

欧州の閉鎖循環式養殖研究の現状

漁獲漁業の生産量の世界的な低迷の中、近年の中国・欧米の水産物需要の高まりを補填するために養殖産業の更なる振興が必要となっている。しかし、養殖業からの排出物による環境負荷が周辺海域に悪影響を及ぼす問題が顕在化し、環境保全の観点や、特に、赤潮被害を回避する方法としても陸上での閉鎖循環式養殖が注目されている¹⁾。閉鎖循環式養殖の長所としては、特に、疾病防除などの外部リスク回避があげられ、死亡魚の低減による安定供給に寄与するだけでなく、無投薬の魚介類は安心・安全なオーガニック食品として、海外に大きなマーケットがあるものと予測され、閉鎖循環式養殖によって生産された養殖魚は輸出商品としても有望であると考えられる。しかし、我が国での閉鎖循環式養殖は近年、様々な研究が行われているが、産業規模での普及には至っていないのが現状である。

独立行政法人水産総合研究センター屋島栽培漁業センターでは閉鎖循環飼育の産業的普及のための第1段階として、2000年より種苗生産に特化した閉鎖循環型の飼育研究に取り組み²⁾、これまでに泡沫分離装置や間歇ろ過装置などの水浄化システム開発や上記の閉鎖循環飼育の長所を活用した実証的研究を実施している^{3,4)}。本報告は閉鎖循環式養殖の先進地である欧州（オランダ、ノルウェー、デンマーク、フランス）において、2010年8月30日～9月10日に行った視察を踏まえ、以下の研究機関の最新研究成果や産業規模で展開されている閉鎖循環飼育の事例情報を報告すると同時に、今後の閉鎖循環飼育の方向性について議論する。

【視察先研究機関】

- ・オランダ：Wageningen 大学、及び同大学 Institute for Marine Resources and Ecosystem Studies (IMARES), Yerseke 研究所
- ・ノルウェー：Tromsø 大学、及び The Norwegian Institute of Food, Fisheries and Aquaculture Research (Nofima) Marin 研究所
- ・デンマーク：Denmark 工科大学、National Institute of Aquatic Resources (DTU Aqua), Hirtshals 研究所
- ・フランス：French Research Institute for Exploration of the sea (IFREMER), Palavas 研究所

各国の閉鎖循環式養殖研究の概要とトピックス

1. オランダ オランダでは、Wageningen 大学の Johan Verreth 教授を中心とした研究チームが淡水養殖に関する研究でこれまでに多くの業績を上げ、特に、閉鎖循環式養殖システムに関する多くの研究業績は他の研究機関

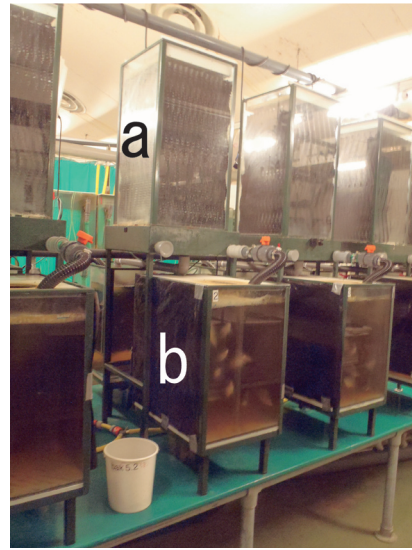


写真1. オランダの Wageningen 大学の各種要素解析用の小型閉鎖循環システム
a: 散水ろ床方式の生物ろ過装置, b: 飼育水槽



写真2. ノルウェーの Nofima marin 研究所での大西洋マダラ親魚養成システムの一部の大型泡沫分離装置

を圧倒している（写真1）。閉鎖循環式養殖システムによるヨーロッパウナギ及びアフリカナマズ等の淡水養殖では年間の飼育水1kl当たりの単位生産量は300～1,500kgであり、従来の流水飼育に比べて生産性は数十倍高い。また、海産魚の研究も進められており、IMARESではターボット（地中海及び北部大西洋に生息するカレイ目カレイ科の魚）及びシタビラメの閉鎖循環式養殖に関する研究が行われていた。また、オーストラリアから輸入したカンパチの稚魚を用いた閉鎖循環式養殖試験が実施されていた。本実験では、適正な環境条件を制御することにより、1年の養殖期間で最大4kgまで成長させることが可能で、生産密度も100kg/kl/年と高く、我が国の閉鎖循環式養殖の産業化に向けて参考となる情報が多かった。

