界に分布するマグロ属８種のうちの１種です。太平洋に生息するもの（*Thunnus orientalis*）と大西洋や地中海に生息するもの（*Thunnus thynnus*）とが知られ、両者は同種とされる説と亜種とされる説があります。大きなものは、全長３m、体重400kg を超えます。市場では、マグロ属の中でも高級魚として取引されており、特に、脂肪分の多い腹部の肉は、「トロ」と呼ばれ、高級食材として人気があります。太平洋のクロマグロ（*T. orientalis*）は主に日本近海を含む北太平洋の温帯海域に広く分布します。その産卵場は広い太平洋の中でも、フィリピンから沖縄にかけての海域、および日本海西部に限られています（図14）。産卵場で産まれた仔魚は海流に乗って成長し、我が国周辺に来遊するようになります。幼魚の一部は太平洋を横断してアメリカ大陸西岸にまで回遊します。雌は３歳から、雄は２歳から成熟が始まり、成熟した個体は再び産卵場所に集まり産卵します。幼魚は独特の縞模様があることから”ヨコワ”と呼ばれます。

図13　クロマグロ

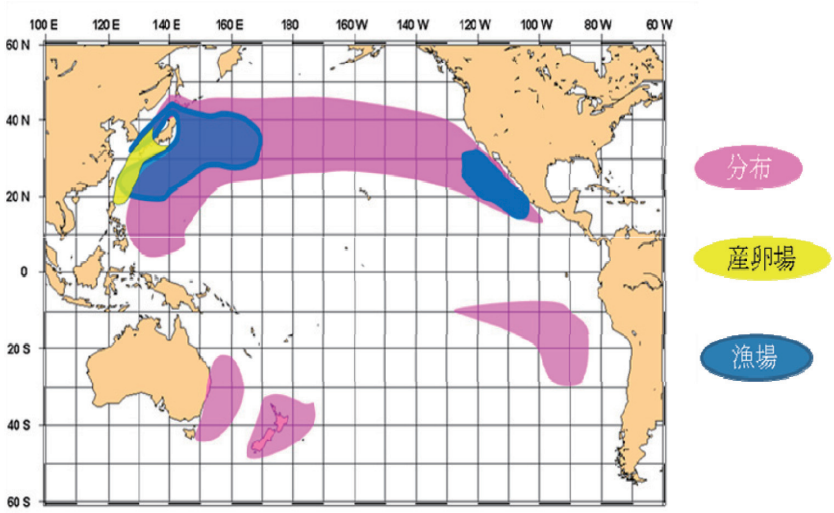


図14　クロマグロの分布域と産卵場

2005年には我が国に輸入されるだけでも３万トンを超え、近年では我が国におけるクロマグロ養殖業も盛んになっています。マグロ養殖業の種苗は100% を天然資源に頼っていることから、種苗用の幼魚（ヨコワ）の乱獲が問題となっています。

このような状況のもと、マグロ類の養殖用種苗を人為的環境の中で卵から育てた稚魚（人工種苗）に置き換える取組みは、養殖業の安定生産を支えるだけでなく、資源への影響を軽減し、持続的な生産を維持するための重要な研究課題として期待されます。

２）クロマグロ養殖の現状

国内の養殖場のほとんどは、黒潮、もしくは対馬暖流の影響が大きい温暖な海域に限定されます（図15）。養殖の年間生産量は1999年で450トン、2002年には2,400トン、2005年には3,000トンを超え、2008年では8,000トン

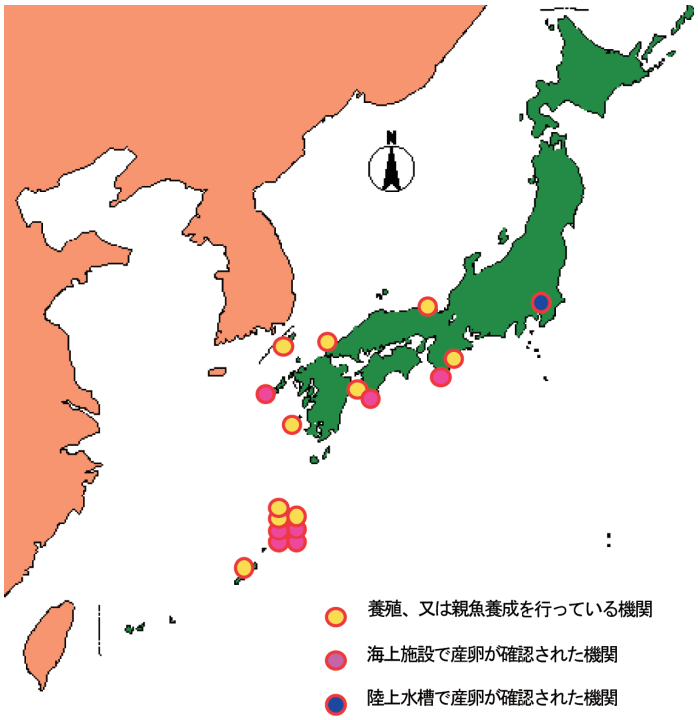


図15　国内の養殖と親魚養成を行っている機関の分布

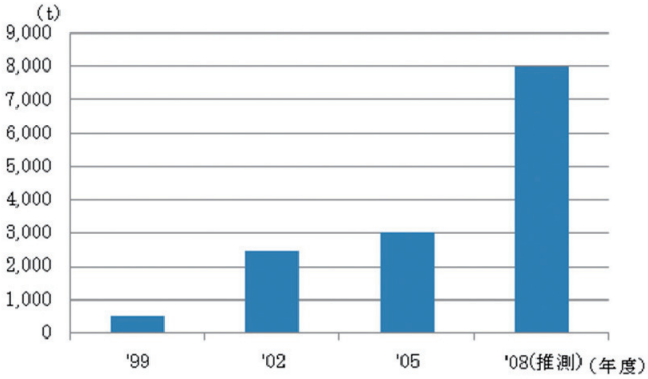


図16　養殖クロマグロ生産量の推移（国内）

図17　クロマグロ幼魚（ヨコワ）を捕獲する曳き釣り漁船

と推計され（図16）、最近の10年間で急速な増加が見られています。奄美大島には養殖場が集中しており、日本の養殖生産量の約半分が生産されています。クロマグロ養殖は、マダイ、ブリ等の養殖からすると後発組なので、すでに好条件の養殖場所は既存種に占められており、新たな養殖場所を確保することが難しく、多くは既存の養殖場を転換して行われています。

養殖に使われるクロマグロは、夏から秋にかけて、鹿児島県から三重県にかけての黒潮流域沿海部、および、鹿児島県から隠岐あたりまでの対馬暖流域沿海部で、曳き釣り（漁船から疑似餌で１尾、１尾釣る漁法：図17）によって捕獲される100～500ｇ程の幼魚です。養殖施設は、フロート下に直接網が設置されているタイプ（フロート式生簀）と円形の筏枠に網が設置されているタイプ（筏式生簀）の２種類の生簀が利用されます。他の魚類の養殖生簀に比べてクロマグロの養殖生簀ははるかに大きく、典型的な大きさでは、フロート式の長方形生簀が１辺50～80m、筏式の円形生簀が直径30～50mです。

養殖に使用する餌は、主にサバ、アジ、イワシ類、イカナゴの冷凍物です。これを解凍して、１日に１ないし数回給餌し、2.5～３年程度の期間をかけて30～90kgの大きさに育てて、取り揚げ、出荷されています。

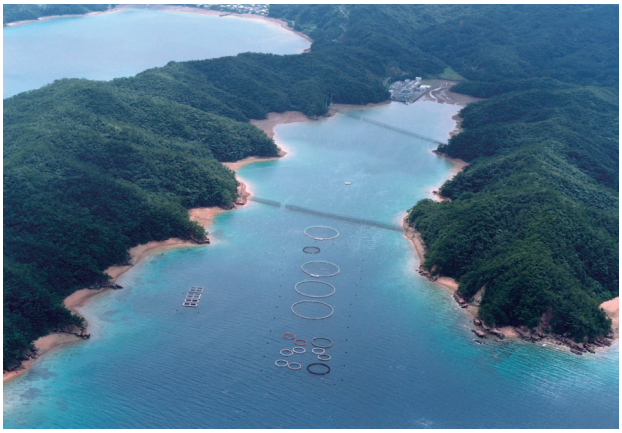


図18　湾を仕切ったクロマグロ親魚養成施設布

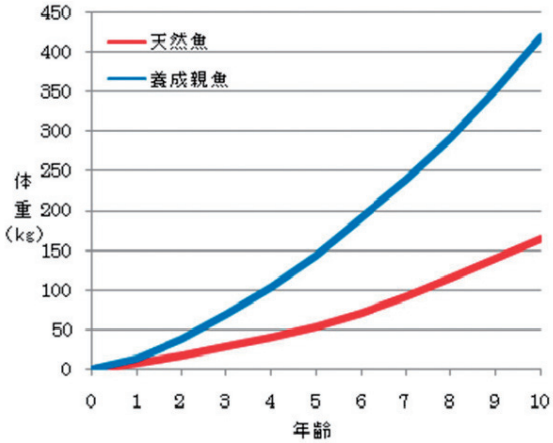


図19　クロマグロ養成親魚と天然魚の成長比較

3）卵から稚魚を育てる技術開発の歴史

クロマグロの稚魚を人工的に飼育、生産する種苗生産技術の開発の歴史は、1970年に行われた水産庁のプロジェクト研究「マグロ類養殖技術開発試験」に端を発します。東海大学、近畿大学、静岡・三重・長崎各県水産試験場の５機関が参加し、クロマグロ幼魚を生簀へ活け込み、養殖及び自然産卵させるというものでした。プロジェクト期間の３年間ではこの目的は果たせませんでしたが、近畿大学は取組みを継続し、1979年に世界初の生簀内での養成クロマグロの自然産卵と、ふ化後47日までの飼育に成功しました。1985年に、当時の日本栽培漁業協会（現、（独）水産総合研究センター）は石垣島の八重山事業場で放流を目的としたマグロ類種苗生産技術開発に取り組み始め、さらに1994年に奄美事業場で、世界でも例がない湾を仕切った海面での親魚養成を開始しました（図18）。1994年には近畿大学が生産した人工種苗を海面生簀で飼育を開始しました。1999年に東京都葛西臨海水族園が世界で初めて、水槽内でのクロマグロ自然産卵に成功し、2002年には、近畿大学が世界初の完全養殖の成功に至りました。

現在、種苗生産に取り組む機関は７機関で、１機関当たりの種苗生産数は約千～数万尾（全長５cm前後）です。クロマグロ種苗生産における生産数量及び生残率は、他の量産規模で養殖が展開されているマダイやヒラメに比べると低く、養殖生産に大きく貢献するレベルには達していません。

（2）クロマグロ親魚を産卵させる

1）親魚の成長

奄美海域での養成親魚の成長を図19に示しました。３歳で約70kg、６歳で約200kg、９歳で約350kg に成長します。一方、天然魚の成長は３歳で約30kg、６歳で約70kg、９歳で約140kg と推定されており、重さで２倍程度、養成親魚の成長が勝ります。また、奄美大島における成長は、九州、四国、本州沿岸における成長より良いことが知られています。その理由は、奄美大島の年間平均水温が高いことによります。早い成長は養殖業にとって大きなメリットであるため、奄美大島に養殖場が集中する理由となっています。

2）クロマグロはどのように産卵するのか

産卵は通常、１尾の雌に１尾の雄、もしくは数尾の雄が追尾して行われます。雌は円を描くように高速で遊泳しながら産卵し、後に続く雄はその吻端が雌の尾鰭に接するぐらいの至近距離で追尾しながら放精します。産卵行動は水深で大きく三つのパターンに分けられ、第一は水面近くにおいて円軌道上で遊泳しながら産卵するパターン、第二は中層からスパイラル軌道を描き水面に向けて徐々に上がってきながら産卵するパターン、第三は水深10m前後において円軌道上で遊泳しながら産卵するパターンです。図20は、2006年に仕切り網内の第一のパターンで産卵した瞬間ですが、親魚の魚体が大きいため（10歳魚、体重約400kg）、産卵行動中には大きな水しぶきが上がり、産卵したとわかります。

産卵期は親魚養成機関の位置、年によりばらつきがありますが、ほぼ５、６月に始まり、７～11月まで続きます。産卵が見られるのは、ほぼ水温24℃以上の時期です。産卵時刻は親魚の群、年によって、午前中であったり、深夜であったりします。雌１尾１尾がバラバラな時刻に産卵をするのではなく、群れ全体で１日の決まった時間にほぼ同調して産卵します。

クロマグロ親魚は、他の種苗生産魚種の親魚よりも桁

図20　クロマグロ親魚が水面付近で産卵した瞬間

外れに大きいため、雌を取り揚げ麻酔をかけて標識を装着したり、大きさを測定したり、成熟度を調べるために卵巣卵の一部をサンプリングしたりという作業ができません。親魚の産卵情報を得るには、卵の親子鑑定から親魚の情報を集めることが必要となります。すなわち、採集した卵の DNA 分析によってそれを産んだ雌の DNA タイプがわかることで、ある日に採集した卵は何尾の雌が産んだのか、さらに、前回産卵した雌は今回産卵したかどうかが分かります。この分析を2001から2004年に、（独）水産総合研究センター奄美栽培漁業センターの親魚群（2001年時点で８歳魚）を対象に行った結果、年度毎、雌個体毎の産卵状況が明らかとなりました。４年間で19尾の雌が産卵し、そのうち４年間通じて産卵をしたのは２個体しかなく、３年間連続産卵は４個体、２年間は５個体、１年のみは８個体でした。このことから、雌は必ずしも毎年産卵するわけではないことが明らかとなりました。

さらに、本分析により産卵期間中の雌個体毎の産卵状況（2001年）も明らかとなりました。１尾の雌が産卵する連続日数は９日が最も長く、多くの雌は断続的に産卵することが分かりました。連続産卵しない場合の産卵と産卵の間隔は短くて１日、長い場合は２か月でした。雌の中には産卵しても極端に産卵回数が少ないものがあり、４尾の雌は2001年の産卵期に１日しか産卵しませんでした。産卵期を通じて特徴的なのは、産卵日には複数の雌が同時に産卵する傾向が強く、群れで同時に産卵する生態が強く窺われました。

