

閉鎖循環式養殖システムへの海洋深層水利用の可能性

Possibility of Utilization of Deep Ocean Water
in a Closed Recirculating Aquaculture System

遠藤 雅人・竹内 俊郎

Masato ENDO and Toshiro TAKEUCHI

Abstract

A closed recirculating aquaculture system (CRAS) is a land-based facility with a water purification system. It has many benefits, including the reduction of waste loads to the natural environment and control of external influences (e.g. weather). The system has the ability to provide an optimum environment to culture aquatic animals under controlled environmental conditions. For example, ion composition of rearing water can be completely controlled. Teleost fishes expend energy to maintain osmotic pressure in their body under different osmotic environments. It has been reported that several fish species grow faster in artificial rearing water that has a similar osmotic pressure to that of fish body than in fresh or seawater. Deep ocean water (DOW) has been used directly and also as material processed with desalination, mineral collection unit, etc. We propose the utilization of minerals collected from DOW to produce artificial rearing water in CRAS. In addition, the use of artificial rearing water may be able to solve the problem associated with waste treatment in CRAS with marine fish species, since the salinity of the artificial rearing water is about 8 psu and that of the liquid fertilizer produced with seawater for tomato has about 4 psu salinity. Thus, waste from CRAS with marine fish can be effectively used to dilute culture fluid for vegetables like tomatoes, which are highly tolerant to salinity.

Key Words: closed recirculating aquaculture system, deep ocean water, mineral

1. はじめに

閉鎖循環式養殖システムとは、飼育水を循環濾過し、水質浄化を行いながら繰り返し利用して魚介類を養殖するシステムで、施設養殖の一つである。本報では閉鎖循環式養殖の特色について説明し、さらにその特色を活かしながら海洋深層水を利用した場合、どのような利用法が想定され、また、どのような効果がもたらされるかについて、主に海洋深層水の加工利用の観点から検討した。

2. 閉鎖循環式養殖システムの概要

海産魚における養殖形態は、海面に網生簀を設置する網生簀養殖、海水採取が可能な沿岸に陸上飼育池を設置し、常に海水を導入しながら養殖を行う掛け流し養殖、および飼育水を繰り返し利用する閉鎖循環式養殖がある。閉鎖循環式養殖は、陸上で海水採取が直接不可能な場所でも海水魚の養殖が可能であるという利点を持つ。通常、換水率は全水量の5～20%／日以下であるが、飼育水を全く入れ替えない無換水飼育も研究が進められている。これまで

に、様々な種で飼育技術の確立を目指した技術開発が進められており、海面から遠く離れた山岳地域においても海産魚の養殖が試みられ、「森のヒラメ」や「山のトラフグ」生産などの実績がある。

現在の閉鎖循環式養殖システムについて一例を図1に示す。飼育槽から排出された飼育水は、まず、糞等大型固体物を飼育水から分離するために沈殿槽へ送られる。その後、調温装置により水温調節が行われ、続いて泡沢分離装置を通して、浮遊懸濁物の除去を行う。次に、濾過槽にて活性炭等による物質の吸着を行う化学的濾過や魚から排泄されるアンモニアを硝化細菌の作用によって硝酸へ酸化する生物学的濾過が行われる。濾過槽には浸漬式、散水式等様々なものがあるが(菊池, 1999)、図1には後述する間歇式濾過槽を示した。最後に、紫外線殺菌装置による殺菌を行って飼育槽へ返送される。酸素供給は通気により行われ、飼育に必要な水中の溶存酸素濃度を維持する。全ての閉鎖循環式養殖システムに共通する最も重要な機能として、飼育水の濾過と再利用が挙げられる。通常、水槽に飼育水を溜めて魚を飼育すると、魚の排泄した物質はそのまま水槽内に貯留される。そこで、閉鎖循環式養殖では、専