2. ノルウェー ノルウェーでは Nofima marin 研究所において大西洋マダラの選抜育種に関する養殖について主に視察した。閉鎖循環システムを用いた飼育は親魚養成に限定されていたが、大型の泡沫分離装置を組み込んだシステムは機能的であり完成度が高かった。大西洋マダラの養殖はその資源が急激に減少したことから、Nofima marin 研究所が養殖研究を実施し、その成果が民間に技術移転され、現在では海上小割網を用いた養殖が事業化されている。陸上での親魚養成は高性能なシステム化が進み（写真2）、また、種苗生産では徹底したシステム化と省力化が実現され、効率的な高密度種苗生産が行われており、飼育工程上の自動化については日本の種苗生産施設では導入されていないシステムであることから、今後早急に検討する必要がある。大西洋マダラの稚魚育成時はかけ流し方式で行われており、その平均生残率は50%、25 kl水槽での5～10 cm サイズの收容密度は10 kg/klとのことであった。飼育水の循環率は20～30回転/日とかなり高く、また、飼育水中にはブローによる通気は施されておらず、飼育水への酸素補給は液体酸素を用いた自動酸素供給装置で行われていた。

3. デンマーク デンマークでは Hirtshals 研究所で閉鎖循環式養殖の普及型システムの情報収集を行い、閉鎖循環システムを導入した民間の養殖場も視察した。ニジマスでは普及型として完成されたシステムを用いた半循環式養殖が行われ、視察した Tingkaervad Dambrug 社では、2名の人員で年間440 tの生産量があった。次いで、20年前から完全閉鎖循環飼育でヨーロッパウナギの陸上養殖を実施している Buillund 近郊にある民間養殖場の Stnsgaard Eelfaem 社を視察した。ヨーロッパウナギの成魚は300 kg/klで飼育され、我が国のウナギ養殖生産密度の10~50 kg/klと比較すると、極めて高い密度であった。当養殖場では、4名の従業員で年間180 t生産しており、本種の成熟と種苗生産の研究についても実施中であった。デンマーク国内では排水規制が極めて厳しいため、養殖過程で排出される有機廃水は凝集沈殿処理された後に、固形物は有機肥料として利用され、また液部は貯水池で自然浄化の再処理後に放流されていた。その他の養殖魚種はターボットとシタピラメがあり、淡水魚ではパイクパーチ（ヨーロッパに生息するスズキ目スズキ亜目ペルカ科サンダー属の大型淡水魚）がある。パイクパーチは北ヨーロッパ全体で需要が高く、かつ高級魚であることから、将来的に有望な養殖対象種として、近年、完全閉鎖循環式養殖が試みられ、また種苗生産に関する研究にも力が注がれていた。

4. フランス フランスの IFREMER Palavas 研究所では Jean Paul Blancheton 博士が中心となってヘダイ及びスズキの閉鎖循環式養殖研究を行っていた。また、現在は、地中海クロマグロの種苗生産や養殖に関する研究にも着手していた。今回視察した他の国とは異なり、浄化システムに密閉式の物理ろ過及び生物ろ過方式を導入してい

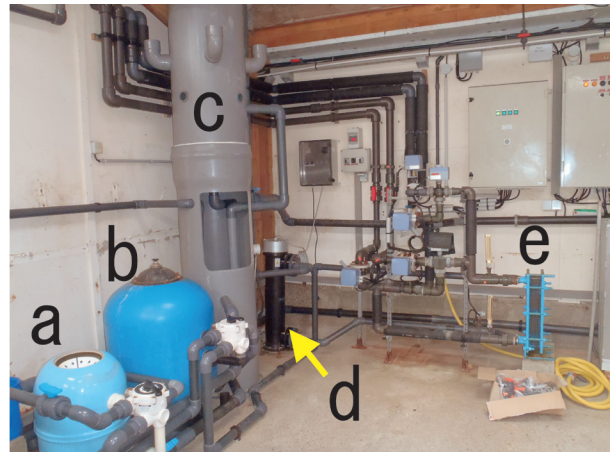


写真3. フランス IFREMER の基本的な閉鎖循環システム
a: 密閉式砂ろ過装置, b: 密閉式生物ろ過装置, c: CO₂除去装置, d: 脱窒装置 e: 調温用熱交換器

