

# 循環濾過式飼育技術について (総説) 第1報 システム構成と要素技術

齊藤節雄

北海道立総合研究機構栽培水産試験場

Recirculating aquaculture system (RAS) (Review) I. System structure and technological components

SETSUO SAITO

Mariculture Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, *Muroran, Hokkaido, 051-0013,*

Many studies concerning recirculating aquaculture systems (RAS) have been conducted worldwide over the past four decades. RAS have the advantage of using much smaller quantities of water for fish production than flow-through systems. Using these systems, makes it is easier to maintain an optimum temperature for rearing species and also to disinfect the rearing water. Further, they have the advantage of having less direct impact on the aquatic environment than open systems when the waste materials and discharge water from the system are managed properly. The principal components of an RAS include a rearing tank; mechanical filter (form fractionator); biological filter, which removes ammonia, nitrite, and nitrate (nitrification and denitrification); CO<sub>2</sub> stripping unit; DO control (oxygenator); sterilization (UV light); and temperature control (heating-cooling unit). The biological filter is the most important component of the system. In this review, many types of biological filters and the current status of RAS development in Europe, the USA, and other countries, including Japan, are described.

キーワード：循環濾過飼育，生物濾過器，硝化，脱窒，養殖

20世紀後半から世界人口の急激な増加が継続しており (World Population Prospects, 2013), 将来の食料危機に対する危惧が益々増大している (FAO, 2012)。水産資源が総じて減少傾向にある中, 養殖業には蛋白源を確保するための重要な手段として大きな期待が掛けられている。我が国では, 養殖業が着実に発展を続け, 漁業総生産額の約34% (生産量では約20%) を占めるに至っている。しかし, 近年, 安価な輸入魚等による魚価の低迷, 餌料価格の高騰等により生産量の伸びが停滞し, 東日本大震災後は減少している (水産白書, 2013)。更に, 顕在化した養殖漁場の自家汚染 (中里, 1999) を解消すると共に, 天然物に比べ養殖物は品質的に劣るという消費者のイメージを払拭するためにも, 既存の概念に囚われない養殖業の技術革新が待たれている。一方, 世界では健康志向の高まりと共に魚需要の急増により, FAO統計では2012年時点での魚の消費量における養殖魚の占める割合は43%にまで達し, 今後益々高まる魚の需要に対して対応できるのは養殖産業のみであることが提言されている (FAO, 2012)。

陸上水槽において魚介類を飼育する際に, 一度使用した海水を繰り返し再利用する方法として, 「循環濾過式飼育システム」がある。循環濾過式陸上飼育技術は, 用水を浄化, 循環して使用するため, 海を汚さずに魚を飼育できる環境に優しい養殖技術であり (丸山, 1999), 本方式による養殖業の振興と食糧確保や環境問題への貢献が期待されている。一方で, 近年地球規模の気候変動により, 海水温の異常上昇・下降や異常発達した低気圧による被害等々, 海面養殖漁業を取り巻く環境は厳しさを増している。対象となる魚介類の成長等に適した水温条件を保つためには, 前浜から揚水した水を加温あるいは冷却する必要がある。適水温にコントロールした水を掛け流しで捨ててしまうと, エネルギーコストの著しい損失となる。循環濾過式飼育を行うメリットとしては, 水の使用量を減らすと共に, 飼育水温の調節に掛るエネルギーコストを減らす効果が期待できることにある。

「循環濾過式飼育システム」に関する研究は歴史的には, 1950~1960年代に我が国の大学においてその基礎的研究がなされた。砂濾過フィルターの有機物分解機能の研究

を行うことで、経験では無く科学的理論に基づいた装置の設計とそれに必要な基準が明らかにされた(佐伯, 1958; 平山, 1965a, 1965b, 1966a, 1966b; 河合ら, 1964, 1965)。これらの研究から浄化微生物とその酸素要求との関係が明らかになり、研究者達に基盤となる技術を提供した。その後濾過槽の詳細な検討を行うと共に、水族館等への応用もなされ、生物浄化槽の機能に関して多くの知見が集積された。一方欧米では、1970年代から研究が盛んになり(Liao and Mayo, 1972)、1980年代から排水処理分野における水処理技術の進展に伴い、「養殖」への応用が図られた(Betlach and Tiedje, 1981; Brune and Gunther, 1981; Colt *et al.*, 1981; Olsen, 1981; Alleman *et al.*, 1982; Kaiser and Wheaton, 1983; Krunner and Rosenthal, 1983; Manthe *et al.*, 1984; Miller and Libey, 1985; Rogers, 1985; Wilderer *et al.*, 1987; Kaiser *et al.*, 1989)。1990年代に入り欧米では循環濾過式養殖における、飼育システムの構築に必要な要素技術として一つの標準型が示された(Summerfelt, 1996)。すなわちマイクロスクリーン・フィルター、バイオ・フィルター、脱窒装置、泡沫分離、紫外線殺菌、沈澱槽等で構成される現在の標準技術であった。日本では、国の支援を受けた民間企業において、魚介類養殖の実用化に向けた取り組みが盛んになった。1990年代後半には、マリノフォーラム21の支援を受け、循環濾過式陸上養殖システムの実用化試験が進み、一般企業においても実用化に向けた取り組みが盛んになった(マリノフォーラム21水産養殖研究会, 2003)。しかし、既に「バブル」が崩壊した後の時代であったため、ヒラメ、マダイ、トラフグ等の高級魚の魚価も低迷し、本システムの商業化は困難な状況が続いている。

著者はかつて20年程前に北海道立栽培漁業総合センターにおいて、民間企業との共同研究により循環濾過方式によるヒラメの飼育試験を行った(鳥居ら, 1994; 齊藤ら; 1994)。その技術開発の成果は、北海道栽培漁業羽幌・瀬棚両センターにおいて、ヒラメ親魚養成水槽に一部活用されている。しかし近年種苗生産におけるコスト削減が強く求められていることから(北田, 1998; 早乙女,

2009)、特に今世紀に入り「閉鎖循環式飼育技術」を種苗生産に利用した、エネルギーコストの節減による養殖のトータルコスト低減化を目指した技術開発が、我が国始め先進各国において精力的に展開されている(Aquacultural Engineering Society News, 2013)。このような現状に鑑み、その後ほとんど「循環濾過」とは疎遠となっていた著者ではあるが、本飼育技術の有効性を再認識すると共に本技術の更なる発展を願い、これまでの技術開発の経緯を総括することを目的に総説を作成した。

本稿では、「循環濾過式飼育」のシステム構成と基本的な要素技術を紹介すると共に、我が国を含む欧米諸国における技術開発の現状を解説する。今後、循環濾過式飼育システムに関する研究を進める場合の参考になれば幸いである。

## 1. 循環濾過式飼育システムの構成 (System Structure)

### 1.1 掛け流し方式 (Flow Through System)

養殖あるいは種苗生産における飼育は、通常掛け流し方式(Fig. 1a)で行われる。掛け流し式では、飼育水に使用する用水を海、川等から汲み上げ、使用後の汚れた水は、また海や川へ流される。近年地域によっては、飼育に適した用水の入手が困難になると共に、排水による環境汚染等が問題視されている(中里, 1999)。

### 1.2 循環方式 (Recirculating System)

新しい用水を出来るだけ節減する飼育方法として、循環方式(Fig. 1b)がある。システムへの一日当たり給水量の5~10%前後の水を定期的に海や川等から給水しながら飼育水を濾過し循環再利用する(Masser *et al.*, 1999)もので、給水量に応じた排水を伴う。給排水量は、濾過能力によって、掛け流し式の数%程度にまで減らすことが出来る。「循環式飼育」システムの水処理工程を端的に言えば、次の3つの工程になる。①「スラッジ」と呼ばれる沈澱物(残餌や糞等)をまず取り除く。②水溶性の有機物等を生物膜に吸着・分解させて除去する。③水に溶解している有害なアンモニア態窒素を、硝化細菌の働きで

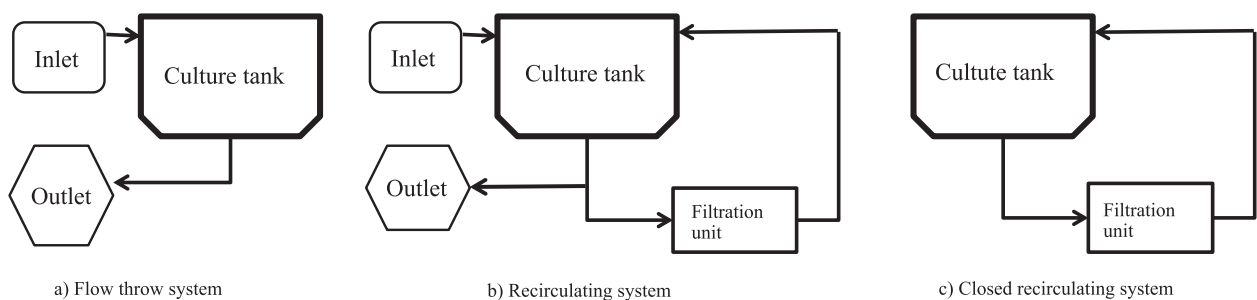


Fig.1 Schematic diagram of the three different culturing systems in aquaculture.