用の水処理装置を接続して飼育水を循環させ、排泄される固体物の除去や有害物質の減毒化や無毒化を行う。特に、有毒なアンモニアに関しては硝化細菌を用いた2段階のプロセスで酸化を行い、最終産物として比較的無毒な硝酸が生成される(糸井, 2008)。この細菌群は固着性であり、濾材を基質として増殖する。循環濾過システムで重要なことは、アンモニアを硝酸イオンへ酸化するために必要な酸素供給と硝化細菌の安定性を維持するための濾材の閉塞防止である。この重要な点を満足させる方式として、濾過槽内で飼育水の水位を上下させる間歇式濾過槽が注目されている。基本的に浸漬・散水濾過槽と変わらない構造であるが、濾過槽が満水になった時点でサイホンの原理により排水が開始され、飼育水が全て排水された後、再度給水される仕組みになっている。これにより、濾材の洗浄と酸素供給を同時に行うことができる。また、このシステムは、位置エネルギーのみで水位の上下を行うため、浸漬濾床や散水濾床と同様に給水時のエネルギー以外は必要としない。

さらに、閉鎖循環式養殖は自然環境と独立した養殖法であるため、台風、赤潮などの自然環境からの

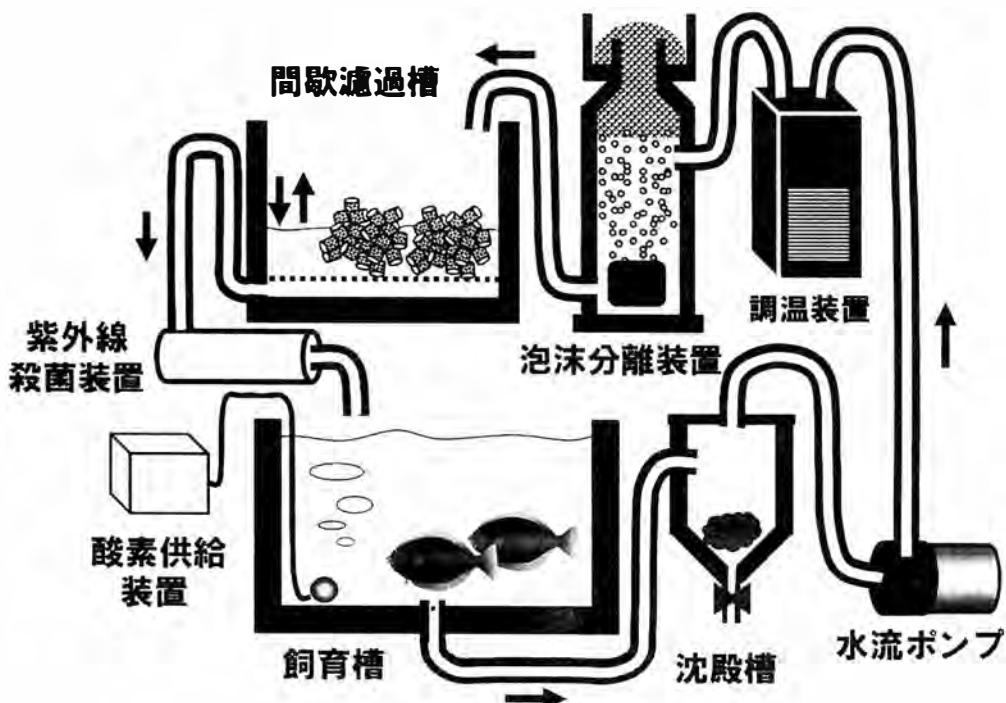


図1 閉鎖循環式養殖システムの基本構成

影響を受けにくく、水質汚濁物質の負荷等の自然環境への悪影響を防止することができる。ゆえに、施設型完全管理養殖が可能であり、水温管理、感染症の防止、廃棄物回収が容易であり、養殖環境を自由に制御できることも利点である。生物は自然環境に適応するため、多様な環境変動に応じた成長、成熟、再生産を行う。生物生産においては、その生産性を向上させるため、利用する生物の特性を十分に理解し、その生物の潜在的能力を最大限に引き出す飼育法が望まれる。特に、閉鎖循環式養殖システムにおいては、さまざまな環境因子を制御することが可能であるため、成長促進、飼料転換効率の向上や再生産の制御などを行うことが可能と考えられる。魚類は、水中で生活しているため、環境水の影響を直接受けるが、淡水や海水、すなわち自らの浸透圧とは全く異なる環境水の中で生息している。淡水魚類は、自らの浸透圧よりも低い環境下で餌や鰓などから必要なイオンを取り込み、イオン濃度の低い尿を大量に排出して浸透圧を保っている。逆に、海水魚は、海水を飲み込んで不必要的イオンを体外に排出している。この浸透圧調節には少なからずエネルギーが必要とされる。実際に、淡水魚の場合は浸透圧と同等の塩分に調整した飼育水で、海水魚では海水を希釈して飼育する試験が行われ、成長が促進されたという報告が数多くなされており(Boeuf and Payan, 2001)、浸透圧調節へのエネルギーの軽減がその理由と考えられる。なお、サケマス類やティラピアでは、淡水から塩水への移行の際に、海水適応の一つとして成長ホルモンが分泌されることも成長促進の要因になっている(金子, 2002)。

同様に、光環境の制御も成長促進につながる。我々は、ティラピア稚魚を用いて、光周期(明暗周期)の短縮およびそれに対応した給餌間隔の短縮が成長にどのような影響があるか調べた。通常は12時間明暗を繰り返して飼育を行っているが、この実験では明暗周期を6時間と3時間に変えて飼育を行った。給餌は明期にのみ行い、1明期当たりの給餌回数は12時間明暗では4回、6時間明暗では2回、3時間明暗では1回として、全て4回/日に統一した。また、それぞれ同じ給餌間隔で24時間明期の試験

区を設けた。その結果、ティラピア稚魚の成長率は、光周期の長さに関わらず、それぞれ明暗周期をつけて飼育した区が24時間明期の区を上回り、24時間明期のどの区も12時間明暗の通常区と比較し、低い成長率を示した。さらに「光周期(明暗)あり」の試験区間、24時間明期の試験区間でそれぞれ比較すると、光周期と給餌間隔の短縮に伴って成長率が高くなった。結果として3時間明暗周期を設けた試験区が最も成長率が高い結果となった。

これは、暗期を設けることで魚の代謝量の低下が生じることおよび給餌間隔の短縮(均一化)によって安定して餌の消化吸収が行われることの両者が組み合わさった結果であり、これにより、更なる成長促進効果が得られたと考えられる(遠藤ら, 2004)。

次の実験として、我々はこの光周期の短縮と塩分の異なる飼育水の両者を組み合わせたティラピア稚魚の飼育試験を行った。試験区は、12時間明暗と3時間明暗の2種の光周期と、0, 8, 16 psuの3種の塩分を組み合わせ、計6試験区とした。ちなみに、ティラピアの浸透圧に最も近い塩分は8 psuである。成長率の伸び率を図2に示す。成長率の伸び率は、光周期短縮だけを行った3時間明暗/塩分0 psu区で6.17%，適度の塩分添加のみを行った12時間明暗/塩分8 psu区で4.54%となり、通常飼育(12時間明暗/塩分0 psu区)と比較して高い