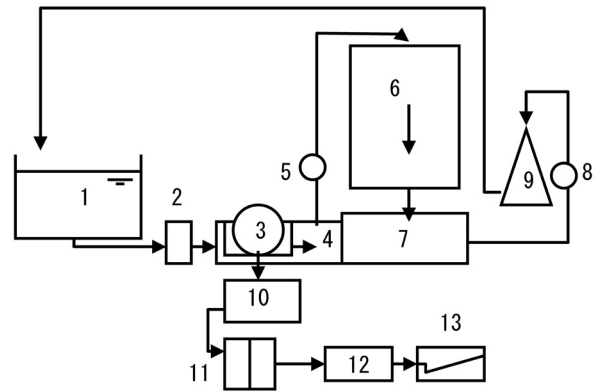


図1. オランダの Wageningen 大学の閉鎖循環飼育システムの構成

1: 飼育水槽, 2: 受け水槽, 3: ドラムフィルター, 4: UV殺菌, 5: 循環ポンプ, 6: 生物ろ過装置（散水ろ床）, 7: 受け水槽, 8: 循環ポンプ, 9: 酸素供給装置, 10: 排水貯水槽, 11: 脱窒装置, 12: 脱リン装置, 13: 凝集固液分離装置

るため、逆洗のための用水流出量が多く、他国よりも日間換水率が20~30%/日と高いこと、また、CO₂除去装置の仕様が大型化していることが特徴であった（写真3）。さらに、硝化細菌の培養についても研究が進められ、同研究所の施設内で民間企業がシステム開発を実施しており、民間との協力体制が充実している印象を受けた。

閉鎖循環式養殖システムの現状と今後の方向性

閉鎖循環飼育システムは様々な方法があり、開発された製品を如何に組み合わせるシステムを構築するかによって、性能やコストが異なってくる。特に、閉鎖循環飼育を行う目的（疾病防除、高生産性、省エネ、安心安全食品生産など）に合致したシステムで構成されることから、開発者の意向によって様々なタイプがあることが特徴であり、最終的にはシステムを如何に低コスト化するかが重要なポイントである。今回視察した欧州での基本的な閉鎖循環式養殖システムの構成は、物理ろ過装置、

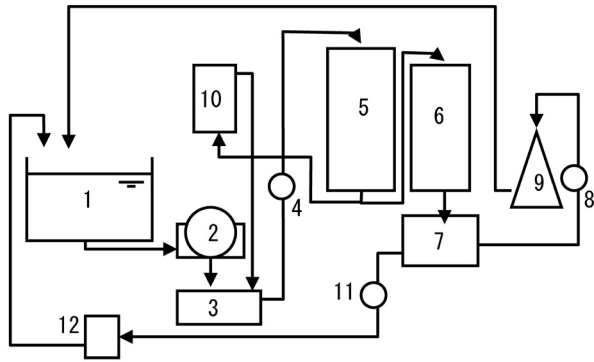


図 2. デンマークの DTU aqua の閉鎖循環飼育システムの構成
 1: 飼育水槽, 2: ドラムフィルター, 3: 受け水槽, 4: 循環ポンプ, 5: 生物ろ過装置 (散水ろ床), 6: 生物ろ過装置 (浸漬ろ床), 7: 受け水槽, 8: 循環ポンプ, 9: 酸素供給装置, 10: 脱窒装置, 11: 循環ポンプ, 12: UV 装置



写真 4. デンマークのウナギ陸上養殖場の閉鎖循環システムのドラムフィルター
 HYDROTEC 社の製品で円筒形ドラムにフィルターエレメントが設置されている構造

生物ろ過装置, 酸素供給装置, 沈殿物分離装置, 脱窒装置等で構築されていた (図 1, 2)。物理ろ過装置については, 大型化したシステムでは全ての養殖場や研究所でドラムフィルターが用いられ, 数十 μm 以上の水中懸濁物をマイクロスクリーンでろ過する装置で, 自動逆洗機能が付いた高い性能を誇るスウェーデンの Hydrotech 社の製品が用いられていた (写真 4)。また, フランスでは密閉式の急速砂ろ過装置がシステムに組み込まれていた。生物ろ過装置は, オランダ及びノルウェーでは散水ろ床方式, デンマークでは散水ろ床及び浸漬ろ床を併用した方式, フランスでは密閉型の多重構造のろ過方式が採用されていた。酸素供給装置は概ね oxygen corn と呼ばれる装置が用いられ, また, 一部ではデンマークの Buillund Aquaculture Service 社製の製品が用いられていた。一方, 自動水質分析やコンピューター制御の配合飼料の給餌のみならず, ワムシ・アルテミアなどの生物餌料の給餌についても自動化された給餌装置が導入され,

水質測定から給餌に至るまでの飼育作業の自動・省力化に関する技術については, 今後, 日本でも導入することを検討する必要がある。また, 自発給餌器についても全ての養殖場や研究所で用いられ, 自作の給餌器も多く見受けられた。特に, 北欧では高い人件費を抑制するために省力化機器の普及が顕著であった。

欧州における閉鎖循環式養殖の最大の課題は, 養殖過程で発生する糞が主体の大量の高濃度有機廃水を如何に処理するかである。現地では, 凝集剤で固液分離した後に, 沈殿物はさらに脱水して肥料として利用し, 液分は湿地帯で自然浄化させる処理が行われ, これに掛かる環境コストが問題となっていた。今後は, 魚類とゴカイ類・ナマコ類の複合養殖など, 生物を利用した廃水の再利用技術を高度化し, 廃水を有効活用する研究を推進することが, 産業化を実現するうえで重要な鍵であると考えられる。

また, 今回視察した欧州のほとんどの閉鎖循環システムで設置されていたドラムフィルターのように, システムの中核的装置は全て同一規格で高額であるため, システムのイニシャルコストが必然的に高くなるのが大きな問題である。このため, 今後の方向性としては, この中核的装置のコストを抑制しつつ, なおかつ如何にして性能を高めるかが重要な鍵となるであろう。そのために, 水産総合研究センター屋島栽培漁業センターで実施している自作可能な簡易システムや高性能且つ低価格な泡沫分離装置の開発など, システム全体の低コスト化を図る取組を一層強化し, 実証することが重要である。

おわりに

今回視察した欧州の閉鎖循環式養殖システムは各国の規制や環境条件に合った仕様で組み立てられており, その完成度は高く十分に機能し, 徹底した省力化による高密度陸上養殖が実現できていた。しかし, その生産された養殖魚の高コストに見合った価格が形成されない問題点は我が国と同様であった。欧州の閉鎖循環式養殖は, スペインなどのかけ流しによるターボット陸上養殖に比べて, 価格競争力の面において劣るために苦戦を強いられており, 必ずしもすべての国でその養殖手法が商業ベースで成立するとは限らず, 克服しなければならない問題である。一方, デンマークの民間企業のシステム・コンサルタント業務に携わっている Buillund Aquaculture Service 社では, システム設計, 装置開発, 施工のみならず, 養殖生産技術情報などの有益なノウハウを有していた。また, 当社は現地技術者との契約による技術指導コンサルタント業務も行っており, 今後の日本での閉鎖循環式養殖の産業化を図る上で, 必要不可欠な体制であると考えられる。今後, 我が国でも研究成果と養殖現場を繋ぐ実証的な取組の充実が必須であり, また民間へ普及するための体制作りも急務である。

最後に、本視察は水産総合研究センター事業によって実施したことをここに付記する。

文 献

- 1) 中里靖 (1999) 養殖排水の環境影響低減への施策. 水産養殖とゼロエミッション研究 (日野明徳, 丸山俊朗, 黒倉寿編), 恒星社厚生閣, 東京, 25-31.
- 2) TOMODA, T., H. FUSHIMI, and H. KUROKAWA (2005) Performance of a closed recirculation system for larviculture of red sea bream, *Pagrus major*, *Fish. Sci.*, **71**, 1179-1181.
- 3) 鴨志田正晃・山崎英樹・山本義久 (2006) 閉鎖循環システムを用いたマダイの種苗生産, 栽培技研, **33**, 67-76.
- 4) 山本義久 (2009) マイクロバブルの水産・養殖分野への応用, *Material Integration*, **22**, 24-29.

参考 URL

- オランダ： Wageningen 大学
<http://www.afi.wur.nl/UK/Research/>
- オランダ： IMARES Yerseke 研究所
<http://www.imares.wur.nl/UK/>
- ノルウェー： Nofima marin 研究所
<http://www.nofima.no/marin/en>
- デンマーク： DTU Aqua, Hirtshals 研究所
http://www.aqua.dtu.dk/English/Aqua_culture.aspx
- フランス： IFREMER, Palavas 研究所
<http://www.ifremer.fr/toulon/palavas.htm>

(山本義久・宮田勉・與世田兼三)

連絡先

独立行政法人水産総合研究センター

屋島栽培漁業センター

〒 761-0111 香川県高松市屋島東町 234

TEL: 087-841-9241 FAX: 087-841-9242

http://ncse.fra.affrc.go.jp/01profile/011stasions/0011_08yashima.html