毒性の少ない硝酸まで変換する。

### 1.3 閉鎖循環方式 (Closed Recirculating System)

これに対して閉鎖循環式 (Fig. 1c) は、飼育水の入替えや定常的な給排水を行わずに、飼育水を循環再利用するものである。このシステムは、飼育水を高度に浄化することにより完全循環を行い、蒸発した分の水量の調整や種々の作業操作等により系外に失われた分のみの注水で、換水を必要とせず、環境負荷を全く与えない理想的な養殖システムである。

循環濾過方式の基本構成としては、次のものがある。飼育水槽、物理濾過、生物濾過 (硝化、脱窒)、溶存二酸化炭素の除去、pH調整、溶存酸素制御、水温制御、流量制御、殺菌 (Fig. 2) である。但し、この中には、飼育密度によっては必要の無いものもあれば、一つの装置で二つの機能を持たせることが可能なものもあり、それぞれに幾つかの処理方法があるためシステムは多様である。

## 2. 循環型養魚の要素技術 (Technological Components)

陸上養殖システムの構築のためには必要な要素技術を整理し、それぞれの要素技術に関する技術動向を見極めることが重要である。陸上養殖が経済性を持つためには、それぞれの要素技術が優れており、かつ安価であると共に、要素技術を適正に組み合わせる必要がある。これら要素技術の中で最も重要となるのが、水質浄化技術であり、魚介類が排出するアンモニアを亜硝酸、硝酸へと変換する「硝化」と硝酸を窒素ガスとして空気中へ放出する「脱窒」の2つのプロセスがある。アンモニアを酸化して亜硝酸へ変換する微生物は、従属栄養細菌に属し、次のものが知られている。*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosolobus*, *Nitrospira*, *Nitrosovibrio*。一方、生成された亜硝酸を硝酸へと変換 (分解) する細菌としては、*Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospina*, *Nitrospira* 属の硝化

菌が知られている (Watson, 1971; Harms *et al.*, 1976; Meincke *et al.*, 1989; Ehrich *et al.*, 1995)。

脱窒は多種類の脱窒菌と総称される細菌により行われる。無酸素条件下で亜硝酸、硝酸といった結合性酸素を用いた呼吸を行う脱窒能は多様な微生物が有する (van Rijn and Barak, 1998) とされているが、微生物の特定は一部しか成されていない。脱窒菌は有機物を炭素源とする従属栄養性細菌であり、脱窒工程ではメタノール等の有機物を添加するのが一般的である。

脱窒は嫌気状態で行われるため、脱窒槽に入る水の溶存酸素が低い程脱窒反応が早まる。また、脱窒反応には溶存有機物 (メタノール等) が必要であり (Payne, 1973; Tam *et al.*, 1992; Isaacs *et al.*, 1994), その添加量に比例した脱窒量を算出し、溶存有機物が過剰にならない様に必要量を添加することが重要である。この際、脱窒菌の状態により、窒素まで還元されずに亜硝酸が発生することがある。亜硝酸は魚に有害なため、そのまま飼育水槽に流れ込まない様に、循環水の一部を硝化槽に戻すことで、亜硝酸を再び硝酸に酸化する様に工夫が成されている (Fig. 2)。

### 2.1 飼育水槽 (Culture Tank)

飼育水槽の基本的な役割は、掛け流し式の場合と同様であるが、閉鎖循環式では水質を悪化させる原因物質を速やかに取り除くことが強く求められる。従って、単に飼育容器というだけでなく、淀みなく均一な水質を作る上で、魚の健康や環境に合った流速を広い範囲で設定できることや沈澱固形物の処理が容易に行えることが必要である (Losordo *et al.*, 1998; Timmons and Summerfelt, 1998)。

水槽の形状は、円形、長方形、巡流型等があるが、通常上記の条件を満たすのは円形水槽であろう。円形水槽では水流の回転方向に給水口を設けることにより、回転

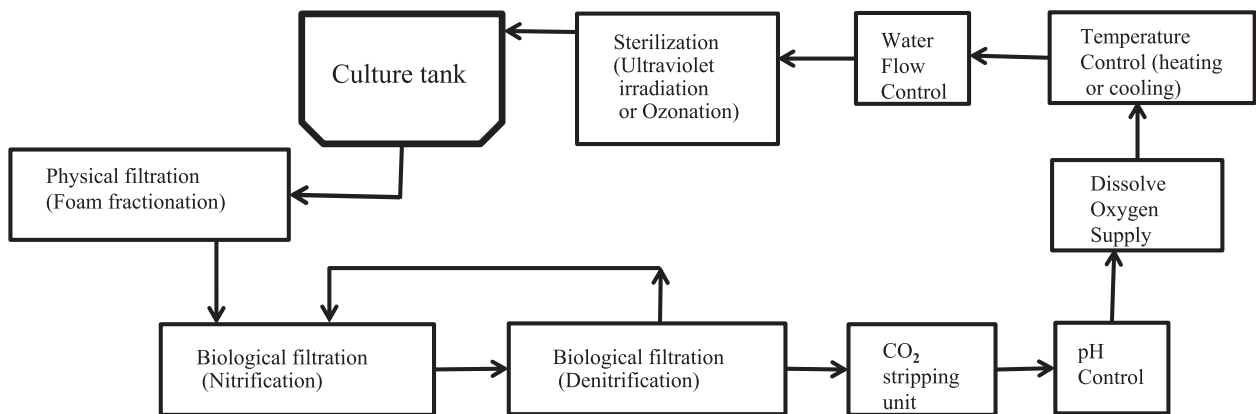


Fig.2 Schematic flow diagram of a typical recirculating aquaculture system.

流が発生するため、水槽内の水質を均一にする他に、魚に適度の運動を課すると共に、沈澱固形物を中央に集め、容易に排出させることができる (Davidson and Summerfelt, 2004)。

## 2.2 物理濾過 (Physical Filtration)

残餌や糞等の固形物がシステム内に残っていれば、微生物により分解され、水質の悪化を招き、生物濾過槽に流れ込むと目詰まりの原因となる。従って、水槽から排出された後は、速やかに取り除かれなければならない。

物理濾過の方法には、沈澱、スクリーンフィルター、泡沫分離等があり、飼育魚種の糞や残餌の形態、性状に合わせて選択することになる。形が崩れにくく比重の重いもの等は、沈澱やスクリーンフィルターにより殆ど取り除くことが出来るが、崩れやすく、溶けやすい性状のものは泡沫分離が良いとされている。

スクリーンフィルターは、目詰まり防止のために逆洗を行うが、逆洗に使用する水量に注意が必要である。逆洗水を新たに使用し、そのまま排水すると大量の水が必要となるため、飼育水を再利用すると同時に、逆洗水も沈澱濾過して再利用する必要がある (Libey, 1993; Summerfelt *et al.*, 1994)。

### 2.2.1 泡沫分離 (Foam Fractionation)

泡沫分離とは、様々な物質が気泡の気液界面に吸着する性質を利用し、気泡をフィルターとして液体中より目的物質を分離・除去する浮上分離の一種である。気泡と水の境目に存在する数 $\mu\text{m}$ のマイクロレイヤと呼ばれる薄膜は、蛋白質、脂質、細菌等様々な物質を吸着・濃縮する性質がある。この界面に吸着・濃縮した物質が発泡性を有する場合には、水面上に消えにくい泡の層を形成する。この現象は波の花や鍋の灰汁等身近なところでも見ることができる。コロイド粒子等の微粒子を目詰まりすることなく短時間に除去する事ができるため、飼育海水中の水質汚濁原因物質でもある体表粘液等タンパク質の除去には、最も適した方法である。また、泡沫分離は気泡に物質が吸着・濃縮する性質を利用しているため、一種の濃縮装置とも考えられるため、高濃度よりも中・低濃度物質の除去に向いている (Chen *et al.*, 1992; Weeks *et al.*, 1992; Timmons, 1994)。泡沫分離の場合も、沈澱物質を多く含んだ泡を排出するが、そのまま捨てると補給水が必要となる。

## 2.3 生物濾過 (Biological Filtration)

新たに生物濾過システムを立ち上げる際には、濾材の硝化作用の状態を見極めることが重要である。新しい濾

材をセットした後の飼育水中のアンモニア、亜硝酸、硝酸濃度の変化の典型的な例 (河合ら, 1964, 1965; 佐野, 1988) としては、セット後約2週間目でアンモニア濃度がピークに達し、次に亜硝酸濃度が約4週間目に最高値となり、その後減少に転ずる。一方、硝酸濃度は約3週間目頃から上昇を続ける。約5週間目以降はアンモニア及び亜硝酸濃度共に低く抑えられているが硝酸濃度は上昇を続けている場合には、生物膜濾材が十分に「熟成」した状態にあることが分かる。循環システムにおいて、飼育水中の硝酸濃度は日々新しい水を給水することで制御されるが、換水率が極めて低い場合、良好な水質を維持するためには脱窒が重要な要素となる。

生物濾過装置の理想像は、濾材の表面積が広く、アンモニアを100%除去し、亜硝酸の生成が少なく、酸素供給量が大きく、システムの全容量に対する占有率 (容積比率) が小さく、水頭損失 (水の流動に伴い発生する摩擦によるエネルギー損失) が少なく、安価な濾材で、維持管理が容易で、固形物の沈澱が少なく、送水圧を掛けずに維持管理が出来る等の条件が満たされる事であるが、このような条件を全て満たす装置は、未だ開発されていないのが現状である。近年、大規模養殖施設においては、粒子状濾材を使用したものが主流となっているが、様々なタイプの物がある。Malone and Pfeiffer (2006) は、これら様々な濾過装置を、主に酸素供給、バイオフィルム (生物膜) の成長の観点から分類し、濾過器を決定する際の指針を構築した。

### 2.3.1 バイオフィロック (Biofloc System)

活性汚泥 (activated sludge process) の始まりは、1914年にArdenとLockettという二人の英国人研究者が、下水に空気を吹き込むことにより発生する凝集性の固形物を繰り返し利用する下水の浄化実験について発表したことによる (北尾, 2003)。元々微生物に下水処理を行わせるためではなく、下水から発生する悪臭対策として下水を曝気するために始まった。下水の放つ悪臭は、嫌気的な環境から発生するため、空気を送り込んで好気的な環境にすることで悪臭が改善され、その過程で反応槽の中で生じる浮遊物質に、下水を浄化する効果の有ることが分かった。

ティラピアやエビの養殖においては、養殖池の水中に、バイオフィロックと呼ばれる微生物の固まりを人為的に作り、給餌により増加する有害なアンモニアや亜硝酸を減少させると共に、バイオフィロック自体も蛋白源として魚やエビの餌になる。養殖池では、飼料 (有機物) の給餌により投入された炭素と窒素は魚に摂餌され、一部未利用分は糞尿として排泄される。また炭素と窒素は残餌と

して池の中にも残る。炭素はCO<sub>2</sub>ガスとして水中に溶解し大気中に放出されるが、窒素は微生物により糞尿や残餌が分解し、アンモニアとして水中に溶解する。アンモニアは細菌の硝化作用により亜硝酸、硝酸へと順次酸化され、硝酸が増えて来る。そこへ炭水化物を池に加えると、C/N比が高くなり、バイオフィックを形成する微生物が窒素を養分として蛋白質を生成し、増殖することになる。

一般に、C/N比が低いと微生物による有機物の分解が早く、水生生物に有害なアンモニアや亜硝酸が増えやすく成る。逆にC/N比が高いと、有機物の分解は遅く、窒素が微生物に取り込まれ、有害なアンモニアや亜硝酸の発生も抑えられる (Avnimelech, 1999)。

2.3.2 生物膜 (Fixed Film System)

生物膜法の特徴は、活性汚泥法 (バイオフィック) と異なり、付着した微生物を処理槽内に保持し続けることができることであり、増殖速度が遅い微生物でも高濃度に維持することが可能である。生物膜処理法は汚水を畑地等に撒く灌漑処理から発展し、1870年代にイギリスで下水を間欠砂濾過で処理したのが始まりといわれている (北川, 2010)。微生物の働きで有機物を分解し、窒素、燐等を除去する技術が、その後水産養殖における水処理による循環システム技術に転用されている。

濾材 (担体) には様々な材質と形状のものがあり、石、貝殻、砂、プラスチック等々である。担体表面に繁殖した硝化細菌により、アンモニアが亜硝酸を経て硝酸へと酸化される。生物膜法は微生物を付着させる濾材の位置により、空気中にある濾材に排水をかける散水濾床のような方式と、処理槽中に濾材を入れて空気を送る方式がある。後者においては濾材の状態により固定床方式と流動床方式に大別できる (北尾, 2003)。

固定床方式は、生物膜が付着した碎石あるいはプラスチック濾材を処理槽中に固定し、その下部から曝気する

ものであり、生物膜の剥離作用が弱いため、担体 (濾材) 間で剥離微生物が閉塞しやすく、強制的に下部から曝気して剥離することもある。

これに対して、流動床法は、曝気などによって流動状態で砂や活性炭などの濾材を保持しているため、余剰生物膜の剥離も行われ、廃水中に懸濁性物質が存在していても閉塞することはない。また剥離生物膜が濾材間に浮遊していることから、活性汚泥のような作用を示す。濾材には、スポンジのようなものや、高分子ゲル内に微生物を包括固定化させたものを用いるものがあり、濾材の流出防止、濾材の分離、あるいは過剰な生物膜の剥離などの技術開発がなされている。固定膜濾過方法は、濾材への酸素供給と硝化細菌の繁殖手法から、更に露出濾床法と浸漬濾床法の2種類の濾過器に分類される (Fig. 3)。

2.3.2.1 露出濾床法 (Emerged Filters Method)

露出濾床においては、生物膜への酸素供給及び二酸化炭素の排出に優れている。アンモニアを効率よく酸化するが、濾材表面積が少なくなるという欠点もある。

2.3.2.1.a 回転円板 (Rotating Biological Contactors)

飼育水を満たしたタンクの中で、一部を飼育水に接触させた円板を水車の様に回転させて、円板上に形成された生物膜によって浄化を行う方式である。回転する間にアンモニアの硝化と酸素の供給が交互に行われる。処理槽内での水頭損失は殆ど無く、また乱流の発生も少ないことから処理に要するエネルギーは小さい。

家庭からの生活排水の処理用に開発され、現在も排水処理分野で広く使用されている (Van Gorder and Jug-Dugakovic, 2005; Brazil, 2006)。円板の半分は水中に没し、残りの半分は空中に露出している。Hochheimer and Wheaton (1998) は、最大の水理的負荷は300m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/dayが望ましく、Brazil (2006) は、全アンモニアの除去率は、

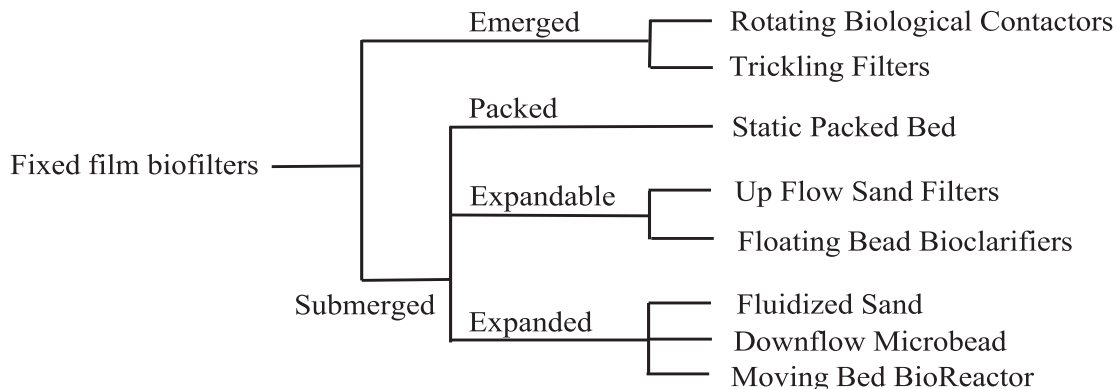


Fig.3 Fixed film biofilters can be clustered into four fundamental categories that represent “emerged”, “packed”, “expandable” and “expanded”.



0.43±0.16 g/m<sup>2</sup>/dayが、28℃でティラピア養殖を行う場合の平均的な値であるとした。一方、Van Gorder and Jug-Dugakovic (2005)は、同様に1.2 g/m<sup>2</sup>/dayが最大であることを報告した。更にCO<sub>2</sub>濃度は、約39% (Brazil, 2006)あるいは65% (Van Gorder and Jug-Dugakovic, 2005)減少することを報告している。

回転円板は、通気が自動的に行われ、水頭損失が少なく、運転費用も少なく、脱気が容易である。更に濾材が回転しているため、生物膜の掃除も自動で行われる。回転円板は、極めて安定した水処理が可能であるため、下水処理の現場に採用されて久しい (北川, 2010)。

回転円板はLewis and Buynak (1976)がナマズの養殖に使用して以来、ストライプトバス、ティラピア等多くの魚種で用いられて来た。また、人工合成した飼育水を用い回転円板、散水濾床、バイオドラム (多数の穴の開いたシリンダー状の容器に濾材を充填し、回転円板と同様に回転させ浄化を行う) の処理能力を比較したRogers and Klemetson (1985)は、アンモニア除去に関しては、回転円板が最も有効であることを報告した。同様の報告には、Miller and Libey (1986)とWesterman *et al.* (1996)がある。

### 2.3.2.1.b 散水濾床 (Trickling Filters)

濾材を積層した濾過槽の上面から均等に散水し、飼育水が濾材間を下降する間に浄化が行われるもので、下向式の浸漬濾床とほぼ同じ構造である。濾材の高さが通常1~5mであるため、飼育水の供給に他の方式よりもエネルギーを要する。また、効率を上げるため下から送風する場合もあるが、濾過槽の逆洗は殆ど要しない。

散水濾床は、固定膜を濾材表面に形成し、処理する水に溶けている窒素性有機物を重層された濾材を通過する際に、濾材表面のバクテリアにより硝化させる。濾床の底に通気されるため、絶えず酸素が供給され、CO<sub>2</sub>が除去される。濾床の構造が簡単で、稼動が容易なため、養殖に広く使用されている。

散水濾床は、開発当初濾材に砂利が用いられていたが、現在プラスチック製のものが主流となっている。それは砂利よりも軽量で比表面積が100~300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>と広く、閉塞率も低い。Kamstra *et al.* (1998)とEding *et al.* (2006)によると、比表面積が100~200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>であるプラスチック製濾材は、アンモニアの除去効率が良い。

散水濾床の場合、低水温時には硝化効率が低下するため、冷水で使用することには不向きである。しかし、小規模な種苗生産施設等で有機物負荷の少ない場合には使用可能である。濾過器の内部をブローで通気し、BODとCO<sub>2</sub>の除去を行う。夏季には通気により冷却も出来る。濾過器内に処理する水を満遍なく行き渡らせることが重

要であり、ノズルやアームを回転させて行う (Summerfelt *et al.*, 2000)。

散水濾床を用いた飼育例にはOtte and Rosenthal (1979)のティラピアとヨーロッパウナギ, Bovendeur *et al.* (1987)のアフリカナマズがある。

### 2.3.2.2 浸漬濾床法 (Submerged Filters Method)

固定膜濾過器の第二のカテゴリーとして、浸漬濾床がある。循環率を高く設定し、濾過器に流入する飼育水により酸素は生物膜へ供給される (Malone and Pfeiffer, 2006)。更に、比表面積を増大させた濾材を使用することで、生物膜の増殖を促し硝化効率を向上させる。浸漬濾床法は更に濾過器への酸素供給と生体膜の増殖の違いから固定濾床、膨張濾床、流動膨張濾床に分かれる。

#### 2.3.2.2.a 固定濾床 (Static Packed Bed)

固定濾床の場合は濾材が固定され、生物膜や固形物の集積等を行われない。濾材には碎石やプラスチック、貝殻等が用いられており、生物膜の生成は循環系内における酸素供給に依存する (Manthe *et al.*, 1988)。濾過槽の中を、水は底から表面へ、或いは表面から底へと流れる。従って、水理的滞留時間 (Hydraulic Retention Time) は、系内の循環水の流量により制御される。

飼育水槽から出る固形物は、硝化細菌や従属栄養細菌の作用により浸漬濾過器に集積する。この過程で空隙が閉塞するため、長期間安定して運転するためには、固形物を取り除くために逆洗する機構が必要である。濾材の詰まりを防ぎ空隙を確保するため、濾材は直径5cmの碎石や直径2.5cm以上のプラスチックが用いられてきた。直径5cmの碎石は、比表面積率が75 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>であり、空隙は40~50%程度である。一方プラスチック濾材をランダムに詰め込んだ濾材の場合、比表面積率は100~200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>と比較的低いが、空隙率は95%と大きな値となる。

過去には養殖に用いられた浸漬濾床であるが、建設コストが高く、濾材のトラブルや運転経費が嵩む等の理由から、使用されなくなっている。しかし、飼育密度の低い水族館や展示水槽等では用いられ、カキ貝殻を投入することで、炭酸カルシウムやミネラルの補給が行われている。

#### 2.3.2.2.b 膨張濾床 (Expandable Filters)

膨張濾床では、空気や水を用いた混合、あるいは機械的な混合を行うことで、固定濾床の欠点を補っている。濾材を振動、煽動することで、濾材表面に生成される余分な生物膜を除去し、濾過器の水流を確保する。膨張濾床は、固形物を除去する物理濾過器として運転可能であ

り、生物濾過器としてアンモニアの除去に使用される。そのため、定期的な逆洗が必要である。膨張濾床としては、上向流砂濾過器、浮遊ビーズ生物濾過器がある。

### 2.3.2.2.b-1 上向流砂濾過器 (Up Flow Sand Filters)

本濾過器は、水泳用プールで使用され、基本的に物理濾過器である。生物濾過器としても使用されているが、逆洗を頻繁に行う必要があるため生物膜の生成率は低い。水族館では広く使用されているが、生物膜の生成には極めて高い循環率が必要であり、逆洗に伴う水の損失が大きいいため、現在養殖には殆ど使用されていない。

### 2.3.2.2.b-2 浮遊ビーズ生物濾過器

#### (Floating Bead Bioclarifiers)

浮遊ビーズ濾過器は、砂濾過器と同様に、膨張粒状濾材を使用したものである (Malone and Beecher, 2000)。本濾過器は、固形物を濾過する物理濾過器としても機能する (Chen *et al.*, 1993)。同時に溶存アンモニア態窒素を除去する細菌が付着するのに十分な比表面積を持っている (Malone, 1993)。ビーズ濾過器は、生物濾過と物理濾過の両方の機能を兼ね備えた濾過器と見なされている。ビーズフィルターでは、水よりも軽い直径数ミリ程度のプラスチックビーズを入れた密閉式の濾過槽に上向式で飼育水を導入する。ビーズ上に形成された生物膜によってアンモニア等の浄化が行われると共に、ビーズが濾過槽上部に集積するため、ビーズ層の下の部分では浮遊懸濁物 (SS) がトラップされる。SSの除去には極めて有効な方式であり、また硝化機能に関しても回転円板や流動床と差がないとの報告がなされている (Malone and Coffin, 1991)。

PolyGeysler ビーズフィルターは、空気圧により自動的に逆洗が行われる。水はビーズが充填された濾床の下部から入り、フィルター容器の中を上向きに流れる。その間に物理濾過と生物濾過が同時に行われる。また、空気が濾過器の中に供給され、予め設定された逆洗頻度に従って逆洗される。逆洗が必要になると、自動的に空気が濾過器の底の濾床の下から入り込み、フィルタービーズを混合し、掛け回す。水の循環は、ポンプやエアリフトにより行われ、逆洗の後には、直ちに水が満たされ、濾過が再開される。逆洗に伴う水の損失は全く無く、固形物 (ゴミ) の排出の際の水の損失は無視出来る。従って、本濾過器は、逆洗による水のロスが無いため、海水飼育で使用する場合有利である。空気圧による操作のため、プラスチックビーズが緩く混合されるため、フィルター表面の生物膜が健全に保たれ、硝化作用が維持される (Malone, 1992)。

### 2.3.2.2.c 流動膨張濾床 (Expanded Bed)

浸漬濾過器の第三のカテゴリーとして、流動膨張濾床がある。濾材が常に水中に広がっているため、固形物によるフィルターの閉塞が無く、生物膜が常に保たれる。濾材の比表面積は大きく、非常にきめ細かな砂やプラスチック製のビーズが使用される。流動砂濾過器、マイクロビーズフィルター、流動床バイオリアクターの3タイプがある。

### 2.3.2.2.c-1 流動砂濾過器 (Fluidized Sand)

流動床バイオフィルターは、大規模な養殖施設 (15m<sup>3</sup>/min 又は 400~4,000gpm) で使用される。本濾過器の有利な点は、濾材の比表面積が非常に大きいことである。極小の砂やプラスチック製ビーズでは、比表面積は 4,000~45,000m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>であり、散水濾床では、100~800m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>、ビーズフィルターでは、1,050m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>である。流動床濾過器は、スケールアップが容易であり、比較的建設費も安い (Summerfelt and Wade, 1998)。しかし、濾材の費用は、他の種類の濾過器のものに比べ割高である。本濾過器のアンモニア除去率は、低水温下での養殖の場合は 0.2~0.4kg/m<sup>3</sup>/day であり、高水温養殖においては 0.6~1.0kg/m<sup>3</sup>/day である (Timmons and Summerfelt, 1998)。

本濾過器の欠点は、ポンプによる送水コストが高いことと、散水濾床や回転板濾床と同様に、通気を行わないことである。更に、運転が難しく、浮遊固形物の除去が困難であり、ファウリングを起こすことである。

本濾過器においては、通水を分散させることが、極めて重要である (Summerfelt and Cleasby, 1996; Summerfelt *et al.*, 1996)。濾過器の底への通水には様々な方法があるが、伝統的にパイプを濾過器の底まではわせる方法がある。まずフィルターの頂上に通水し、次第に底の方へ水が下がる様にするものである。この頂上給水と側面送水システムは、更にポンプに通常の 1/3~1/2 の負荷を余分に掛ける。

本濾過器の大きな利点は、魚を 50 トン単位の大規模で飼育した場合でも、アンモニアを除去出来ることである。しかし、壊滅的な失敗をする危険性も併せ持っている。近年本濾過器の構造に改良が加えられ、容器の底の側面から水を入れることで、容器内を水が回りながら上部へ抜け易くなり、より効率良く容器内を水が通る様になった (Timmons *et al.*, 2001)。

本濾過器の生物膜への酸素の供給は、浸漬濾床と同様に飼育水によってのみ行われるが、通常、濾過槽への飼育水の流入速度が速いため、滞留時間が短く、酸素が制限要因となることは無い。また、槽内の閉塞も殆ど無く、一度熟成すると極めて安定した処理が可能となる。

### 2.3.2.2.c-2 マイクロビーズフィルター (Downflow Microbead)

マイクロビーズ濾過器は、通常の浮遊ビーズ濾過器とは明らかに異なる。浮遊ビーズは濾過塔の中に収められ、濾材として僅かに浮上しており、濾材の重量は濾過槽1トン当たり700kg必要であり、砂やマイクロビーズに比べれば高価である。マイクロビーズはポリスチレン製（1トン当たり16kg）で、半径1~3mmである。マイクロビーズ濾過器（Timmons *et al.*, 2006）は、流動砂濾過器より低コストで、大規模化が可能である。また、コストが流動砂濾過器の50%と低コストであり、これは低い水頭損失と高い容量のポンプが使用出来るからである。マイクロビーズ濾過器は、1m<sup>3</sup>濾材当たり一日にTAN（全アンモニア態窒素）を約1.2kg処理出来る。出口水のアンモニア濃度を2~3mg/Lに維持出来る。これは暖水の場合で、水温が低くなると50%くらい能力が低下するが、流動砂濾過器と同程度の効率である（Timmons *et al.*, 2005）。

### 2.3.2.2.c-3 流動床バイオリアクター (Moving Bed BioReactor)

1980年代初期に、ノルウェーで排水処理により北海の汚染を軽減する目的で開発された。従来の濾過器に比べて優れている点としては、余剰汚泥が少なく、維持費が少ないことであり、現在ヨーロッパにおける排水処理施設では、広く使用されており、養殖においては、規模の大小を問わず普及している。

本濾過器は、常に運転が可能であり、濾材の詰まりが無く、水頭損失が少なく、比表面積が大きく、逆洗が不要である。この濾過器は、好気条件では硝化が、嫌気条件では脱窒が可能である。硝化するための好気条件を作るには空気の泡を常に循環させ、脱窒のための嫌気条件にするには水中ミキサーが必要である。濾材は通常、濾過器容量の70%が適している。濾材が出口から漏れない様に十文字のメッシュや円筒状のスクリーンが濾過器内に縦横に配置されており、その中に濾材が縦方向に入れられている。濾材は、高密度ポリエチレン（0.95/cm<sup>3</sup>）製で、小さな円筒状で内部、外部に鱗状の突起が付いている（Odegaard *et al.*, 1994）。

## 2.4 pH及びアルカリ度調整 (pH and Alkalinity Control)

硝化作用に及ぼす要因の主なものには、pH、アルカリ度、水温、溶存酸素、溶存二酸化炭素、塩分等がある。

硝化作用に及ぼすpHの影響は、過去60年間に亘り研究されてきた（Biesterfeld *et al.*, 2001）。*Nitrosomonas*はpH 7.0~7.8、*Nitrobacter*はpH 7.2~8.2が最適な値とされている（Painter and Loveless, 1983; Antoniou *et al.*, 1990）。

アンモニアは水中でNH<sub>4</sub><sup>+</sup>とNH<sub>3</sub>の形で存在し、その存在割合は水温とpHにより決まる。魚にとって有害なNH<sub>3</sub>はpHが高いと割合が高くなる。硝化細菌はpH 7~8で活性が高く、pH 6以下では殆ど活動を停止する。また、硝化にはアルカリ物質を消費し、アルカリ度25 mg CaCO<sub>3</sub>/L以下では硝化は停止する。

硝化に伴うアルカリ物質の消費や溶存二酸化炭素の蓄積からpHは下がる傾向にある。このため、溶存CO<sub>2</sub>の除去やアルカリ物質の補給によりpHを調整する必要がある。pHセンサーと連動させ、アルカリ物質（NaHCO<sub>3</sub>）を添加する方法もある。アルカリ物質の消費量がアンモニアの硝化量に比例することから、給餌量に応じてアルカリ物質を添加する方法もある。一方、カキ殻やサンゴ砂の利用も考えられるが、当初効果があっても、時間の経過と共に表面が細菌に覆われ、アルカリ物質の溶出量が減少する。飼料1kgに対して0.25gのNaHCO<sub>3</sub>が必要である（Loyless and Malone, 1997）。

## 2.5 溶存二酸化炭素の除去 (CO<sub>2</sub> Stripping)

魚や細菌の呼吸により二酸化炭素が発生するが、水中の飽和溶存CO<sub>2</sub>は約0.5mg/Lで、過飽和となった場合は、大気との接触面から放散される。飼育密度を上げるにつれ、水中に高濃度に蓄積する（Summerfelt and Sharrer, 2004）。

DCO<sub>2</sub>（溶存二酸化炭素）耐性は魚種により異なるが、一般に水槽内を20mg/L以下にすることが推奨されている。DCO<sub>2</sub>そのものが魚の健康に影響するが、魚に耐性がある場合でも、高濃度になると水のpHを下げるので、DCO<sub>2</sub>の除去は必要であり、そのため脱ガス、曝気が行われる（Summerfelt *et al.*, 2000; Bergheim *et al.*, 2009; Kristensen *et al.*, 2009）。

## 2.6 溶存酸素制御 (DO Supply)

魚の成長に影響を与えるDO（溶存酸素量）は、飽和の60%程度と言われている（Summerfelt *et al.*, 2000）。従って、水槽出口でのDOが60%以上になる様に酸素を供給する必要がある。水槽への供給酸素量は、魚の時間当たり酸素消費量から計算され、時間当たりの酸素供給量は、流量×（供給酸素濃度－飽和溶存酸素量×0.6）となる。また、硝化細菌も硝化の過程で酸素を消費するが、この量も給餌量から計算可能である。

日本では通常エアレーションにより溶存酸素濃度を高めるが、エアレーションでは飽和以上には出来ない。過飽和の溶存酸素を供給するためには、純酸素や酸素濃度の高い気体を酸素溶入器で供給する必要がある（Summerfelt *et al.*, 2000）。その際、酸素が気泡となって放



散しないようにし、酸素不足や過剰供給とならない様にセンサーを用いて制御する必要がある。

Knowles *et al.* (1965) によると、*Nitrosomonas* は、2.0 mg/L の DO でも硝化作用に影響は無いが、*Nitrobacter* は、4 mg/L 以下では、影響を受けることを報告している。Wheaton *et al.* (1991) と Malone *et al.* (1998) によると、出水口での DO 2 mg/L が、硝化作用を維持する上で最低限必要な DO レベルであるとしている。

## 2.7 水温および流量制御

### (Water Temperature and Flow Control)

水温は水質と並び重要な管理項目であり、魚の成長に最も適した範囲に調整しなければならない。水温制御には、水を直接加温冷却する方法と、室内を空調する方法がある。何れも建物やシステムそのものの断熱を十分にを行い、熱エネルギーの損失を最小限にすべきである。水を直接加温冷却する方法では、雰囲気温度（室温）より水温が高い場合は、飼育水の蒸発が多くなるので、注意が必要である。逆に水温が低く雰囲気温度が高い場合は、断熱が十分でないと結露が発生し、周辺機器に害を及ぼすことがある。

循環流量は、水槽内のアンモニア濃度、生物濾過の硝化量、水槽への酸素供給量や水槽内の流速に影響を及ぼす。成長段階や飼育密度に応じた流量のコントロールが重要である。飼育魚種、飼育重量、給餌率等からおおよそのアンモニア等の窒素排泄量が計算され、実際の飼育水温や水質に応じたアンモニア硝化速度から必要とする濾材容量を算出する必要がある。

硝化速度は処理水のアンモニア態窒素濃度により変化するが、特に  $\text{NH}_4\text{-N}$  5 mg/L 以下では大きく減少する。最大硝化速度の測定では、 $\text{NH}_4\text{-N}$  10 mg/L 以上の高いアンモニア濃度で測定される場合も多いので、使用する濾材の硝化速度がどの様な濃度で測定された値であるか把握すべきである。実際に飼育する場合のアンモニア濃度は、 $\text{NH}_4\text{-N}$  1 mg/L 程度であるから、実用硝化速度は最大硝化速度よりかなり低くなる。

硝化作用に対する水温の影響は、生物化学的な作用と同様に、極めて重要な要因 (Okey and Albertson, 1989) ではあるが、研究成果は限られている。水温が硝化作用に及ぼす影響は、van Hoff-Arrhenius 定数と同様であり、最適水温は、28~38℃であり (Sharma and Ahlert, 1977)、14~27℃の範囲で酸素が十分に供給されていれば、顕著な影響は無いとされている (Zhu and Chen, 2002)。また、養殖対象種の適正な飼育水温の範囲であれば、水温の上昇と共に硝化率は直線的に上昇する (Wortman and Wheaton, 1991)。

## 2.8 光の影響 (Photoinhibition)

光は硝化細菌の成長を阻害し、藻類の生長を促す (Guerrero and Jones, 1996)。硝化細菌は、可視光線、長波長紫外線に対して感受性があり、チトクローム C の光酸化による阻害作用の有ることが示されている (Muller-Neugluck and Engel, 1961; Bock, 1965)。*Nitrobacter* は *Nitrosomonas* より光感受性が強く (Bock, 1965; Olson, 1981)、*Nitrosomonas oceanus* の増殖が抑制される (Watson, 1965)。波長 480 nm の紫外線の場合も増殖が抑制される (Schon and Engel, 1962)。一方、光による抑制からの回復には、暗所で数十日の培養が必要である (Yoshioka and Saijo, 1984)。

## 2.9 殺菌 (Sterilization)

オゾンは強力な殺菌作用を有し、病原細菌やウイルスを速やかに駆逐することが出来る。そして、最終産物として酸素が生成されるため、他の化学的殺菌剤よりも環境に優しい。オゾンは用水の脱色や有機物の除去に対して極めて高い反応性を有するが、人体や養殖魚にとっては有害である。通常商業的には、一般に水銀灯による短い波長の紫外線照射や高電圧による低温放電によって生成されるが、効率が低く、せいぜい 10% 程度である (Summerfelt and Hochheimer, 1997)。水中に有機物、特に亜硝酸が存在すると直ぐに反応し、殺菌効果を下げる (Rosenthal and Kruner, 1985)。重炭酸や炭酸イオンが存在する際にも、OH 基を捕獲するため、同様に殺菌効果が低下する (Legube *et al.*, 1986)。

オゾンは、病原細菌を殺すのに、淡水中では少なくとも、0.02 mg/L の OH 基が必要である。しかし、淡水中では、更に高い濃度と処理時間が必要となる (Liltved *et al.*, 1995)。0.0093 mg/L の濃度のオゾンが残留しているとマス類には有害性がある (Liltved *et al.*, 1995)。IHN ウイルスに対するオゾンの殺菌効率は、0.20 mg/L の濃度で 10 分間の処理で有効である (Owsley, 1991)。一方、Colberg and Lingg (1978) によると、循環濾過システムにおいては、*Aeromonas*, *Pseudomonas*, *Yersinia* 等の病原細菌に対してオゾンは 99% 有効ではある。この様なオゾンの殺菌効率は確かであり、アルテミア幼生の消毒にもその有効性が示されている (Theisen *et al.*, 1998)。しかし、有機物負荷の大きな用水には不向きであるため、比較的汚れの少ない用水に使用されるべきである。また、臭素を含む海水にオゾンを使用すると、有害な酸化プロマイド ( $\text{BrO}_3^-$ ) が生成するため (Summerfelt, 2003; Von Gunten and Hoigne, 1994)、活性炭フィルターを通した後、飼育水に給水する必要がある。