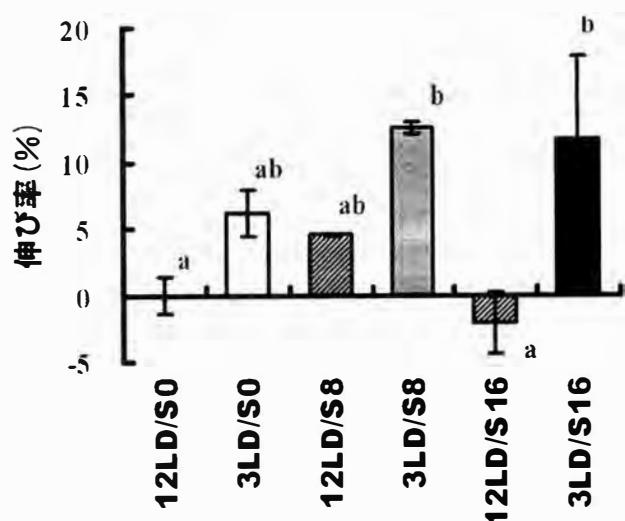


図2 光周期と塩分制御によるティラピア飼育における成長率の伸び率
異なるアルファベットは有意差($P < 0.05$)、LDは光周期(時間)、Sは塩分(psu)を示す。

値を示した（有意差なし）。しかし、過度の塩分添加を行った12時間明暗／塩分16psu区では-2.04%となり、成長が抑制された。また、光周期を短縮し塩分を添加した試験区では、3時間明暗／塩分8psu区が12.6%，3時間明暗／塩分16psu区が11.7%と、塩分添加量に関わらず、光周期短縮と塩分の単独制御区よりも有意に高い値を示した（ $P < 0.05$ ）。本結果から、光周期の短縮および塩分を組み合わせて飼育すればそれぞれの単独制御を行うよりも高い成長率の得られることが初めて明らかとなった（高橋ら，2004）。

このように、同じ割合の餌を与えても、環境を制御することによって飼育生物の成長を促進させることができるのである。環境の制御は、魚類の生産性を向上させるだけでなく、餌から供給された物質の魚体蓄積率を高め、排泄量を少なくすることができる。閉鎖循環式養殖システムにおいては、飼育水中への物質負荷を減少させ、より多くの魚を、より長期的に飼育できることを意味している。

閉鎖循環式養殖システム内の魚類の繁殖制御は、世代を越えた飼育を実現する完全養殖につながり、さまざまなメリットが生まれる。環境制御による産卵促進技術については古くから研究が進められ、数多くの水産有用魚種で活用されている。従来の環境制御は、主に光周期および水温を調節し、天然における産卵期までの光や水温の環境を人為的に再現するものである。水温は、飼育水の掛け流しによっても制御が可能であるが、水温調節のための燃料費がかかるため、閉鎖循環式を用いる場合が多くなってきている。また、逆に、魚類の多くは成熟すると成長速度が低下するため、産卵を抑制することも重要である。ティラピアでは、短縮光周期（6時間明暗）により産卵の抑制に成功している（Biswas *et al.*, 2005）。今後は、閉鎖循環式養殖システム内の環境制御により、成長促進や繁殖制御が多魚種で応用されることが望まれる。近年、海産魚の種苗生産にも閉鎖循環式養殖システムの導入が検討されており（鴨志田ら，2006），閉鎖循環式養殖システム内の繁殖技術が確立されれば、世代を繰り返す完全養殖も可能となる。さらに、陸上動物の飼育施設と同

様、飼育環境の制御や、さらには、給餌・清掃なども含めた自動生産システムの確立も期待されている。

閉鎖循環式養殖システムにおける隔離性と制御性は、HACCPおよびトレーサビリティシステムの導入に最適であり、安全・安心を保証した水産食品の生産システムの確立につながる。例えば、トラフグは、餌に含まれるフグ毒（テトロドトキシン）を吸収・濃縮して毒化する（野口ら，2002）が、フグ毒を全く含まない餌をトラフグ閉鎖循環式養殖に利用すれば、無毒なトラフグを生産することが可能となる。また、餌中の重金属やその他の危害物質の分析・管理を徹底すれば、これらを含まない水産物の生産およびその保証が可能となる。

3. 閉鎖循環式養殖システムへの海洋深層水利用の可能性

海洋深層水（以下、深層水）は、水質の安定性と清浄性の観点から、表層水の場合と比較して、閉鎖循環式養殖における飼育水として利用価値が高いと考えられる。また、閉鎖循環式養殖では水温管理が自由に制御できるという利点があるが、夏場の飼育水冷却にエネルギーコストがかかるため、深層水との熱交換による省エネも可能であろう。ここで、閉鎖循環式養殖のメリットを活かしたこれまでにない深層水の成分調整等の加工利用について考えてみたい。

閉鎖循環式養殖では、飼育水を循環濾過して使用するため、安定した飼育環境を創出することが可能であるとともに、成分を調整した飼育水を比較的長く使用することができる。一方、養殖対象魚種の場合も含め、真骨魚類の浸透圧は、淡水魚、海水魚ともおよそ300 m Osm/kg H₂O、つまり海水の30%に保たれており、体液中のイオン組成も、環境水中の無機塩類を吸収・排出することで、ある一定の範囲に維持されている。したがって、真骨魚類の飼育においては、各々の体液組成と同等の浸透圧まで環境水中のイオンを増加（淡水魚の場合）または減少（海水魚の場合）させることが可能である。環境水の浸透圧の調節を行えば、魚は浸透圧調節に必要な

エネルギー消費を緩和できると考えられ、前述したように、浸透圧に近い濃度の塩水を用いた淡水魚飼育や海産仔稚魚の希釀海水飼育では成長促進効果が示されている（金子, 2002）。しかしながら、飼育水中に含まれる個々のイオンについての検討例は少なく、今後は、個々のイオン濃度を独自に調整した人工飼育水の研究を続けていく必要がある。閉鎖循環式養殖では、飼育水を絶えず循環させているため、自然界の水とは全く異なる成分の飼育水でも長期間安定して利用できる。このことから、閉鎖循環式養殖システムは、開発した人工飼育水を最も効率的に使用することができる装置といえる。そこで、著者らは、この閉鎖循環式養殖で使用する人工飼育水の原料として海洋深層水が利用できるのではないかと考えた。

例えば、海洋深層水からミネラル水を生産する場合、海水淡水化装置と濃縮水からナトリウム分を取り除く脱塩装置やその他のミネラル分を回収する装置などが利用されている（藤田・高橋, 2006）。これらの技術を駆使すれば、海洋深層水をベースにして、魚類の体液組成に近い新たな飼育水を作り出すことが可能である。

真骨魚類の主な体液イオン濃度は、ナトリウム3～4 g/L、塩素4～6 g/L、カリウム100～180 mg/L、マグネシウム20～30 mg/Lおよびカルシウム80～120 mg/Lである（金子, 2002）。この値を天然海水の組成（谷口, 2007）と比較すると、ナトリウム、塩素、カリウムおよびカルシウムは1/3～4程度と安定しているが、マグネシウムの値が約1/60であり、大きく組成が異なる。すなわち、これら主要元素を見る限り、体液イオン組成を模擬した人工飼育水を製造するには、海水を希釀するのではなく、上記の脱塩装置等により回収した濃縮水、あるいは、飼育水中のマグネシウム濃度を低下させる目的でマグネシウムを豊富に含む「にがり成分」を除去した残渣を利用するのが望ましいと考えられる。魚類の成長が最大となるような人工飼育水の組成については、今後の研究が待たれるところである。しかしながら、少なくとも実質的な人工飼育水の製造においては、これまで用いられている海

洋深層水加工技術が有益に働くと推察される。

閉鎖循環式養殖では、飼育生物から排泄された物質が飼育水中に蓄積されるため、排水処理が問題となる。これまでに、淡水魚における閉鎖循環式養殖では、養魚と水耕栽培を組み合わせた総合的なシステムも開発されている。これは、魚類から排泄される物質を肥料として栽培する植物に吸収させて水質浄化を行うもので、アクアカルチャー（養殖）とハイドロポニックス（水耕栽培）を合わせて「アクアポニックス」と呼ばれている。これまでティラピアの養殖とトマトやレタスの水耕栽培との組み合わせ（Watten and Busch, 1984; Seawright, 1998）、アメリカナマズとトマトの組み合わせなどの知見がある（Sutton and Lewis, 1982）。閉鎖循環式養殖システムでは、先に述べたように、魚から排泄されるアンモニアを硝酸イオンへ酸化し、飼育水中に貯留して飼育を継続する。他の元素も、イオンとして飼育水中に溶け込み、蓄積されていく。これらの元素は、最終的に除去が必要であり、水の交換が必要になるが、換水を行うとそのまま環境中へ排出されることになる。現在、包括的なイオンの除去には、アクアポニックスのように植物の同化作用を利用した方法が最も有効である。海洋深層水は、水耕栽培の培養水（液肥）としても利用の試みがなされており、特に比較的塩分に耐性のある水耕栽培植物であるトマトなどで栽培実験が行われている。トマトにおいては、塩分4 psuでの栽培が可能とされている（藤田・高橋, 2006）。

これらのことを踏まえ、海洋深層水の加工過程で得られる人工飼育水を利用した閉鎖循環式養殖システムとその2次利用を構想したので、その概念を図3に示す。真骨魚の体液イオン組成を模擬した飼育水（塩分約8 psu）を利用して閉鎖循環式養殖を行った場合には、飼育排水を2倍希釀（4 psu）すれば、これまで淡水で行われてきたアクアポニックスと類似した方法で、飼育排水から窒素やリンなどの環境汚濁物質を除去するとともに、トマトなどの耐塩性の高い植物の栽培が可能となる。特に、人工飼育水を用いて海産魚を飼育する場合、塩化ナトリウムが高濃度で含まれているために大量処理が困難であつ

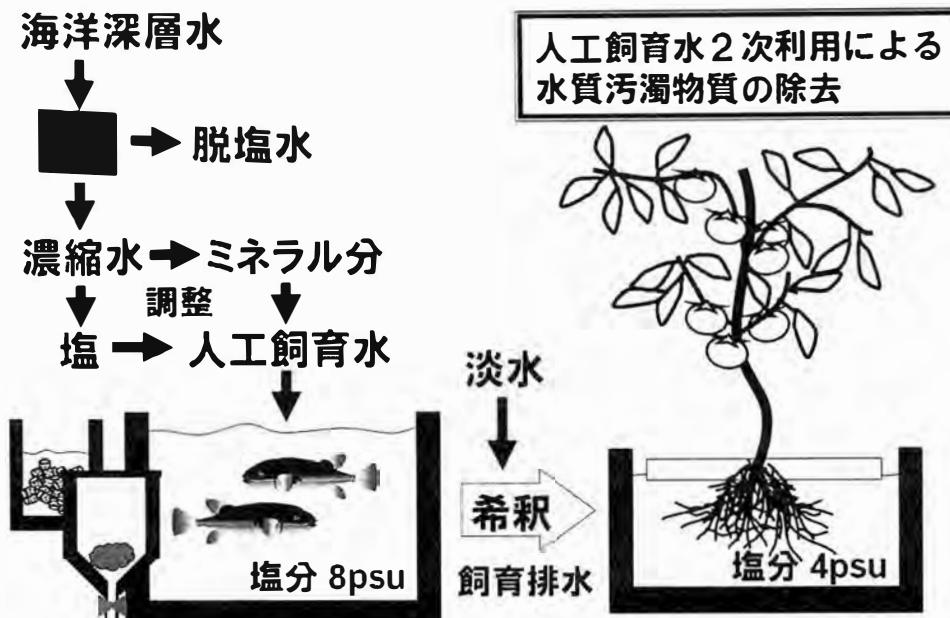


図3 海洋深層水を加工した人工飼育水の閉鎖循環式養殖システムへの適用とその2次利用の概念

た飼育排水を液肥として利用・処理できる可能性が出てくる。海産魚の閉鎖循環式養殖では飼育水中に窒素を硝酸態として 500 mgN/L 以上蓄積させることができる (Kikuchi, 2006) ので、2 倍希釈を行っても一般に用いられている液肥 (約 200 mgN/L) に匹敵する窒素を植物に供給できる。これにより、海産魚養殖の飼育排水を植物の水耕栽培へ利用することも可能である。例えば、トラフグの飼育排水でトマトの水耕栽培を行うことも実現できるかもしれない。

4. 終わりに

このように、海洋深層水の成分調整 (加工) と閉鎖循環式養殖システムの利用を検討していくことにより、淡水、海水問わず、様々な魚種の養殖が可能となる。さらに、飼育排水は、農業用水や海藻等の水生植物の栽培に2次利用することも可能で、同時に、魚類養殖からの水質汚濁物質の排出も防止できる。実用化に向け、詳細な検討が必要であるが、海洋深層水利用技術と閉鎖循環式養殖技術の両者を結びつけることは、それぞれの技術の幅を飛躍的に広げる可能性を秘めているといえる。

謝 辞

平成 20 年度海洋深層水利用学会特別シンポジウム「水産分野における海洋深層水へのさらなる期待」における講演および本稿執筆の機会を与えて下さった東京海洋大学海洋科学部海洋生物資源学科 藤田大介准教授に心より御礼申し上げる。

文 献

- Biswas, A. K., T. Morita, G. Yoshizaki, M. Maita and T. Takeuchi (2005) Control of reproduction in Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) by photoperiod manipulation. *Aquaculture*, 243(1-4), 229–239.
- Boeuf, G. and Payan, P. (2001) How should salinity influence fish growth? *Comp. Biochem. Physiol. (part C)*, 130, 411–423.
- 遠藤雅人・高橋実矢子・吉崎悟朗・竹内俊郎・大森克徳 (2004) 光周期および給餌間隔の短縮によるティラピアの成長促進. 2004 (平成 16) 年度日本水産学会大会講演要旨集, p. 133.
- 藤田大介・高橋正征編著 (2006) 海洋深層水利用学－基礎から応用・実践まで－. 成山堂書店, 東京.
- 糸井史朗 (2008) 第 II 部 魚介類養殖の環境管理 6 章 循環濾過システム、「養殖の餌と水－陰の主役たち」(杉田治男編). 恒星社厚生閣, 東京, pp. 128–139.
- 金子豊二 (2002) 第 11 章 浸透圧調節・回遊、「魚類生理学の基礎」(会田勝美編). 恒星社厚生閣, 東京, pp. 215–232.

- 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.
- 菊池弘太郎 (1999) 6. 循環型養殖システムによる負荷低減. 「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, pp. 64-76.
- Kikuchi, K., N. Iwata, T. Furuta, T. Kawabata and T. Yanagawa (2006) Growth of tiger puffer *Takifugu rubripes* in closed recirculating culture system. Fish. Sci., 72, 1042-1047.
- 野口玉雄・宮澤啓輔・松居 隆・山森邦夫・長島裕二・荒川 修 (2002) フグ毒の蓄積機構—フグはなぜ毒をもつのかー. 日本水産学会誌, 68, 917-929.
- Seawright, D. E., Stickney, R. R. and Walker, R. B. (1998) Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. Aquaculture, 160, 215-237.
- Sutton, R. J. and Lewis, W. M. (1982) Further observations on a fish production system that incorporates hydroponically grown plants. Plog. Fish-Cult., 44, 55-59.
- 高橋実矢子・遠藤雅人・吉崎悟朗・竹内俊郎・大森克徳 (2004) 光周期と塩分がティラピアの成長に与える効果. 2004 生態工学会年次大会発表論文集, 39-42.
- 谷口道子 (2007) 第1編 海水のミネラルとその利用. 「海のミネラル学—生物の関わりと利用—」(大越健嗣編). 成山堂書店, 東京, pp. 1-31.
- Watten, B. J. and Busch, R. L. (1984) Tropical production of Tilapia (*Sarotherodon aurea*) and tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in small-scale recirculating water system. Aquaculture, 41, 271-283.

(2009年6月16日受付; 2009年6月29日受理)