３）親魚養成の研究の展望

これまでの研究開発結果から、クロマグロの親魚を産卵させ､大量の卵の確保が可能になってきました。また、養成施設での産卵生態も明らかとなってきました。しかし、親魚養成上の一番大きな問題点は、他の一般的な種苗生産対象魚と比べて､親魚が桁外れに大きいことです。一般に採卵に利用するには、天然魚の産卵年齢と推定されている５歳以上まで養成する必要があると考えられてきたことから、大規模な施設や多大な費用と時間が必要でした。しかし、2007年度に３歳魚からの採卵に成功した研究（農林水産技術会議事務局　新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「マグロ類の人工種苗による新規養殖技術の開発」2007～2010年度）における成果は、採卵までの養成期間を短縮することで大幅な低コスト及び省力化を実現する可能性を示しました。今後、年齢別に産卵する親魚の割合や、雌１尾当たり産卵数量を推定することで、必要な親魚の尾数、新たな親魚候補の確保のタイミングなどが明確となり、さらに効率化した親魚養成が期待できます。

また、この研究では東京海洋大学が産卵個体の小型化を目標とし、さらに分類上でクロマグロと同じ目に分類されるサバ目のマサバにクロマグロの卵を産卵させる借り腹技術の開発に取り組んでおり、将来的に有望な技術と考えられます。

（３）クロマグロの仔稚魚をいかに育てるか

１）仔稚魚飼育の工程

クロマグロ種苗生産機関では、以下のような工程で仔稚魚飼育が行われています。

a.受精卵の消毒

生簀から採集された受精卵は、卵が通り抜ける目合いの網を使って、卵よりも大きいゴミ、プランクトン、他の魚の稚魚などを取り除きます。卵の表面には、仔稚魚飼育段階で疾病を引き起こす可能性があるウイルス性神経壊死症の原因ウイルスや有害細菌が付着している可能性があるほか、仔魚に有害な肉食性のプランクトンなども混入する可能性があります。これらを消毒、除去するため、濃度0.5ppm のオキシダント海水で、受精卵を１分間消毒した後に、オキシダント除去海水で洗浄し、ふ化水槽（図21）へ収容しふ化を待ちます。

b.仔稚魚の飼育環境

ふ化水槽に収容後、１日くらいでふ化が始まります。ふ化が完了したら、ふ化仔魚（コラム８）を50～100m^3程度のコンクリート水槽に約１万尾/m^3の密度で収容します。水槽には通常屋内の水槽が使われます。水槽上面には、照度調整のための寒冷紗と呼ばれる農業用に使わ

コラム8

クロマグロの卵、ふ化仔魚

産卵されたクロマグロの受精卵は直径約0.9mmの球形で、海水よりも比重が軽く水面付近に浮く性質を持っています。受精卵は水温26～28℃では約24時間でふ化します。その大きさは全長約３mmで、腹部に親魚から受け継いだ栄養である卵黄と油球を持っています（図22）。ふ化後１～２日目に口が開き、餌を食べるようになります。

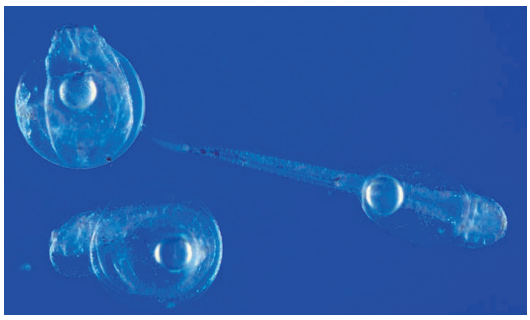


図22　クロマグロのふ化直前の卵とふ化直後の仔魚

図21　クロマグロ受精卵のふ化水槽

れるビニール製の黒い日よけが設置され、天候によって水槽表面の照度を調整します。ふ化して約10日経つと飼育水を徐々に換えますが、使用する海水にはウイルス性神経壊死原因ウイルスが混入している可能性があるので、卵消毒の時に使用したようにオキシダントでウイルスの感染力を失わせます。しかし、オキシダント海水のままにすると仔魚に影響が出るので、飼育には活性炭でオキシダントを除去した海水を使用します。また、水槽底の汚れの状況を見ながら、必要に応じてサイホンやポンプを使って汚れを除去します。

c.仔稚魚の餌

ふ化後２日目に口が開くので、別の水槽で培養したシオミズツボワムシ（大きさ約0.2mm：コラム９）を与え、ふ化後20日目程度まで与え続けます。ふ化後15日目、全長10mmごろから魚食性が強くなるので、餌としてマダイやヒラメ、ハマフエフキのふ化仔魚を与えます。その後、ふ化後20日目、15mmぐらいからイカナゴシラスを与え始め、ふ化後40日目、全長50mm程度まで飼育します（図23）。この間ふ化後15日目ごろから成長差が生じますので、大きな個体を選別して他の水槽へ収容します。全長50mm程で水槽から取り揚げ、海上生簀に移します。

d.稚魚の取り揚げ、海上生簀での育成

陸上水槽での取り揚げ後、稚魚は海面の生簀網内に収容され、イカナゴシラス、イカナゴミンチを餌に育成され、ふ化後４か月で30cm程度に成長します。この段階まで到達すれば、仔稚魚の段階ほど一度に大量に死亡することはありません。しかし、摂餌が活発であることから、１日に何回にも分けて給餌し、高成長を維持することが重要です。