紫外線 (UV) 照射もオゾンと同様に、長年に亘り広く循環濾過飼育に用いられて来た。Spotte and Adams (1981)

によると、UV照射は循環濾過システムにおける病原体の殺菌に有効ではあるが、UV殺菌装置の大小や性能に関わらず、病原体が完全にゼロに成ることはない。同様に、物理的、化学的な方法による殺菌においても、完全にゼロに成ることはない。従って、殺菌曲線のみならず、最初の病原体の数を把握しておくことは重要である。

UV照射は、淡水及び海水ともに用水の殺菌に有効 (Liltved *et al.*, 1995) で、ウイルスよりも細菌に対してより有効であるが、有機物の多い用水では殺菌効果は期待できない。波長300–200nmの紫外線が利用可能であるが、254nmが最も効果的である。

### 3. 各国の取り組み

循環濾過式養殖システムに関する研究は、主にヨーロッパ (デンマーク, オランダ, ドイツ, ノルウェー, フランス) やアメリカ, イスラエル, 日本等で進められてきた。各国の主な大学等の研究機関で取り組まれて来た主要な魚種や文献等を Table 1 に取りまとめた。近年本技術開発が盛んになり、欧米のみならず、中国, 韓国, インド等の国々にも波及している。

#### 3.1 米国

環境保護の観点から海面養殖に対する規制が厳しく、州政府の「許可」を得るのに長期間を要するため、実質的に海面養殖の実施は困難である。海を漁業のためばかりでなく、遊漁、観光等のレジャー、保養の場としての共有財産とする考え方が明確となっている。従って養殖は、陸上で行うものと位置付けられている (守村, 1999; マリノフォーラム21水産養殖研究会, 2003)。

魚種としては、Rainbow trout, Arctic char, Tilapia等の淡水魚が主流であり、海水浄化技術の困難さから、本格的な海産魚の循環式陸上養殖は少ない。本システムは主に種苗生産と親魚育成に利用されている。大学等研究機関と養殖現場が密接に連携しており、産学共同体制が出来ている。主な研究機関を以下に紹介する。

##### 3.1 a North Carolina State University

ノースカロライナ州立大学には、米国における循環濾過システム研究の権威 T. M. Losordo がおり、1970年代から生物濾過器、システム設計等の研究、技術開発が精力的に行われている (Losordo and Westerman, 1994; Losordo, 1997; Losordo *et al.*, 1998; Westerman *et al.*, 1996; Losordo *et al.*, 2000; Losordo and Hobbs, 2000; Delong and Losordo, 2004)。1990年代には本技術に関する初の国際シンポジウムを企画実行した。また、本技術を用いた養殖生産に掛かるコスト面について技術的な提案を行ってい

る (Losordo and Westerman, 1994; Dunning *et al.*, 1998)。

##### 3.1 b University of Maryland

メリーランド大学では、養殖と水産バイオ及び微生物学の基礎と応用研究を行っている (Hochheimer and Wheaton, 1998)。この研究施設では、バイオテクノロジーにより遺伝的に改変された魚は、完全閉鎖循環水槽を使用して飼育されている。新たなタイプの濾過器 (バイオリクター) による水処理技術を試行し (Tal *et al.*, 2003)、硝化、脱窒に関与する微生物のメタゲノム解析を行うと共に、下水処理分野で注目を集めている海洋性アナモックス菌の研究を行っている (Tal *et al.*, 2006)。

##### 3.1 c Louisiana State University

ルイジアナ州立大学の循環システムでは、生物フィルターにはドラム型の大型装置に代わり、浮遊型ビーズフィルターを採用し、装置の小型化を図っている (Gutierrez-Wing and Malone, 2006)。ビーズ上には、脱窒細菌と一般従属栄養細菌を付着させ (Malone and Beecher, 2000)、ポンプを使用しないエアリフト方式によって、電気料金の節約を図っている。循環システムの基本コンセプトは、「コンパクト」、「シンプル」、「安定性」そして「経済性」である (Malone and Pfeiffer, 2006)。

##### 3.1 d University of Texas Medical Branch

テキサス大学の医学部では、医学分野の基礎研究材料としてイカ類 (Yang *et al.*, 1989; Lee *et al.*, 1994) の飼育に循環飼育装置を使用している。本システムは、飼育する生物に適した形と色の水槽、粒子状浮遊物を除去するフィルター、生物硝化及び脱窒 (メタノール添加)、泡沫分離装置、紫外線殺菌装置、エアリフトポンプ及びこれらを制御するコンピュータにより構成される。これらのシステム工程管理は、コンピュータにより自動化され (Lee, 1995; Lee, 2000; Lee *et al.*, 2001)、最大限のパフォーマンスと高い飼育水質の維持が可能であり、本装置は米国及び海外の「特許」を受けている (Lee *et al.*, 2001)。

水質管理項目は、窒素態物質 (NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>)、pH、ORP (酸化還元電位)、水温、塩分、DO、流量である。水質以外で特に重要な管理指標は、海水中1mL当たりの細菌数である。窒素態濃度の低い中で効率的なアンモニア態窒素の酸化と脱窒を行うためには、細菌数を低く抑える必要があり、総細菌数を100個/mL以下にしている。

##### 3.1 e Cornell University

コーネル大学には、North Carolina State University の T. M. Losordo と共に初の国際シンポジウムを企画実行した

Table 1 Main universities and institutes conducting research and development on RAS

Nation	University and institute	Target species	Examples of references
United States of America	North Carolina State University	Tilapia	Losordo and Westerman (1994); Losordo (1997); Losordo et al. (1998); Westerman et al. (1998); Dunning et al. (1998); Losordo and Hobbs (2000); Losordo et al. (2000); DeLong and Losordo (2004)
	University of Maryland	Gilthead Seabream	Wortman and Wheaton (1991); Hochheimer and Wheaton (1998); Tal et al. (2003); Tal et al. (2006); Lyssenko and Wheaton (2005); Tal et al. (2009)
	Louisiana State University	Blue crab,	Manthe et al. (1988); DeLosReyes Jr. and Lawson (1996); Malone and Beecher (2000); Gutierrez-Wing and Malone (2006); Malone and Pfeiffer (2006); Pfeiffer and Malone (2006);
	University of Texas Medical Branch	Loliginid squid, Shrimp, Flounder	Yang et al. (1989); Lee et al. (1994); Lee (1995); Lee et al. (2000); Lee (2000); Lee et al. (2001)
	Cornell University	Sturgeon, Arctic charr, Rainbow trout	Chen et al. (1991); Weeks et al. (1992); Chen et al. (1993); Timmons et al. (1995); Bullock et al. (1997); Timmons et al. (1998); Greiner and Timmons (1998); Singh et al. (1999); Timmons et al. (2002); Timmons et al. (2006)
	The Conservation Fund Freshwater Institute	Rainbow trout, Arctic charr,	Summerfelt and Cleasby (1996); Summerfelt et al. (1997); Summerfelt et al. (1999); Summerfelt et al. (2000); Summerfelt (2003); Ebeling et al. (2004); Summerfelt et al. (2004a); Summerfelt et al. (2004b); Summerfelt (2006); Summerfelt et al. (2009)
Denmark	Technical University of Denmark (DTU Aqua)	Turbot, Flounder, Parch, Rainbow trout, European eel, Atlantic salmon	Suhr and Pedersen (2010); Kirkegaard (2010); Pedersen et al. (2012); Dalsgaard et al. (2013)
France	Palavas Institute of French Research Institute for Exploration of the sea (IFREMER)	Sea bass, Rainbow trout, Turbot,	Blancheton et al. (1995); Sauther et al. (1998); Leonard et al. (2000); Blancheton (2000); d'orbcastel et al. (2009)
Germany	Institute of Oceanography of Kiel University	European eel, Cat Fish, Tilapia, Rainbow trout, Turbot,	Otte and Rosenthal (1979); Kruner and Rosenthal (1983); Rosenthal and Kruner (1985); Thetmeyer et al. (1999); Stiller et al. (2013)
the Netherlands	Wageningen University (Aquaculture and Fisheries Group)	European Eel, African catfish, Rainbow trout, Tilapia,	Bovendeur et al. (1987); Heinsbroek and Kamstra (1990); Nijhof (1995); Kamstra et al. (1998); Eding and Kamstra (2002); Eding et al. (2006); Verdegem et al. (2006); Verdegem and Bosma (2009)
	Institute for Marine Resources and Ecosystem Studies (IMARES)	Turbot, Flounder, Parch, Sole, Sea bass, Sea bream	Schram et al. (2009); Martins et al. (2010); Schneider et al. (2013)
Norway	The Norwegian Institute of Food, Fisheries and Aquaculture Research (Nofima)	Atlantic Cod, Atlantic salmon, Rainbow trout, Atlantic halibut,	Terjesen et al. (2008); Kolarevic et al. (2012a); Kolarevic et al. (2012b); Nobel et al. (2013)
	Norwegian University of Science and Technology (NTNU)	Atlantic Cod, Turbot, European eel, Arctic charr,	Odegaard et al. (1994); Eikebrokk and Ulgenes (1998); Kristensen et al. (2009); Attramadal et al. (2012)
Israel	Hebrew University	Tilapia, Common carp, Channel catfish, Eel	Aboutboul et al. (1995); Arbiv and van Rijn (1995); van Rijn (1996); Barak and van Rijn (2000); Barak et al. (2003); Cytryn et al. (2005); van Rijn et al. (2006)
	Israel National Centre for Mariculture	Sea bream, Sea weed, Abalone, Sea urchin, Sea cucumber	Schroeder (1987); Krom and Neori (1989); Neori et al. (2000); Krom et al. (2001); Mozes et al. (2003); Neori et al. (2004)
China	Chinese Academy of Fisheries Sciences	Channel catfish, Spine stickleback, Yellow catfish, Silver carp,	Wang et al. (2007); Liu et al. (2009); Xial et al. (2009); Zhang et al. (2011); Zheng et al. (2011); Gao et al. (2012); Zheng et al. (2012); Liu et al. (2013); Peirong and Wei (2013)
India	Cochin University	Shrimp, Prawn	Kumar et al.(2008); Kumar et al. (2008); Kumar et al. (2009a); Kumar et al. (2009b); Kumar et al. (2010)

Table 1 Continued

Nation	University or institute	Target species	Examples of references
South Korea	Pukyong National University	Tilapia, Common carp, Channel catfish, Eel, Abalone,	Kim (1997); Kim and Jo (1998); Kim et al. (2000); Park et al. (2001); Seo et al. (2001); Park et al. (2008); Park et al. (2009); Harwanto et al., (2011)
Japan	Central Research Institute of Electric Power Industry	Japanese flounder	Honda (1988); Kikuchi et al. (1990); Kikuchi et al. (1991); Kikuchi et al. (1992); Honda et al. (1993); Kikuchi et al. (1994); Honda (1998)
	Miyazaki University	Eel	Maruyama et al. (1991); Maruyama and Suzuki (1998); Suzuki et al. (2003)
	Tokyo University of Marine Science and Technology	Tilapia	Takeuchi and Endo (2004a); Takeuchi and Endo (2004b); Takeuchi and Endo (2013)

M. B. Timmons がいる。Sturgeon, Arctic char, Rainbow trout 等の淡水魚を対象に、飼育水槽の最適化や泡沫分離装置 (foam fractionation) の開発 (Weeks *et al.*, 1992; Chen *et al.*, 1993; Timmons *et al.*, 1995), 更に従来からの散水濾床と新たなビーズフィルターとの比較検討を行った (Greiner and Timmons, 1998)。

### 3.1f The Conservation Fund Freshwater Institute

淡水保護基金センターには、本技術に関する実用性を強く意識した研究開発を行っている S. T. Summerfelt がおり、主に淡水魚を対象として技術開発に取り組んでいる。殺菌装置として、オゾンや紫外線の導入 (Summerfelt *et al.*, 1997; Summerfelt, 2003; Summerfelt *et al.*, 2009) やマイクロスクリーン (Ebeling *et al.*, 2004) を用いた SS やリンの除去技術の開発、酸素供給や二酸化炭素の除去 (Summerfelt *et al.*, 2000) 等の研究を行った。

## 3.2 欧州

ヨーロッパでは、早くから循環式高密度養殖システムが開発され、ウナギ、ニジマス等の淡水魚を対象に実用化されている。システム開発のニーズとしては、①天然水の汚染と工業用水の需要増加による用水不足、②加温の必要な地域での省エネルギー等の課題解決があった。また、③労働力不足と④栄養塩の排出量削減へのニーズが高まったことが挙げられる。

自然環境の保護やレジャー産業が優先されるため、海面養殖の実施は極めて困難であり、循環式陸上養殖に関する研究開発が1970年代から行われている。採算性に問題はあがるが、技術的には相当部分が解明されており、水質保全上、独自の餌の開発や、自動給餌システムの開発も実施されている。養殖業者に対してコンサル会社が設備の設置を行うと共に、その後も技術指導を行いつつ技術相談に応ずるシステムが出来ている (守村, 1999; マリノフォーラム21水産養殖研究会, 2003)。

### 3.2a Technical University of Denmark (DTU Aqua)

デンマークの Technical University of Denmark (DTU Aqua) では、主にニジマスを対象とした研究開発が盛んである (Dalsgaard *et al.*, 2013)。給餌量と窒素収支のバランス (Pedersen *et al.*, 2012) や固定床濾過器と流動床濾過器の実用規模での比較検討を行っている (Suhr and Pedersen, 2010)。固定床は効率、スピードで流動床 (ビーズ担体等) に劣るが、SSの発生が少なく水槽がきれいであり水の使用量が少なく済む。

一方、Turbot, Flounder, Parch 等海産魚の飼育も行われており、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、種苗生産に関する研究も行われている。

### 3.2b Palavas IFREMER Station

フランスの Palavas IFREMER Station 施設は1970年に種苗生産のモデル施設として建設された。それ以前は魚類の孵化場であり、孵化仔魚の飼育を行っていた。

この施設の要素技術の重要なポイントは、物理濾過フィルターであり、飼育排水中の懸濁物質を出来る限り除去することにある。新水の供給は5回/日換水以上であれば、排水中の窒素濃度は、掛け流し式と同じである。シーバス (Blancheton and Canaguier, 1995) の飼育密度は100kg/m<sup>3</sup>で、新水の供給量は0.5%程度。飼育水が黄色に着色する問題があるが、細菌、フィルター、オゾン処理による対策を行っている。DOは80%以上を維持する。pHは8.0~8.5が目標である。飼育水槽と生物濾過槽の容量比率は、1:1/5が目安である。脱窒槽は、間欠運転が基本 (Sauther *et al.*, 1998)。

Blancheton (2000) は、ヘダイ、スズキの循環式養殖研究を実施し、地中海産クロマグロの種苗生産、養殖にも着手している。浄化システムに密閉式の物理濾過及び生物濾過方式を導入している。逆洗用水の流出量が多く、通常よりも20~30%/日換水率が高い。

### 3.2c Institute of Oceanography of Kiel University

ドイツのInstitute of Oceanography of Kiel UniversityのRosenthal博士はヨーロッパの循環濾過飼育に関する権威である。European eel, Cat Fish, Tilapia, Rainbow trout等の淡水魚やTurbot等の海産魚を対象に循環飼育に関する研究開発を行った(Otte and Rosenthal, 1979)。本システムを用いた「養殖」と「種苗生産」は、分けて考える必要があり、殺菌に頼らない生態学的バランスを保つ飼育を心掛けるべきとのことである。バイオフィルターによる水質浄化は、BOD値を水質評価の基準とし、pHの変化を重視している。紫外線殺菌装置の配管をサイクロン構造にし、循環水に対する外気温の影響を回避するため断熱構造を採用している。オゾンを使用した際に発生するオキシダントを除去するために活性炭を用いている。しかし活性炭はパイプに付着するため、パイプの孔が塞がる等の問題があったが、洗浄コストが掛かる問題を含め解決を図った(Rosenthal and Kruner, 1985)。

### 3.2d Wageningen University

#### (Aquaculture and Fisheries Group)

オランダのWageningen University (Aquaculture and Fisheries Group)では、European eel, African cat fish, Rainbow trout, Tilapiaをターゲット(Bovendeur *et al.*, 1987; Eding and Kamstra, 2002)とした技術開発が行われている。特にウナギ養殖(Heinsbroek and Kamstra, 1990)に本システムを使用して成果を上げている。生物濾過では、散水濾床(Nijhof, 1995; Kamstra *et al.*, 1998; Eding *et al.*, 2006)が用いられている。

### 3.2e Institute for Marine Resources and Ecosystem Studies (IMARES)

ワグニンゲン大学のInstitute for Marine Resources and Ecosystem Studies (IMARES)では、Turbot, Flounder, Parch, Sole (Schneider *et al.*, 2012), Sea bass, Sea breamで飼育試験も実施され(Martins *et al.*, 2010)、海産魚(Schram *et al.*, 2009)が主に行われている。

### 3.2f The Norwegian Institute of Food, Fisheries and Aquaculture Research (Nofima)

ノルウェーのThe Norwegian Institute of Food, Fisheries and Aquaculture Research (Nofima)では、Atlantic cod, Atlantic salmon, Rainbow trout, Atlantic halibutの飼育が行われ、特に大西洋サケの種苗生産に循環式飼育システムを使用し、流動床濾過器及びCO<sub>2</sub>曝気を機能化し、自動化による省力化が図られている(Terjesen *et al.*, 2008; Nobel *et al.*, 2013)。一方、高密度種苗育成を行う際に、高濃度

のアンモニアがサケ種苗の育成に及ぼす影響調査等が、生理学的及び分子生物学的手法を用いて行われている(Kolarevic *et al.*, 2012a; 2012b)。

### 3.2g Norwegian University of Science and Technology (NTNU)

Norwegian University of Science and Technology (NTNU)では、Atlantic cod, Turbot, European eel, Arctic char, を対象に研究開発が行われてきた(Eikebrokk and Ulgenes, 1998)。生物濾過に関して、排水処理分野で使用されている生物濾過の技術(Odegaard *et al.*, 1994)を循環濾過システムへ応用する試みが成されており、タラの種苗生産における飼育水中の微生物の制御(Attramadal *et al.*, 2012)の可能性を研究している。

## 3.3 その他の国

### 3.3.1 イスラエル

#### 3.3.1a Hebrew University

ヘブライ大学では、Tilapia, Common carp, Channel catfish, Eel等の淡水魚を対象種としながらも、Van Rijn, J.を中心とする研究者により、生物濾過における硝化・脱窒に関する基礎と応用研究が精力的に展開されている(Aboutboul *et al.*, 1995; Arbiv and van Rijn, 1995; Van Rijn, 1996)。循環濾過飼育技術により、ゼロエミッションを目指した微生物学的研究に関して、窒素除去(Van Rijn *et al.*, 2006)のみならず、リン(Barak and van Rijn, 2000; Barak *et al.*, 2003)や硫化物(Cytryn *et al.*, 2005)等の除去についても理論と実践を展開している。

#### 3.3.1b Israel National Centre for Mariculture (NCM)

イスラエル国立海洋センターでは、N. Mozes, M. D. Krom, A. Neoriらの研究者による研究開発が1980年代から行われおり(Krom and Neori, 1989)、実用化を強く意識した取り組みが多い。海浜域における池中飼育に微細藻類や海藻の培養を取り入れた養殖法が開発されており(Schroeder, 1987)、Sea bream, Abalone, Sea urchin, Sea cucumber等が飼育されている(Neori *et al.*, 2000; Mozes *et al.*, 2003; Neori *et al.*, 2004)。

### 3.3.2 中国

#### 3.3.2a Chinese Academy of Fisheries Sciences

中国水産科学院Chinese Academy of Fisheries Sciencesでは、主に淡水魚であるChannel catfish, Spine stickleback, Yellow catfish, Silver carp等を対象としている。実用規模の飼育技術の開発等(Wang *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2011)のみならず、硝化・脱窒細菌の培養

(Zheng *et al.*, 2011; Zheng *et al.*, 2012; Gao *et al.*, 2012) や固定化技術の開発 (Peirong and Wei, 2013), 更にアナモックス菌 (Xiao *et al.*, 2009) 等のメタゲノム解析も行われている。

### 3.3.3 インド

#### 3.3.3a Cochin University

コーチン大学Cochin Universityでは、主にShrimp, Prawn等のエビ類を対象に、種苗生産に用いる新たな生物濾過器の開発 (Kumar *et al.*, 2008) や硝化・脱窒の役割を担う微生物に関する基礎的な研究が盛ん (Kumar *et al.*, 2010) であり、また生物濾過器自体の改良 (Kumar *et al.*, 2009a; Kumar *et al.*, 2009b) にも取り組んでいる。

### 3.3.4 韓国

#### 3.3.4a Pukyong National University

釜慶大学校Pukyong National Universityでは、Tilapia, Common carp, Channel catfish, Eel等の淡水魚の飼育が盛んであるが (Kim, 1997; Kim and Jo, 1998), 近年, Abaloneの養殖を目的に循環濾過飼育システムが開発されている (Park *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2009)。生物濾過に関して硝化, 脱窒素に参与する微生物の固定化利用 (Kim *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2001; Seo *et al.*, 2001) に関する研究も行われている。

### 3.3.5 日本

#### 3.3.5a Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)

電力中央研究所Central Research Institute of Electric Power Industryでは、1986年から水産業の活性化と一次産業における電気利用技術の開発を目的に、当時市場価値の高かったヒラメを対象に循環濾過式養殖システムの開発が行われた。

酸素消費量 (Honda, 1988) や窒素排出 (Kikuchi *et al.*, 1990; 1991; 1992; 1994) 等のヒラメの生物学的情報の収集から、硝化, 脱窒細菌の培養, 生物浄化槽 (アンモニア, 溶存有機物の微生物分解) を用いた高密度飼育 (Honda *et al.*, 1993) 等の成果が得られた。

#### 3.3.5b Miyazaki University

宮崎大学Miyazaki Universityでは、ウナギ養殖への実用化を意識した技術開発が行われ (Maruyama and Suzuki, 1998), 物理濾過に関して、泡沫分離装置の有効性 (Maruyama *et al.*, 1991) を実証し、ゼロエミッションを目指した研究開発 (Suzuki *et al.*, 2003) が行われた。

#### 3.2.5c Tokyo University of Marine Science and Technology

東京海洋大学Tokyo University of Marine Science and Technologyの竹内教授を中心とする取り組みが、近年積極的に展開されている (Takeuchi and Endo, 2004a)。ティラピア等の淡水魚 (Takeuchi and Endo, 2004b) が中心であるが、閉鎖循環式飼育システムを用いた魚類の飼育技術と宇宙開発とのコラボレーションも実施しており (Endo and Takeuchi, 2013) 注目される。一方、循環濾過養殖に関する研修会を毎年主催し、本技術の向上と普及にも取り組んでいる。

#### おわりに

循環濾過式養殖システムは、海洋汚染, 安全性に対する問題を解決する一方式として、将来性のある有望なシステムと言える。疾病防除, 高生産性, 省エネ等々においても極めて有効である。本システムは様々な要素技術, 仕様等が既に開発されているが、使用目的に如何に合致したシステムを構築するかが、高性能, 低コストを実現するためには重要であろう。

循環濾過式養殖に関する国際シンポジウム (AES News, Summer 2013) は、殆ど毎年の様に開催されており、本技術に対する関心の高さの表れと思われる。本技術は、20世紀の内に現在の基本的なシステムに関しては、ほぼ完成の域に達した感がある。しかし、魚介類には様々な種類があり、魚類, 貝類, 甲殻類等々大括りにしても各々の魚種毎に最適化が求められている。システムの要素技術に関しても、その周辺技術の発展と共に、生産効率の向上のためには常に改良が求められる。

本技術に関わる科学的な知識や経験は必須であり、このシステムを導入するだけで、利益が生まれる訳では無い。日本では1990年頃に民間企業により循環濾過式養殖システムの開発が行われたが、完全な技術とは言えず、いまだ技術開発の途上にあるのが現状である。本技術の使用者が、各要素技術を十分に理解, 評価すると共に、生産計画に合致したシステムの構築が必要であり、それに応えるためのハード面に関する技術開発や情報提供が求められる。

本システムの要である水処理技術に関しては、水産以外の工学分野等異分野との連携による技術革新が是非とも必要である。効率よく硝化, 脱窒する細菌の探索や培養技術, 更に細菌の固定化技術を利用した浄化法の改良が考えられる。飼育装置や水温制御技術等々の改良によるシステムの簡易化, コンパクト化も重要であり、やはりエネルギーコストを如何に低く抑えるかが、低コスト化に大きく貢献する事に結びつくはずである。将来的に



は、再生可能エネルギー等の確保による安価な熱源を組み込み、更なる低コスト化システムの実用化が望まれる。

## 文 献

- Aboutboul Y, Arbiv R, van Rijn J. Anaerobic treatment of intensive fish culture effluents: volatile fatty acid mediated denitrification. *Aquaculture* 1995; 133: 21–32.
- Aquacultural Engineering Society News, Summer 2013, Vol. 16, No.2
- Alleman JE, Veil JA, Canaday JT. Scanning electron microscope evaluation of rotating biological contactor biofilm. *Water Res.*, 1982; 16: 543–550.
- Antoniou P J, Hamilton B, Koopman R, Jain B, Holloway G, Lyberators S, Svoronos A. Effect of temperature and pH on the effective maximum specific growth rate of nitrifying bacteria. *Water Research* 1990; 24: 97–101.
- Arbiv R, van Rijn J. Performance of treatment system for inorganic nitrogen removal in intensive aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 1995; 14: 189–203.
- Attramadal KJK, Salvesen I, Xue R, Oie G, Storseth TR, Vadstein O, Olsen Y. Recirculation as a possible microbial control strategy in the production of marine larvae. *Aquacultural Engineering* 2012; 46: 27–39.
- Avnimelech, Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture* 1999; 176: 227–235.
- Barak Y, van Rijn J. Biological phosphate removal in a prototype recirculating aquaculture treatment system. *Aquaculture Engineering* 2000; 22: 121–136.
- Barak Y, Cytryn E, Gelfand I, Krom M, van Rijn J. Phosphorus removal in a marine prototype, recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 2003; 220: 313–326.
- Bergheim A, Drengstig A, Ulgenes Y, Fivelstad S. Production of Atlantic salmon smolts in Europe – Current characteristics and future trends. *Aquacultural Engineering* 2009; 42(2): 46–52.
- Betlach MR, Tiedje JM. Kinetic explanation for accumulation of nitrite, nitric oxide and nitrous oxide during bacterial denitrification. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1981; 42: 1074–1084.
- Biesterfeld S, Greg F, Phil R, Linda F. Effect of alkalinity type and concentration on nitrifying biofilm. Proceeding of the Water Environment Federation, WEFTEC 2001, pp. 277–291.
- Blancheton JP, Canaguier B. Bacteria and particulate materials in recirculating sea bass (*Dicentrarchus labrax*) production system. *Aquaculture* 1995; 133: 215–224.
- Blancheton JP. Developments in recirculating systems for Mediterranean fish species. *Aquaculture Engineering* 2000; 22: 17–31.
- Bock E. Vergleichende Untersuchungen über die Wirkung sichtbaren Lichtes auf *Nitrosomonas europaea* und *Nitrobacter winogradskyi*. *Archiv für Mikrobiologie*, 1965; 51: 18–41.
- Bovendeur J, Eding EH, Henken AM. Design and performance of a water recirculation system for high-density culture of the African catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell 1822). *Aquaculture* 1987; 63: 329–353.
- Brazil BL. Performance and operation of a rotating biological contactor in a tilapia recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering* 2006; 34: 261–274.
- Brune DE, Gunther DC. The design of a new high rate nitrification filter for aquaculture reuse. *J. World Maricult. Soc.*, 1981; 12: 20–31.
- Chen S, Timmons MB, Bisogni JJ, Aneshansley DJ. