

日本に強みの技術でもうかる養殖業へ

日本はウナギの完全養殖などで世界に冠たる種苗生産技術を持つている。今後、DNAマーカーを使ったゲノム情報も活用して魚の育種を本格的に進めることで「もうかる養殖業」を確立し輸出促進につなげることが大きな課題になってきた。この分野の専門家に秘策を語ってもらおう。



国立研究開発法人水産研究・教育機構
増養殖研究所 育種研究センター長

奥澤 公一 Koichi Okuzawa

おくざわ こういち
1960年千葉県生まれ。89年東京大学大学院農学系研究科水産学専攻博士課程終了。同年水産庁養殖研究所(現、水産研究・教育機構増養殖研究所)入省。2016年より現職。ブリの育種に取り組む。農学博士。水産育種研究会会長ほか。

育種は人為的に生物を進化

世界人口の増加、先進国における健康志向や新興国の経済発展に伴う食生活水準の向上によって世界の水産物消費は急増していますが、「獲る漁業」の増加は資源管理上限界があり、既に頭打ちの状態です。そこで、養殖が供給の担い手として期待され、さらに発展させる必要があります。

養殖の発展に向けカギとなるのが「育種」です。では、育種とは具体的にはどんなことなのでしょう。私たちが日々口にしている米、野菜、鶏、豚、牛などは「育種された品種」です。ところが水産物に目を転じると、育種されたものといえ、ノリ、サーモン、マダイくらいであり、ほとんど育種されたものではありません。海などで漁獲される「天然物」が育種産物でないことは容易に理解

できると思います。しかしウナギ、マグロ、ブリなどは養殖物であってもそれらはいずれも育種されてはいないのです。

育種とは、換言すれば人為的に生物を進化させることです。この場合、進化の方向性(「育種目標」は人間の都合で決定します。遺伝的な多様性を持つ野生集団から人にとって好都合な性質を持つ個体の選抜を繰り返して育種集団(品種や系統)をつくります。育種は、世代を重ねる(継代すること)が必要ですので、かなりの時間がかかりますが、その効果は絶大です。穀物、野菜、家畜、鶏では育種される前の原種と育種された品種とでは可食部の収穫量や成長の早さ、栽培や飼育の容易さなどに雲泥の差があります。

魚類育種の経済効果として、高成長による生産期間の短縮、飼料効率の改善による飼料代の削減、

病気に対する抵抗性の付与による生残率の向上などによる生産コストの削減、身への脂の乗りなど消費者ニーズに合った製品がつけられることによる付加価値化などがあります。さらに、選抜によって獲得できる高成長形質は、魚類では家畜に比べて五〜六倍大きいと言われています。そこで今、早急かつ効果的に育種を進めることが、経営難に苦しむ日本の養殖業にとって極めて重要な命題の一つになっているのです。

人工種苗への転換が政策

世界的に見て、魚の育種があまり進んでこなかった理由としては、農耕や牧畜と比べて養殖の歴史が浅いことが挙げられます。かつては魚の天然資源は豊富で、海には無尽蔵に魚があると錯覚され、いくら漁獲しても構わないとしていた時代

もあり、養殖はそれほど必要ありませんでした。また、魚類育種には大掛かりな飼育設備が必要であるというハードルもあります。

日本の状況を振り返ってみると、一九六〇年代の高度経済成長に伴う海洋汚染や埋め立てなどによる沿岸漁業資源の減少、さらに七〇年代からは各国が排他的経済水域を設定（二〇〇カイリ時代の到来）したため遠洋漁業が衰退し、これに呼応して養殖のニーズが増大しました。本格的な魚類養殖はこの頃から盛んになりました。さらに、魚類養殖の特徴として天然種苗の利用がありません。ブリ養殖にはおよそ九〇年の歴史があります。養殖のための稚魚（種苗）のほとんどを自然界から漁獲していますので育種は進んでいません。クロマグロ、ウナギも同様です。天然魚を養殖に利用することに対しては天然資源に悪影響を与える懸念があります。逆に人工種苗を使えば、環境に優しく持続可能（サステイナブル）という評価を受け、国際認証の取得や輸出にも有利になります。このように天然種苗を用いた養殖から人工的に生産した種苗を用いた養殖への転換が望まれており、今年四月に閣議決定された新たな水産基本計画にも目標として掲げられています。

養殖魚では育種が進んでいないという話をしました。例外もあります。大西洋サケ（アトランティックサーモン、以下アトラン）は、現在、すしネタとしてナンバーワンの人気を誇っており、

スーパースターの鮮魚コーナーにも堂々と並んでいます。この背景には七〇年代からノルウェーで始まったアトランの育種があります。六〇年代にノルウェー沖の北海油田が発見され、その莫大な収

入を永続する新産業へ投資することが国家戦略として検討され、その一つが輸出産業としてのサケ養殖でした。その頃の魚類育種の世界では「魚類の育種はあまりうまくいかない」という通説がありました。これは卵からふ化した魚類の稚魚が総じて小さく、個体ごとの識別が困難であるため家系の記録が取りにくいという理由からです。ノルウェーでは家畜育種の専門家を水産分野に招き入れ、新しい視点で科学的理論に基づいたアトランの育種を展開して大成功を収めました。七〇八世代の育種の結果としてアトランは出荷サイズまでの養殖期間が四〇カ月から二〇カ月に半減し、魚体一キログラムの生産に必要な飼料が三キログラムから一・二キログラムと半分以下になりました。これにより非常に低い生産コストを武器として日本をはじめとする世界の市場を席巻してきました。ノルウェーのアトランの育種の経済効果は年間五〇億円と試算されています。

ノルウェーではアトランの成功体験を基に、ティラピア、エビなどの育種プログラムも手掛け成功を収めています。ノルウェーには産業界から利益の一部を国の研究開発に還元する仕組みがあり、後述するゲノム育種の研究も精力的に進められていて現状ではノルウェーが水産分野の育種をリードしています。

DNAマーカーでゲノム育種

それでは、この間の日本では何が起こっていたのでしょうか？日本ではバイオテクノロジー育種として染色体操作や遺伝子組み換えの研究が盛んに行われました。この時期は世界で分子生物学が大きく発展しました。バイオテクノロジーが隆盛を極め、何もかもが「遺伝子」で説明できるという風潮がありました。

日本の染色体操作の研究では「信州サーモン」といった品種の開発などに結実し成果を上げています。一方で、遺伝子組み換え技術は、社会に受け入れられるのが難しいといった事由から日本では実用化には至っていません。現時点で過去を振り返れば、育種についてはノルウェーがとった戦略に軍配が上がるでしょう。もちろん、育種は遺伝という現象に基づく行為であり、遺伝の本体は遺伝子です。ところが育種はある意味で遺伝子研究の対極にあり、極論すれば育種学を志す者は、遺伝子そのものの探究は脇に置くべきだと思います。例えば、体の大きさ（人なら身長ですが）はかなりの割合を遺伝で説明できますが、この性質には数多くの遺伝子が関与していることが分かってきました。このような場合にはその遺伝子全てを明らかにして、さらにそれらを制御するというのはあまり良い戦略ではありません。

現在、私たちはアトランに追い付き追い越すことを目標に、遺伝子そのものではなく、ゲノム全体の情報としてDNAマーカーを利用したゲノム育種を進めています。

ゲノムは生き物にとつての時間軸も含めた全設計図です。受精卵という一つの細胞から分裂を繰り返して、その生き物がいつどんな形になるかいつ頃子どもをつくるかなど全ての情報が書かれています。全遺伝子が記載された本と比べていただいても良いかと思えます。この書物（ゲノム）は子どもに伝わるときに若干書き換え（組み換え）

られ、また父親と母親の両方のゲノムが一セットずつ伝わるので、個体を持つゲノムセットのバリエーションは世代ごとに増えていきます。このところが進化および育種の源泉です。

ヒトの全ゲノムが解読された二〇〇〇年初頭と比べ、今では分析技術が格段に進歩し、ゲノム解読に掛かるコストが低くなり、ブリ、クロマグロ、ウナギなど養殖魚のゲノムもほとんど解読されています。ゲノムは個体ごとに異なっていて、その違いが体の大きさ、色、形あるいは性格や行動の違いに反映されます。つまり理論的にはゲノムを調べることでその個体の特徴を把握することができます。

DNAで耐病性高い魚の選抜も

養殖魚でもゲノムを使った育種が始まっています。私たち増養殖研究所育種研究センターでも一〇年ほど前からヒラメやブリで「病気にかかりにくい」という性質(耐病性)についてのゲノム育種を進め、耐病性系統のヒラメやブリを開発し、実用化までもう少しというところまできました。これらは、マーカーアシスト選抜という手法で開発されています(図1)。ゲノムはDNAという物質で構成されていますが、ゲノム上のDNAの特徴的な部分をマーカー(DNAマーカー)として利用します。DNAマーカーは一九九〇年代から開発が活発化し、育種にも利用されてきました。それ以前の古典的な選抜育種では、各個体の外から見える特徴(表現型)を使って選抜をしています。表現型は親から子に伝わる場合もありますが、DNAの組み合わせ(遺伝子型)や環境によって

は見かけ上消えてしまう場合もあります。しかしDNAは親から子に確実に伝わるので、見かけの表現型や環境に左右されずに、より正確な選抜ができます。DNAマーカーを頼りに、耐病性の原因になっている遺伝子のゲノム上の場所を調べることができ、さらにその場所にある耐病性に関係したDNAの特徴(遺伝子型)も特定できます。つまり、耐病性の遺伝子型(耐病性マーカー)を持つ個体を選ぶことで育種ができます。

これまでの研究で病気にかかりにくい、かかりやすいという性質を決定している遺伝子の数は概して多くはないことが分かってきました。ですから、耐病性に関してはマーカーアシスト選抜が有効であり、この手法を用いて開発されたサケ、マス類やヒラメの耐病性魚が実用化されています。一方で前に述べたように「体の大きさ」などの性質には非常に多くの遺伝子が関係するので、一つ一つの遺伝子に着目するマーカーアシスト選抜がうまく機能しないことが推測されます。このような場合には遺伝統計学的手法を用い血縁関係をj利用して各個体の遺伝的な優秀さ(育種価)を評価する育種手法が開発され使用されてきました。さらに最近では血縁関係に代わってゲノム全体の類似性を使ったゲノミックセレクション(ゲノム育種価予測)という手法が使われはじめています。ゲノム上に数千から数万のDNAマーカーを配置し、個体ごとに調べてマーカーの種類を組み合わせて個体の性質を関連付けます。この方法では親子、兄弟といった血縁関係でなくDNAの塩基配列というより詳しいデータを使用するので選抜の精度が向上します。つまり良い魚を

より正確に選ぶことができるので育種の効率が向上し目標に到達する時間も短縮することができます。私たちもブリなどでゲノミックセレクションによる育種を計画中です。

日本は種苗生産技術で強み

日本では減少していく天然資源を補い、維持、増大させる「つくり育てる漁業」すなわち種苗放流の取り組みが長年行われてきました。顕著な事例は一八八〇年代に始まった北海道、東北地方でのサケのふ化放流事業です。人が産卵のために川を遡上するサケから卵と精子を採って授精、ふ化させて放流することで、帰ってくるサケの量が激増しました。一九六〇年代からは海産魚においても放流事業が盛んになっていきました。国策として種苗放流事業が展開されました。

マダイ、ヒラメなど十数種類以上の魚種について大量種苗生産技術が確立され全国各地で放流が行われました。現在では国の関与は少なくなり、各県や漁協などが主体となって地域の重要魚種の放流がなされています。このつくり育てる事業のために培われたさまざまな魚種の大量種苗生産技術が日本の大きな財産であり、国際貢献として東南アジア諸国など世界各地にも提供し活用されてきました。日本は紛れもなく魚類種苗生産の先進国なのです。

種苗生産した魚は養殖にも使えますが、放流する魚はなるべく天然魚に近いものにする必要があります。継代した魚を使うことはありません。つまり育種が発展する余地がなかったということです。従って、今後は育種に力を入れ養殖に適した

図1 ブリのハダムシの付きやすさに関するマーカーアシスト選抜

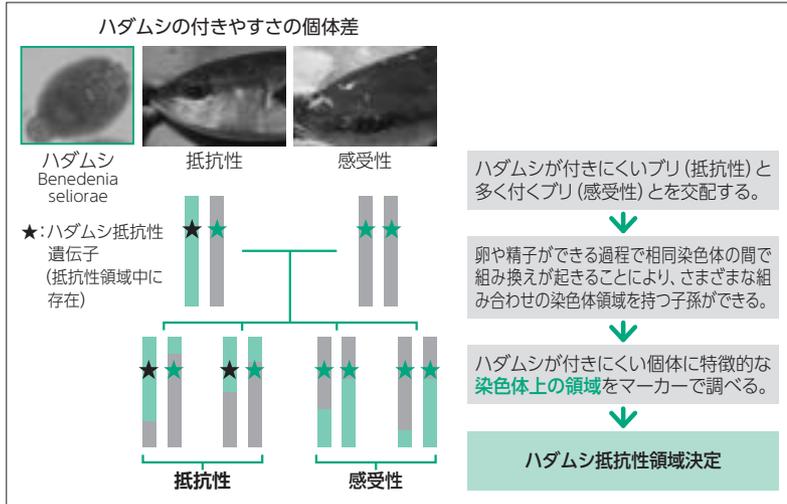
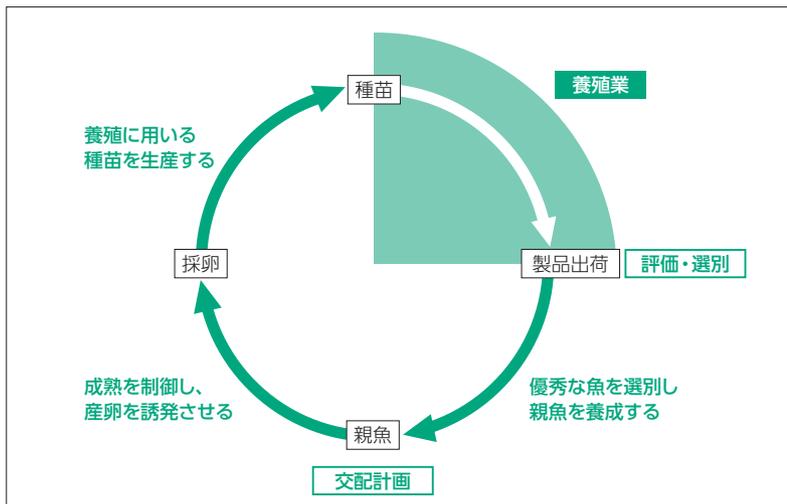


図2 養殖業を現場にした育種サイクル



研究開発をしています。この早く成長(変態)するという性質は遺伝することが判明し、この育種を進め、幼生の飼育方法や餌の改良などの研究と合わせることでウナギの人工種苗利用の道が開けることを期待しています。

また、日本で海産養殖魚として、生産量、生産額と共に最大であり、全生産量のおよそ半分を占めるブリ養殖は、飼料、加工など周辺産業と合わせて非常に重要な産業ですが、これまで述べたように人工種苗の利用や育種はあまり進んでいません(二部企業、大学のみでの実施)。そこで、当機構ではこれまでに培ったブリの人工種苗生産技術やゲノム情報、DNAマーカーという基盤技術を活用し、加えて実際の養殖場を育種の現場として活用し、当機構などの研究開発機関と民間企業など生産者が一体となって進める育種事業を立案し、今年七月一〇日に福岡市で開催した「第三回ブリ類養殖振興勉強会」で紹介しました。

当然のことながらブリ養殖ではたくさんさんのブリ(年間二〇〇〇〜二五〇〇万尾)を育てます。その中から優秀な魚を選別し、それを親にして次の養殖に用いる種苗をつくります(図2)。仕組みは単純ですが、ここにDNAマーカーを使った親子判別技術と、遺伝統計学による育種理論に基づく交配計画を組み込み、将来はゲノミックセレクションの展開も視野に入れていきます。今後はこの計画を具体化しブリの育種を進めていきたいと考えています。世界に冠たる日本の種苗生産技術とゲノム情報を利用した育種を進めることで「もうかる養殖業」を確立し輸出促進につなげることが今後のわれわれの研究の方向性です。

品種をつくる必要があります。

種苗生産技術など活用を

一方、バイオテクノロジーが隆盛を極めたことの遺産として、遺伝育種分野に分子生物学に精通した研究人材が豊富であることが挙げられます。そのおかげでブリ、カンパチ、クロマグロなど海産養殖魚の全ゲノムの解読およびDNAマーカーの開発で日本は世界をリードしています。

当機構では農研機構生物系特定産業技術研究支援センターによる競争的資金「革新的技術開発・緊急展開事業」の先導プロジェクトにおいて、

東京大学や理化学研究所などと共同で「横断的育種技術の開発と重要種への展開」を実施し、ブリ、ウナギ、アコヤガイ(真珠)などの先端的な育種に取り組んでいます。ウナギに関しては増養殖研究所において、二〇一二年にそれまでは到底不可能と思われていた人工種苗生産に成功、その後、人工生産したウナギを育てて産卵させ、その卵からまたウナギを育てるという完全養殖にも一〇年に成功しました。このような技術的基盤の下に、現在は、早く成長する(レプトセファルスという幼生のステージから短期間で変態して稚魚『シラスウナギ』になる)という性質を育種目標として

研究開発をしています。この早く成長(変態)するという性質は遺伝することが判明し、この育種を進め、幼生の飼育方法や餌の改良などの研究と合わせることでウナギの人工種苗利用の道が開けることを期待しています。

また、日本で海産養殖魚として、生産量、生産額と共に最大であり、全生産量のおよそ半分を占めるブリ養殖は、飼料、加工など周辺産業と合わせて非常に重要な産業ですが、これまで述べたように人工種苗の利用や育種はあまり進んでいません(二部企業、大学のみでの実施)。そこで、当機構ではこれまでに培ったブリの人工種苗生産技術やゲノム情報、DNAマーカーという基盤技術を活用し、加えて実際の養殖場を育種の現場として活用し、当機構などの研究開発機関と民間企業など生産者が一体となって進める育種事業を立案し、今年七月一〇日に福岡市で開催した「第三回ブリ類養殖振興勉強会」で紹介しました。

当然のことながらブリ養殖ではたくさんさんのブリ(年間二〇〇〇〜二五〇〇万尾)を育てます。その中から優秀な魚を選別し、それを親にして次の養殖に用いる種苗をつくります(図2)。仕組みは単純ですが、ここにDNAマーカーを使った親子判別技術と、遺伝統計学による育種理論に基づく交配計画を組み込み、将来はゲノミックセレクションの展開も視野に入れていきます。今後はこの計画を具体化しブリの育種を進めていきたいと考えています。世界に冠たる日本の種苗生産技術とゲノム情報を利用した育種を進めることで「もうかる養殖業」を確立し輸出促進につなげることが今後のわれわれの研究の方向性です。

海外市場を見据えた認証で攻めの水産を

天然水産資源の枯渇リスクが高まる中で、持続可能な漁業への裏付けとなる国際的な水産認証への関心が強まる。日本は養殖技術で強みを持つが、「水産認証」を受けている漁業や養殖場が少ない。今後、海外マーケットに打って出るためにも国際的な認証確保が大きな課題となってきた。

持続可能な漁業の証明

まず「水産認証制度」の問題から入りましょう。世界的に知名度のあるMSC（海洋管理協議会）認証は天然の水産物を、またASC（水産養殖管理協議会）認証は養殖水産物を対象とした海洋の自然環境や水産資源を守って獲られた水産物認証制度です。

現在、クロマグロやカタクチイワシなど海の水産資源の約二〇％が、過剰漁獲の状態にあると言われています。世界的に天然水産資源の枯渇問題が深刻化する中、水産養殖に対する需要は年々高まっており、二〇二〇年までには、世界の水産物の四〇％以上が養殖によって生産されると予想されています。

一方、養殖の現場でも周辺環境への悪影響、労



アマタ株式会社サステナビリティ認証チーム
タスクリーダー

小川 直也 Naoya Ogawa

おがわ なおや
1977年島根県生まれ。2002年アマタ株式会社に入社。以来一貫してFSC森林認証（森林管理認証、COC認証）やMSC、ASC水産認証をはじめとする環境認証審査を行っている。また、環境認証のセミナー講師なども務める。

働条件・環境など、さまざまな問題が起きています。加工・流通・小売事業者が乱獲や環境負荷の大きい漁法・養殖場などによる水産物を見分ける手段が少なく、消費者にとっても、持続可能な漁業による水産物を選ぶことが難しいのが現状です。

MSC認証やASC認証は、そうした問題を解決するための仕組みとして生まれました（図1・2）。

これらに加え、認証されたそれぞれの水産物のトレーサビリティを確実にするため、加工・流通業者を認証する「COC（Chain of Custody）加工流通過程の管理」認証があります。認証を取得した漁業や養殖場からの水産物にはロゴマークを付けることができるため、加工・流通・小売事業者から購入する消費者まで、容易に判別し選択することができ、責任ある持続可能な水産資源の利用に誰もが参加できる仕組みになっています。

世界、特に欧米の水産物流通マーケットでは、水産資源枯渇や環境、労働に対する問題意識が早くから持たれていました。

今後ビジネスを続けていく上では、持続可能性への取り組みは必要不可欠との観点から、現在ではMSCやASCの認証水産物を優先的に調達することが「当然」となりつつあります。日本でも、近年、大手小売会社が、MSCやASCの認証水産物の販売に軸足を移しつつあります。

現在、日本でMSC認証を受けている漁業は、京都府機船底曳網漁業連合会のアカガレイ漁業（認証取得日：二〇〇八年九月一九日）、北海道漁業協同組合連合会のホタテガイ漁業（認証取得日：二〇一三年五月一三日）、明豊漁業株式会社のカツオ・ペンナガ一本釣り漁業「宮城県塩釜市」（認証取得日：二〇一六年一〇月一七日）の三件です。

図1 水産認証のしくみ

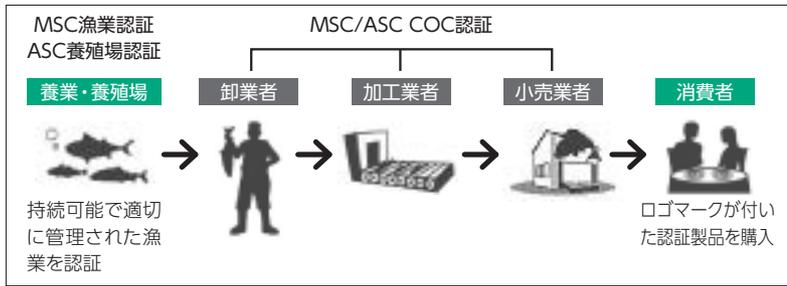


図2 MSC漁業認証とASC養殖場認証のロゴマーク



また、ASC認証を受けている養殖場は、宮城県漁業協同組合志津川支所戸倉出張所のカキ養殖場（認証取得日：二〇一六年三月三〇日）の一件のみで、このように日本ではまだ認証を受けている漁業や養殖場が少ないのが現状です。

水産業発展の好機になる

「水産認証制度」は、漁業者や水産加工・流通業者の意思によって取得する任意の制度で、法律で取得が義務付けられているものではありません。そのため、認証制度が世の中に広がるかどうかは、「マーケットに必要とされるか」にかかっています。

す。マーケットの需要が大きければ認証製品は拡大しますし、需要が少なければある程度の広がりどどまってしまう。漁業者としては、そのようなマーケットができるのを待つのか、それとも新たなマーケットを作っていくのかの選択が必要となります。新たなマーケットを開拓するには非常に労力がかかるため、既存の別のマーケットに販売した方が現状は楽でもうかるかもしれません。

ただ、日本や世界の水産資源の減少という問題を考えると、現状の収奪的漁業を続けていくと、次世代で漁業そのものが成り立たなくなってしまう恐れがあります。将来にわたり持続可能な漁業を続けていくためには、そのような漁業から獲られた水産物を必要とするマーケットを作り、そこに対し販売していく方が理にかなっていると考えられます。認知度不足で広がらないのはありません。新しい制度のため認知度が低いのは当たり前です。必要とされる制度になれば一気に拡大する可能性があります。

例えば、スマートフォンは一〇年以上前は非常に認知度の低いものでしたが、今日では知らない人はいないほど普及したツールとなりました。それはスマートフォンの必要性、欲求性を喚起し、新たなマーケットを作った結果です。

しかし、認証制度は「便利」「おいしい」などの個人の欲求とは別の次元の話です。そのため、マーケット拡大のためにはスマートフォンのように個人の欲求に訴えかけるだけでは駄目で、行政による制度構築など、別次元での取り組みが必要とされます。

日本では、マーケットに必要とされたら取り組む、という風潮が強いですが、特にヨーロッパの国々では自国の水産業を発展させる好機と捉え、国を挙げて積極的に活用することで、実際に産業規模を拡大しようとしており、そのような事例も出てきています。例えば、「グローバル・サーモン・イニシアティブ (Global Salmon Initiative: GSI)」という団体は世界のサーモン生産の約五〇%を占める一四社で構成され、会員企業全てが二〇二〇年までにASC認証を取得することを目標として掲げており、続々と認証取得しています。その結果、世界中のさまざまな国で、ノルウェーやチリのサーモンの存在感はますます上がり、売り上げを伸ばしています。

認証取得には補助金支援

また、国によってはMSCやASC認証取得に補助金を出しています。これは単なる産業保護ではなく、認証を取得することで他国へのマーケットアクセスがよりよくなるという産業奨励の意味で、戦略的に補助金が使われていると考えられます。例えばノルウェーは国有会社の「ノルウェー水産物審議会」が、ノルウェーサーモンの世界へのプロモーションに力を入れており、現在では世界九〇カ国以上に輸出し、六〇〇億円の市場を築き上げることに成功しました。

漁業の仕組み自体の改善も続けられています。ノルウェーでは自動給餌システムの開発などにより、漁業者の負担を減らしながら生産量を増やすことで、漁業者の収入が上がり、漁業に参加したい人が増えるという正の循環が生まれています。

す。

MSCは、一九九〇年代初頭にカナダ近海・グランドバンクのスケトウダラの漁場が乱獲により壊滅状態になったことを契機に、九七年にWWF(世界自然保護基金)と、スケトウダラの加工食品を販売していたユニリーバが主体となって設立され、九九年からは両組織から独立した非営利団体となっています。MSC漁業認証が世界で最初に発行されたのは二〇〇〇年三月で、同年には世界初のMSCロゴマーク付き製品の販売がイギリスで開始されました。

MSCの審査は、三つの原則に基づいた基準によるものとなります。その原則の一つ目に、資源として漁業は、過剰漁獲や、利用する個体群の枯渇を引き起こさない漁法で行われねばならず、枯渇した個体群の漁獲は、明確にその回復が望める漁法で行われねばならないこと。二つ目に、環境として漁業活動は、漁業が依存する生態系(生息域および依存種や生態学的関連種を含む)の構造、生産力、機能、多様性を維持できるものでなければならぬこと。三つ目に、社会として漁業活動は、地域、国内および国際的な法と規制を尊重し、かつ責任ある持続的な資源利用を求める制度および運営が行われる体制を組み入れた効果的な管理システムでなくてはならない、ということです。

持続可能な天然魚漁業に対する世界有数の認証プログラムを提供するため、MSCのロゴマークと認証制度は最優良事例ガイドラインを満たしています。しっかりとしたプロセスや独立性、透明性、公平性、およびステークホルダーとの協議といった価値を維持するために、国際的で専門的

な基準を順守しています。

水産物認証制度において、責任ある漁業のための行動規範(国連FAO)、水産物エコラベルのためのガイドライン(国連FAO)、社会環境基準設定のための適正実施規範(ISEAL)、世界貿易機関の貿易の技術的障壁に関する協定の全ての国際基準と一致しているのはMSCだけです。

MSCでは、特に資源が減少していないか、周辺環境に影響を与えていないかということ、単に認証取得希望団体の操業海域のみで示すのではなく、その魚種全体に対して示すことが求められます。

そのため、回遊性魚類については国を超えた協力が必要で、データ取得もハードルが高いものとなっています。また、審査項目も非常に多いため審査費用も高くなり、小規模な漁業にとって、現状では認証取得が難しい制度となっています。

クリア項目を二つつ改善

ASCは、WWFとIDH(オランダの持続可能な貿易を推進する団体)の支援の下、二〇一〇年に設立された独立した国際的な非営利団体です。

ASCの認証制度の根幹となる基準は、「アカルチャー・ダイアログ(水産養殖管理検討会)」という円卓会議で、多様な関係者の意見を基に策定されます。この検討会は、ASC認証の対象となる魚や貝の種類別に設置され、運営委員会を中心に、検討会の開催と議論、基準案の公開とパブリックコメントの実施などを経て、基準を策定します。この過程には、研究者や環境保護団体だけでなく、生産者や生産者団体、バイヤーを

はじめとする水産物流通関係者が参加して、さまざまな視点から認証制度の根幹となる基準作りが行なわれています。この検討会が策定した基準はASCに引き継がれ、その後はASCが基準を管理することになります。

現在のところ、ASC認証の対象となっている魚介類は、全部で二二品目。これらのうち、すでにティラピア、パンガシウス、サケ、二枚貝(カキ、ホタテ、アサリ、ムール貝)、アワビ、淡水性マスについては、基準作りの作業が完了し、認証製品が流通しています。また、一六年一〇月にはブリ・スギ類のASC認証基準が策定され、今後の展開が期待されています。

ASCでは、魚種ごとに基準は異なりますが、基本的には養殖場が周辺の水域環境に悪影響を与えていないか、また稚魚や餌を天然のものに依存する場合は、それらの天然資源が持続可能な状態であるかどうか、が重要なポイントとなります。さらに、抗生物質などの薬剤の使用に対しても厳しい制限があります。通常の養殖方法ですと、水質や底質への環境負荷があったり、稚魚や餌のものと異なる天然資源の持続可能性が十分確認されていないかったり、病気発生時には抗生物質が使用されているなど、ASC認証取得のためにクリアしなければならない項目が多くあり、それらを一つつ改善しながら、認証取得に向けて取り組んでいくことが必要となります。

ただ、ASCは実現困難なハードルを設定する制度ではなく、既存の養殖のトップランナーを一つの目標として目指すといった基準設定がなされているので、努力すれば認証が取得できるもの

となっております。

東京五輪で持続可能性の前進を

すでに各方面で話題になっていますが、二〇二〇年の東京オリンピック・パラリンピックでは選手村や競技場などで提供される水産物の調達基準を定めています。オリンピックは従来、スポーツと文化の祭典と言われてきましたが、現在、国際オリンピック委員会（IOC）は、スポーツ、文化に並ぶ重要な側面として「Sustainability（持続可能性）」を掲げています。また、持続可能性の一環として、「レガシー（受け継ぐべきもの）」は何か、ということも重要視されています。これは、オリンピック・パラリンピックを一過性のものとして済ませるのではなく、その開催によって、その都市や国、時代に何を残し、受け継いでいくのか、という考え方です。

IOCには「IOCサステナビリティ・レガシー委員会」が設置され、持続可能性やレガシーに関する助言、推進を行っています。このように、現在、オリンピック・パラリンピックは、大会全体を持続可能性に配慮したものとして開催することが必須となっております。持続可能性への取り組みは、あらゆる活動、資源に求められており、建物に使用される木材や、関連施設で食事として提供される農産物などにも要求されています。特に水産物に関しては、東京オリンピック・パラリンピック組織委員会から三月に発表された調達基準での基本的な考え方は以下の通りとなっております（<https://tokyo2020.jp/jp/games/sustainability/sus-code/>）。

一つ目は「漁獲又は生産が、FAO（国際連合食

糧農業機関）の「責任ある漁業のための行動規範」や漁業関係法令等に照らして、適切に行われていること。」二つ目は「天然水産物にあつては、科学的な情報を踏まえ、計画的に水産資源の管理が行われ、生態系の保全に配慮されている漁業によつて漁獲されていること。」三つ目は「養殖水産物にあつては、科学的な情報を踏まえ、計画的な漁場環境の維持・改善により生態系の保全に配慮するとともに、食材の安全を確保するための適切な措置が講じられている養殖業によつて生産されていること。」四つ目は「作業者の労働安全を確保するため、漁獲又は生産に当たり、関係法令等に照らして適切な措置が講じられていること。」です。

以上、持続可能な天然漁業を認証する国際的な制度であるMSC認証や、養殖場を認証するASC認証を得た水産物は、これらを満たすとして認められています。近年のロンドンやリオデジャネイロの大会でも、MSCやASCの認証水産物が積極的に提供されました。

なお、この調達基準では、国際認証であるMSCやASCの認証水産物のみならず、日本の水産関連団体が中心となつて運用する国内認証のMELやAEL、また認証制度ではなく自主計画である資源管理計画、漁場改善計画の下での水産物なども認められています。

それぞれの制度の持続可能性担保に対する実効性についてはさまざまな議論がありますが、ロンドンやリオの大会よりもさらに前進した取り組みとし、次の大会に引き継いでいくべきです。東京オリンピック・パラリンピックのレガシーとして、大会開催をきっかけにMSCやASCを活用した持続可能な水産物の調達という動きが定着することが期待されます。

海外の水産物に対抗する

日本では、これまでさまざまな魚種での養殖が進展してきました。個別企業や団体の努力により養殖技術は世界トップレベルと言われています。ただ、これらの努力は個別企業や団体の努力に委ねられています。

国内のみがマーケットの場合はそれで良かったのかもしれませんが、海外の認証された水産物が多く輸入されるようになってきている中、日本の水産業の持続可能性を証明し、海外の水産物に対抗できるものであることを示すためには、国内での認証取得を増やしていかなければなりません。

また、日本では人口減少に転じ今後の魚の消費量増加がなかなか見込めない中、海外マーケットに打つて出るためには、水産物の持続可能性を示すことは必須となつてきており、そのために認証制度の必要性はますます高まっています。

オリンピック・パラリンピックは、新しい水産マーケットを開拓するための大きなきっかけとなり得ます。実際、ロンドン大会後では、イギリス国内における持続可能な漁業の必要性の認知度が大幅に高まり、そうした水産物調達が進んでいるそうです。

ぜひ、持続可能な取り組みを進めると客観的な証拠を伴って表明できるMSC、ASCの取得を水産業界全体で目指し、日本国内のみならず、世界をマーケットとした攻めの水産業を展開していただきたいと思ひます。



未来の食料担う陸上循環型養殖の展望

漁獲漁業に代わって右肩上がりの水産物需要を支える養殖漁業は海洋汚染などの問題を抱える。そこで、産業としての陸上循環型養殖が急速に注目度が高まってきた。カギを握るのが環境制御によって魚介類を効率よく成長させ、さらに廃棄物を利用するという点だ。

養殖漁業が世界の水産を左右

近年、水産業における養殖漁業の生産は漁獲漁業の停滞に伴って世界中の水産物供給の第一要素となりつつあり、生産量に関しては漁獲漁業を上回りつつある。水産物の需要は右肩上がりであり、停滞している漁獲漁業を養殖漁業が下支えている。養殖漁業は「海の狩り」である漁獲漁業に代わり、陸上の他の生物生産とともに人工的な水産物生産の場としてこれからの水産を担うことになる。もう少し言えば、今後の養殖漁業の生産量いかんで世界の水産業が左右されることとなる。

これまで養殖漁業は学術研究機関での技術開発を基にして生産技術の向上が進められてきたが、この試行錯誤の中でさまざまな問題が確認さ

れている。特に天然水域をそのまま利用する生産形態では、天然水域への窒素・リンなどの環境汚濁物質の過度の排出、それに伴う赤潮などの有害プランクトンの爆発的増殖による生産物の大量へい死や、過密飼育により水産生物に有害な寄生虫症、細菌性およびウイルス性疾病が発生し、それを治療するための薬剤の大量投与による海洋汚染などが問題視されてきた。このような養殖の複数の問題点を解決する取り組みの一つとして、「陸上循環型養殖」が産業的にも注目されている。そこで、今回は陸上循環型養殖の現状と展望について解説する。

まず、陸上循環型養殖とはどういったものかを説明しよう。陸上循環型養殖は水資源の乏しい内陸での水産物生産を目的に開発され、発展してきたものである。通常の水槽や池に水を導入して常

に入れ替える従前の「かけ流し式養殖」は、水産生物が排せつした物質を生物にとって有害なレベルに達する前に排出することを目的に、一時間当たり水槽と同水量から何倍もの水量を交換、飼育水を排出することから、かなりの水量を必要とする。

陸上循環型養殖では、この排出した水を再度循環させて利用する。そのためにさまざまな水処理装置が組み込まれている。飼育槽から排出された飼育水は、沈殿槽やスクリーンフィルターでふんなどの固形沈殿物が取り除かれ、泡沫分離装置で浮遊している濁り成分(懸濁物)が取り除かれる。その後、生物濾過槽で水中に含まれている有害なアンモニアを細菌の力で比較的無害な硝酸塩へと酸化する。さらに、紫外線を通して殺菌し、飼育槽へ戻すという一連の水処理を行う。この工程は



東京海洋大学学術研究院
海洋生物資源学部門 助教

遠藤 雅人 Masato Endo

えんどう まさと
1975年埼玉県生まれ。東京水産大学大学院博士課程修了。博士(水産学)。日本学術振興会特別研究員、東京海洋大学海洋科学部助手を経て07年より現職。専門は水族養殖学。特に養殖システムおよび物質循環に関する研究に従事。



東京海洋大学の屋外アクアポニックス。右上：魚類飼育水槽の上に設置した水耕栽培ベッド 右下：ティラピア 左上：オクラ 左下：バジル

直接大量に取水をしない水族館や小さなものでは家庭用の金魚や熱帯魚の飼育装置と同じ原理を利用してしている。

環境制御で生産性の向上可能

陸上循環型養殖では換水方法にもよるが、多くても一日に水槽の一〇％の水替えて水産生物を飼育できる。さらに、この特徴を活かしてさまざまな飼育環境を実現できるため、特に、生産性の向上、および、安全性の改善、環境汚濁物質の排出防止に関しては天然水域を利用する養殖形態と比較すると格段に有利である。

まず、環境を制御することで生産性の向上が可能だ。飼育水の水质を管理し水産生物に最適な環境を実現することで水産生物の早期成長を促し

出荷までの期間を短くすることができる。例えば、循環式にすることで水温を一定に保つことができる。また、一般に魚類は体内浸透圧の維持に多くのエネルギーを消費している。そこで、浸透圧（塩分換算で〇・八％程度）に近い塩水で飼育することで、成長をより促進させる。なお、サケ・マス類では海水に適応させることで高い成長率が得られることが分かっている。さらに陸上の施設内養殖であることから、電照も自由に制御できるため、夜間に照明を点灯して給餌を行うことも可能である。

アトランティックサーモンやニジマスの陸上循環型養殖では、海水を用いて最適水温で飼育し、夜間電照により連続給餌を行うことでふ化から二年足らずで三〜四キログラムに成長させて出荷することができるようになってきている。これは通常の淡水ニジマス飼育に比べ二倍以上の成長速度である。

同様にこれらの環境制御は成熟にも効果があり、現在、わが国の国策で進められている太平洋クロマグロの産卵誘発にも応用されている。このような環境制御は天然水域を利用した養殖で行うことは不可能であり、今後さまざまな研究の余地が残されている。

次に、安全性に関しても密閉性が高いため、疾病や有害物質を持ち込みにくい特徴がある。環境汚濁物質の排出に関しては、直接的な排出を防止できるほか、水処理装置内での排水処理によって即座に天然の植物が利用可能な形態で天然水域へ排出することも可能である。最近の技術では海水を電気分解して塩素を発生させ、魚の排

せつしたアンモニアと反応させることで窒素ガスとして取り除く「電解脱窒」という方法が検討されている。さらに、陸上循環型養殖から排出される環境汚濁物質を利用する方法も検討がなされている。淡水の陸上循環型養殖では養殖排水中に含まれる環境汚濁物質を水耕栽培システムの液肥として利用するアクアポニックス（写真）が産業的にも確立し、アメリカやオーストラリアで実用的な生産が進められている。

このような背景から陸上循環型養殖の産業的利用が世界に広まりつつある。

海外事情と国内の事例

それでは、世界における陸上循環型養殖の取り組み状況を見ていこう。

陸上循環型養殖の黎明期に当たる事業はそれまでの研究成果を反映したティラピアやナマズの養殖である。アメリカでは内陸部に新鮮な魚が流通しにくく、水源に恵まれない土地も多い。ティラピアの陸上循環型養殖に関しては内陸部に多くの生産施設が建設、ノースカロライナ州を中心としてティラピアの循環型養殖企業が十数社営業しており、年間一〇〇ト以上を生産する企業もある。また、ティラピアはアクアポニックスの代表的な生産品種である。ティラピアの養殖排水で育てた水耕野菜は有機肥料で育てた野菜となるため、最近では水耕栽培用の有機肥料としてティラピアの循環型養殖をし、アメリカ農務省のオーガニック認証を取得する企業が出てきている。オーガニック認証を受けた農作物は受けていないものと比較して消費者の人気が高く、一・五

〜二倍程度の高値で販売されている。

チヨウザメも陸上循環型養殖に適用できる魚種の一つである。卵巣卵の加工品であるキャビアは高級食材として流通しているが、天然のチヨウザメは乱獲の影響で個体数が激減しており、近年、養殖生産が主流を占めるようになった。海外ではアラブ首長国連邦のアブダビ近郊で二〇〇七年から世界最大の完全循環型陸上養殖システムを稼働させている。

同施設はドイツ企業が技術提供を行っており、硝化細菌などの微生物を用いた生物濾過システムと自動給餌システムが導入されている。五万六〇〇〇平方メートルの養殖施設で年間に三五トのキャビアと七〇〇トのチヨウザメ肉を出荷している。キャビアは二〇一三年に初出荷され、日本でも「YASAキャビア」として一四年に発売が開始された。

日本の国内生産では株式会社フジキンがチヨウザメ養殖の先駆的な役割を果たしている。基盤事業であるバルブ製造の技術を活かして閉鎖循環型養殖を研究し始め、一九九八年には世界で初めてコンクリート水槽を用いたチヨウザメの完全養殖に成功した。二〇〇二年には抱卵個体の出荷を開始し、チヨウザメ養殖の普及を続けている。

サケ・マス類の養殖では淡水養殖はもとより、チリやノルウェーなどのギンザケやアトランティックサーモンなどの大規模海面養殖が盛んである。チリやノルウェーの海面におけるサーモン養殖は数十年という長きにわたって行われてきた。その結果、近年養殖場の汚濁が顕在化してきており、対策が急務である。実際に「キログラムの生産

に対して、海洋に放出される物質は養殖魚数^{キログラム}となり、その一部は養殖生^{いけす}周囲に沈殿し、蓄積されることとなる。これらの物質が長年の養殖で蓄積され、貧酸素水域や硫化水素の発生源となり、しばしば養殖魚の死亡を招いている（自家汚染）。

そこで最近、陸上循環型養殖施設の建設が各国で進められている。基盤となる技術開発はアメリカの保護基金淡水研究所やノルウェー食品・漁業・水産養殖研究所で行われ、十分に生産可能なシステムが開発されている。これらの研究所では水処理技術の有用性といった基盤研究から光周期や飼育水中の塩分制御といった環境制御技術、出荷の際の脱臭の検討などの産業を見据えた研究開発を行っており、その研究成果は今日の循環式養殖の発展に大きく貢献している。産業としてはカナダ、アメリカ、フランス、デンマークおよび中国でアトランティックサーモンの生産が行われており、カナダ、アメリカ、中国ではスチールヘッド（降海型ニジマス）の生産も行われている。一事業所当たり数百〜数千トの生産を行っており、大規模生産が進められつつある。

日本においては近年、生産地別の特徴を活かしたブランドサケ・マス類の生産が各地で行われ、比較的小規模生産で高価格販売がなされている。生産形態は海面養殖から淡水養殖までさまざまであり、品種改良を行い、耐病性や成長を向上させたブランド魚も生産されている。陸上循環型養殖においては福島に本社を持つ株式会社林養魚場が愛知県田原市で生産量二五〇ト規模のスチールヘッド養殖を進めている。また、同社は鳥

取県琴浦町に現地法人を立ち上げ、ギンザケの稚魚と成魚の生産を開始している（図）。

このほか、ヨーロッパではさまざまな養殖魚種について陸上循環型養殖の導入が進められている。

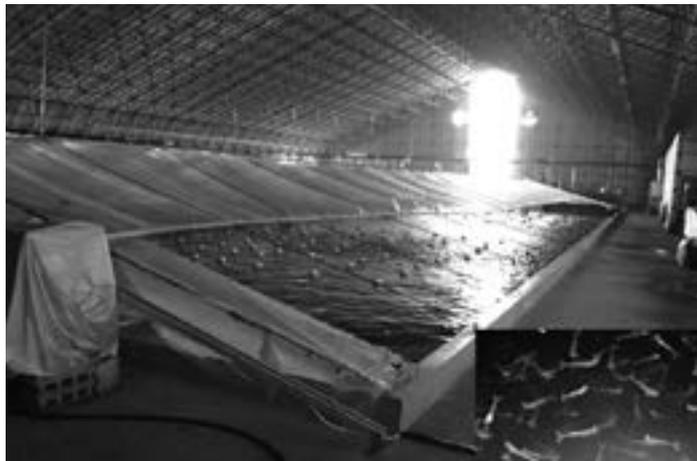
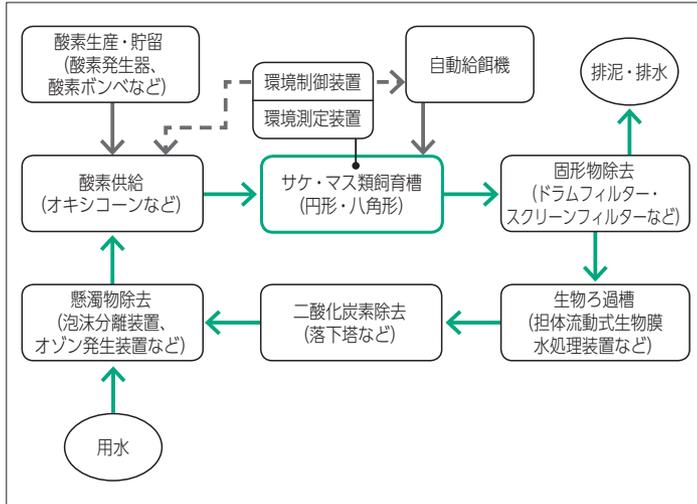
特筆すべきトラフグ・エビ養殖

一方、日本独自開発の陸上循環型養殖で特筆すべき事業では、トラフグ養殖とエビ養殖が挙げられる。トラフグ養殖では栃木県那須郡那珂川町で「温泉トラフグ」を生産・販売する株式会社夢創造がある。同社は海のない栃木県で塩分一・二%の温泉水を活用するとともに、施設の建設コストを抑えるため、小学校の廃校舎や室内プールを改造してトラフグを年間約二万五〇〇〇尾生産している。トラフグは天然ではフグ毒をエサから取り込むが、このトラフグは配合飼料を与えられているため毒化しない。また、出荷時の塩分制御でおいしくする「味上げ」を行っている。

エビ養殖では新潟県妙高市でIMTエンジニアリング株式会社がバナメイエビの生産を行っている（二四頁写真）。同社は五年間の研究期間を経て二〇〇七年から生産を開始している。飼育には沈殿物回収装置、人工海藻、波動流発生装置などの独自開発した装置を用いている。六〇〇トの池を二レーン使用し、「妙高ゆきエビ」のブランド名で生産を行っている。この二社については販路を契約店およびインターネット販売に限定して価格の安定化を図るとともにブランド力の維持を図っている。

夢創造では地元高校の水産科の卒業生を雇用しており、IMTエンジニアリングでは地元幼稚

図 サケ・マス類の陸上循環型養殖システムの代表的なフロー図



IMTエンジニアリングが独自開発したパナメイエビ養殖システム。池の中には人工海藻が吊り下げられ、波動流発生装置により、波が作られる。右下は池内のエビの様子

園保育園・小中学校の給食の食材として提供、地元イベントに参加するなど、地域連携を進めている。日本においてはこのような地域活性化を含む企業努力が陸上循環型養殖の成功のカギであると考えている。

連携で食料生産の未来確保

これまで陸上養殖のデメリットは施設の建設費用とエネルギー代などの運転費用が高く、事業性を望めないとの見解であったが、さまざまな検討が行われた結果、それを超える事業性が見い出されつつある。養殖に関しては天然水域を利用する生産形態では汚染問題などによって適地が減少し、漁獲漁業では漁業権などの複雑な問題が産

業への新規参入を拒んできた。しかし、陸上循環型養殖はこれらの問題を十分に克服できる可能性を秘めている。

また、陸上循環型養殖は他の養殖形態と比較してさまざまな業種との連携が可能な生産形態を有しているのは示したとおりである。すなわち、陸上で水産物生産を行うことで近隣のさまざまな施設との連携を図ることができる。例えば、工場やごみ処理場の排熱があればそれを利用した養殖も容易に行うことが可能である。

生産場所に関してはその土地の特性がさまざまであることから、それに適応し、さらに採算性のある生産システムが必要となるため、行政、事業主体、支援企業、学術機関等が密に連携を取っ

て一つの事業形態に組み上げていくことが重要である。

日本では豊富な水資源が利用可能であったため、陸上循環型養殖の特長を活かすことが難しかった。しかし、生産技術の革新はもとより、販売戦略の改善やさまざまな事業者との連携によって一産業としての形態を成しつつある。特にサケ・マス類の陸上循環型養殖は近年のトレンドであり、日本各地で今後生産が増えると予想される。

世界の人口増加はこれからも続いていくと予想される。食料生産も同様に増加していくことが必要不可欠であるが、新たな食料生産の場の開拓は厳しさを増す一方である。「持続可能な生産」を有限である地球の資源を利用して行っていくには食料生産に利用可能な廃エネルギーの融通や効率化を模索することが第一の課題となる。いかに効率よく生産を行ってそれを効率よく消費し、廃棄物の少ない生産、さらには廃棄物を利用する生産を行うかが重要となり、水産においては陸上循環型養殖がその端緒を開くと考えられる。また、給餌を行う動物生産においての廃棄物処理は自然環境の保護に必要なことであるが、天然水域を利用する養殖ではほとんど行われていない。アクアポニックスでは廃棄物を利用する新たな食料生産を行うことが可能であり、魚と野菜の両者を得ることができる。この廃棄物処理に事業性が付与できれば、自然環境の保護と複合食料生産を同時に行うシステムが構築できる。科学的根拠に基づき、さまざまな連携により無駄なエネルギーと物質フローが見直されることで未来の食料生産は安定的に行うことができると考えられる。