２）種苗生産における問題点の解決に向けて

種苗生産機関におけるふ化仔魚から30㎜サイズの生残率は、2006年時点で平均0.23％（最高事例５％）です。マダイやヒラメにおいては、１つの事業場が数十から百万尾の種苗生産を行い、生残率は50％以上であるレベルとは比べようもありませんが、2010年度までにこの生残率を５倍高め、養殖用種苗４万尾を生産する技術を開発する目標をたてて、研究が進められています。種苗生産上の問題は、ふ化後０～10日に見られる多くの仔魚が死亡する初期減耗、ふ化後15～25日までの共食いによる死

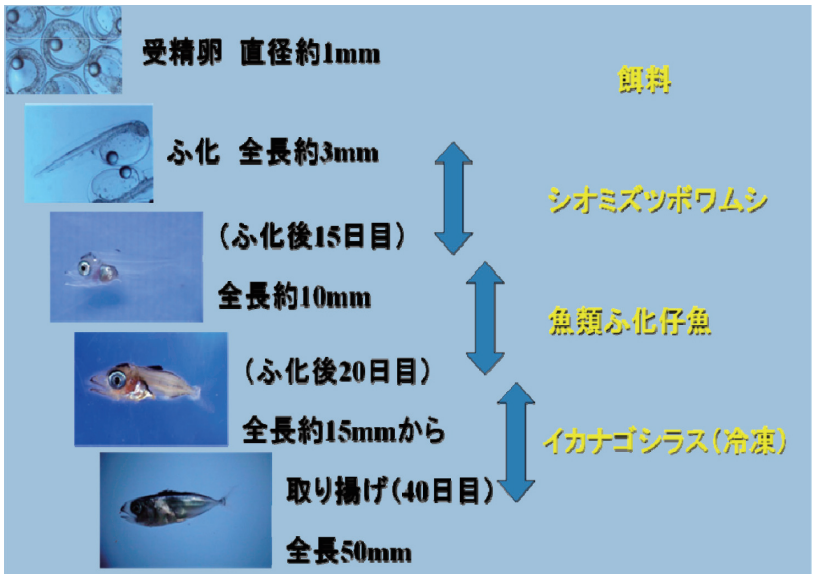


図23　種苗生産過程の餌料

コラム9

シオミズツボワムシとは

シオミズツボワムシは、大きさが0.2から0.3mm ほどの小さな動物プランクトンです。現在２種が知られており、比較的大きなＬ型ワムシ（*Brachionus plicatilis*）と比較的小さなＳ型ワムシ（*Brachionus rotundiformis*）が存在します（図24）。この２種類を以下、ワムシ類と呼びます。クロマグロを含めマダイやヒラメの海産魚類の多くは、直径１ mm に満たない卵を数多く産みます。これらのふ化仔魚の大きさは３ mm 程度で、口が開いたときに餌として丁度良い大きさの動物プランクトンが必要となります。ワムシ類は大きさの点で仔魚の最初の餌として適当で、頭部にある繊毛を使って水中を泳ぐため、仔魚から発見されやすい点でも適当な餌と言えます。また、仔稚魚が食べ残しても配合飼料のように急激に飼育水を汚すことがありません。ワムシ類はナンノクロロプシスやクロレラ等の微細藻類を与えることで大量培養が可能であるため、何十万尾という仔稚魚の飼育に大変向いています。ワムシ類の餌となるナンノクロロプシスは、通常ワムシ類の培養機関の屋外水槽で培養されますが、淡水クロレラは工業的にタンク培養で生産され、濃縮されて市販されています。このようにワムシ類は仔稚魚の餌として優れた点がいくつもあり、多くの種類の仔稚魚飼育にはなくてはならない生物となっています。

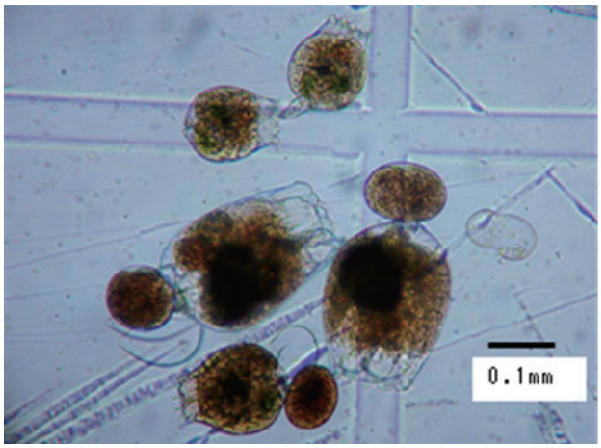


図24　シオミズツボワムシ

注：中央の大きな２個体はＬ型ワムシ。それぞれ１個ずつ卵を持っている。
　一番下の個体は卵を持っているＳ型ワムシ、上の小型２個体は卵を持っていないＳ型ワムシ。

亡と大きく２つに整理されます。目標達成に向けて長崎大学、近畿大学、水産総合研究センターが共同して、この２つの問題解決に向けて取り組んでおり、原因と対策が少しずつ明らかになっています。

a.初期減耗

現行の技術ではクロマグロのふ化後10日までの仔魚飼育の初期減耗が顕著です。この原因として、大きく二つの要因が知られています。すなわち、一つ目の要因はふ化仔魚が水面近くに浮上した時に、表面張力によって仔魚の身体が水面に捕らえられて死亡する浮上死で、二つ目の要因は仔魚の比重が大きくなり水槽底で死亡する沈降死です。

発育段階に着目して飼育環境を変えた比較飼育試験を行うことで、これらの要因別に死亡が起こる発育段階と対策について検討が行われました。その結果、ふ化後２日目に通常の通気環境と無通気環境では浮上死が顕著に見られましたが、水面で球を上下させ波を発生させる造波環境では、生残率は約80％と高く浮上死は見られませんでした。少なくとも、造波によりふ化仔魚が水面に近寄らないように制御することで、浮上死を回避できることが示されました。

造波環境ではふ化後５日目に沈降死による大量減耗が発生しました。この期の仔魚の発育段階は、卵黄、油球が消失し、鰾の形成が始まる発育段階に対応しており、仔魚の身体が作り変えられる時期と仔魚の比重変化の関連が窺われました。

b.共食いによる死亡

共食いについても発育段階との関連を検討するため、飼育水槽から魚をサンプリングし、２～10日おきに目視による行動観察とビデオ撮影による記録を行うとともに、ふ化後36日の稚魚について、飼育水槽での共食い行動の頻度を観察しました。その結果、共食い行動は、ふ化後16日（平均体長5.4 mm）の脊索末端屈曲期の仔魚から観察されることが判明しました。脊索末端屈曲期とは、後に尾鰭の骨となるまっすぐ伸びた脊索の末端部が、発育が進むと上部に曲がる発育段階をさします。その頃には遊泳能力が伸び、摂餌活性も高まります。また、稚魚の共食い行動は、給餌前にのみ観察され、給餌中および給餌後２時間はほとんど観察されないことが分かりました。以上のことから、クロマグロの共食い行動の発現時期は摂餌行動と密接に関わっていることが明らかになりました。

図25　クロマグロ仔魚の消化管内に観察された微粒子配合飼料

c.仔稚魚用の配合飼料開発

種苗生産過程では大量の餌用の他魚種のふ化仔魚が必要ですが、それを確保するには多大な施設と労力がかかります。他の種苗生産対象魚のように、クロマグロの種苗生産でもふ化仔魚の代わりに配合飼料を利用できれば大きな効率化となります。そこで、東京海洋大学は、仔稚魚用の配合飼料を開発するため、まず、開発中であるマダイ用微粒子配合飼料をクロマグロが摂餌するかどうかについて調べました。全長14.8mm（ふ化後20日）のクロマグロ仔魚に、粒径500～1,000μmのマダイ用微粒子飼料を給餌したところ、飼育６日目には40％の個体に摂餌させることに成功しました（図25）。しかし、成分の溶出による水質の悪化が激しいため、微粒子飼料による種苗生産には至りませんでした。現在、この問題を解決するため種々の素材について検討することにより水質を悪化させない微粒子配合飼料の開発に取り組んでいます。

おわりに

ウナギについては、飼育下で初めてシラスウナギの生産に成功してからおよそ６年が経過し、実験室レベルでニホンウナギのシラスを生産することは再現性のある技術となりました。しかし、養殖ウナギの性分化、親魚の養成、成熟誘起法、得られた配偶子（卵や精子）の質、ふ化仔魚の健全性、仔魚の適正飼育環境、適正飼餌料、ふ化後の生残率および成長、健全に変態させる条件などに今なお数多くの謎と問題点が残されています。そして人工種苗が養鰻用種苗として実用化されるために不可欠な、大量生産のための餌と飼育方法の開発が最大の難問として残されています。我が国では養殖用の種苗として

年間およそ１億尾のシラスウナギが必要とされていますが、養鰻業界にとっては１尾100円程度が望ましい価格の上限だと言われています。人工種苗が養鰻業の安定化や天然資源の保全に貢献するには、着実に大量生産を実現するための技術開発と飛躍的なコストの低減が必要不可欠なのです。

2005年度から開始された農林水産省委託プロジェクト研究「ウナギ及びイセエビの種苗生産技術の開発」の目標であったふ化後100日目までの生残率を従来の10倍に引き上げることはほぼ達成されました。その成果を受け、昨年決定されたワシントン条約等による規制やシラスウナギの不漁などでさらに逼迫する養鰻用種苗の供給事情に緊急に対応するために、本プロジェクトのさらなる強化と2011年度までの延長が決定されました。今年度からは優良親魚の養成、種苗量産システムの確立を目指した仔魚用飼料と飼育環境の最適化を中心課題として、新たな取組みが始められています。

人工生産したシラスウナギで養殖用種苗の一部をまかなうことができれば、天然のシラスウナギに対する漁獲圧を和らげることができ、天然資源の保全に貢献できるものと考えられます。また、人工種苗は季節を問わず生産が可能であるため、特に需要が大きい夏の土用の丑の日向け早期種苗の供給に寄与できる可能性もあります。さらに、完全にコントロールされた環境下でシラスウナギを生産することによって病気や寄生虫の発生を根絶することや、人工生産ウナギの世代を重ねることによって成長や肉質の優れた系統を作り出すことも期待されています。

一方、クロマグロについては、今後の養殖の発展には、養殖場の拡大、養殖用飼料の改善、種苗の大量生産技術確立の三つが大きな課題と考えられます。第一番目の場の問題は、内湾で潮通しの良い漁場はもうすでにマダイ、ブリ、カンパチ、トラフグ、真珠貝、といった既存の養殖対象種の施設で占められています。環境保全の観点からも既存養殖場でこれ以上密度を上げて養殖するのは困難な状況といえます。従って未開拓漁場である沖合への展開を考えざるを得ません。それには新たなハードとシステムの開発が必要となります。第二番目の養殖用餌料については、現在使用されている餌はまき網で漁獲されるサバ類を中心とした生餌です。しかし、これらの養殖用の餌として使われてきた生餌も、近年食用として海外輸出されるようになったため、市場価値が上がり、餌代の高騰に悩まされるようになってきています。その対策には、より安価な魚粉を使った配合飼料化を進めることにより生餌の保存に必要な保冷施設が必要なくなることで省力化、低コスト化をはかるとともに、魚粉以外のさらに安価なタンパク原料を導入する技術が必要です。第三番目の種苗の大量生産技術には、上述のように、飼育過程での生残向上、共食い防止対策が進められています。

日本には近畿大学が世界に先駆けて「完全養殖」に成功した事例があるとともに、種苗生産技術に関しては、クロマグロと同じサバ目で魚食性の強いサワラと共通した点も多いことから、ベースとなる飼育技術の蓄積と、飼育技術者の存在は強みと考えられます。クロマグロの種苗生産技術の始まりは、水産庁のプロジェクト研究でしたが、約40年の時を経てそれぞれの機関が技術を積み上げており、2007年度から実施している実用技術開発事業「マグロ類の人工種苗による新規養殖技術の開発」では、2006年度に我が国のクロマグロ養殖に使用された20万尾の天然種苗の20% を人工種苗に置き換えることが可能な生産技術開発を達成目標としており、クロマグロ養殖業への実用的な貢献が大いに期待されます。

（執筆担当：大村裕治、飯田貴次）

執筆協力

１．ウナギの人工種苗の実用化を目指して

（独）水産総合研究センター	養殖研究所	生産技術部長	横山雅仁
		生産技術部繁殖研究グループ長	田中秀樹
		生産技術部繁殖研究グループ主任研究員	玄浩一郎
		生産システム部飼餌料研究グループ主任研究員	古板博文

２．クロマグロ完全養殖に貢献する研究開発

（独）水産総合研究センター	業務企画部	研究開発コーディネーター	岡　雅一
	栽培漁業センター	宮津栽培漁業センター場長	升間主計
		奄美栽培漁業センター場長	塩澤　聡

図・写真等の出典

図２：日本養殖新聞のデータより
図３：Dekker et al.
図６：鰻学　松井魁著　データを元に作成
図12：（独）水産総合研究センター　養殖研究所
図16：鳥居(2008)から引用改変
図18：（独）水産総合研究センター　奄美栽培漁業センター
図21：（独）水産総合研究センター　奄美栽培漁業センター
図25：東京海洋大学
上記以外：（独）水産総合研究センター

参考文献

1．山本喜一郎（1980）ウナギの誕生　人工孵化への道、 北海道大学図書刊行会．札幌．

2．Dekker et al．Worldwide decline of eel resources necessitates immediate action．Fisheries 28(12), 28-30(2003)

3．松井　魁（1972）鰻学［生物学的研究編］、恒星社厚生閣、150-151．

4．宇野寛（1981）マグロ－その生産から消費まで－、成山堂書店、東京、35-52．

5．大竹二雄ら（1994）ウナギの生物学．月刊海洋26巻５号、263-332．

6．上柳昭治（1994）マグロ、シリーズ海第15巻、らくだ出版、東京、29-33．

7．上柳昭治（1994）マグロ類の産卵・初期生態、月刊海洋 No.291、534-538．

8．会田勝美、塚本勝巳ら(1999)ウナギのライフサイクル－その解明と制御－．月刊海洋　号外 No.18、海洋出版株式会社、東京．

9．廣瀬慶二（2005）うなぎを増やす　ベルソーブックス010.　成山堂、pp.37-94．

10. 塚本勝巳ら（2008）ウナギ資源の現状と保全．月刊海洋　号外 No.48、海洋出版株式会社、東京．

11. 中原尚知(2008)国内養殖生産の特質と参入条件、養殖クロマグロビジネスの経済分析、成山堂書店、東京、17-34．

12. 升間主計（2008）水産総合研究センターマグロ研究所が取り組むクロマグロの増養殖研究、養殖45巻10号、緑書房、東京、16-18．

13. 鳥居享司（2008）養殖マグロの生産量推移と大手資本の動向、養殖45巻10号、緑書房、東京、25-27．

『農林水産研究開発レポート』既刊リスト

No.1(2001.10)　麦の高品質化を目指して
No.2(2002. 1)　イネゲノム情報を読む
No.3(2002. 5)　循環する資源としての家畜排せつ物
No.4(2002. 9)　機能性食品の開発
No.5(2002.12)　バイオマスエネルギー利用技術の開発
No.6(2003. 3)　新たな用途をめざした稲の研究開発
No.7(2003. 5)　昆虫テクノロジー研究
No.8(2003. 9)　地球温暖化の防止に関わる森林の機能
No.9(2004. 2)　海洋生態系と水産資源－持続的水産資源管理の高度化を目指して－
No.10(2004.11)　食品の品質保証のための研究開発
No.11(2004.12)　食料・環境問題の解決を目指した国際農林水産業研究
No.12(2005. 3)　病害虫の総合的管理技術－化学農薬だけに依存しない病害虫防除－
No.13(2005. 7)　大豆の安定・多収を目指して
No.14(2005.11)　進化する施設栽培－大規模施設から植物工場まで－
No.15(2006. 3)　イネで牛を育てる－飼料イネによる国産牛生産－
No.16(2006. 3)　魚と貝のバイオテクノロジー－安全で信頼できる魚と貝を目指して－
No.17(2006. 7)　野生動物による農林業被害を防ぐ技術
No.18(2006.10)　新たな用途をめざした稲の研究開発　平成18年度版
No.19(2007. 1)　水田・畑輪作体系を進める効率的な新技術
No.20(2007. 3)　スギ人工林資源活用のための木材加工・利用技術の開発
No.21(2007. 7)　ゲノム情報の品種改良への利用－ DNA マーカー育種－
No.22(2007. 8)　売れる麦に向けた新技術
No.23(2007.12)　地球温暖化が農林水産業に与える影響と対策
No.24(2008. 5)　日本型精密農業を目指した技術開発
No.25(2008.10)　農業を支える基盤リソース－遺伝資源－

農林水産研究開発レポートについてお気づきの点等ございましたら、下記担当までお願いいたします。

担当：〒100-8950　東京都千代田区霞が関1-2-1
農林水産省　農林水産技術会議事務局　技術政策課　広報班
ＴＥＬ　03-3502-7407
ＦＡＸ　03-3507-8794
E-Mail：www@s.affrc.go.jp

インターネットでのご利用について

1　農林水産研究開発レポート

http://www.s.affrc.go.jp/docs/report/report.htm

2　農林水産研究開発レポート　ビデオ版

http://www.s.affrc.go.jp/docs/movie.htm

3　その他、農林水産研究成果等の紹介

・農林水産省農林水産技術会議

http://www.s.affrc.go.jp/

・研究成果情報

http://www.affrc.go.jp/ja/research/seika

・農学情報資源システム AGROPEDIA

http://www.affrc.go.jp/Agropedia/

・農林水産研究成果ライブラリ

http://rms1.agsearch.agropedia.affrc.go.jp/contents/JASI/index.html

・プロジェクト研究成果シリーズ

http://rms2.agsearch.agropedia.affrc.go.jp/contents/JASI/seika.html

4　食と農の研究メールマガジン

「食と農の研究メールマガジン」は農業担い手や食品産業、農林水産研究者はもちろん、消費者のみなさまなどに役立つ食と農に関する情報をお届けするメルマガです。配信は月２回で無料です。

登録は下記 URL からお願いします。

http://www.s.affrc.go.jp/docs/mg/mg_top.htm

農林水産研究開発レポート No.26
「広域回遊魚類（ウナギ・マグロ）の完全養殖技術開発」

2009年３月６日
監　　修　農林水産省　農林水産技術会議
編集・発行　農林水産省　農林水産技術会議事務局
〒100-8950　東京都千代田区霞が関1-2-1
ＴＥＬ：03-3502-7407
ＦＡＸ：03-3507-8794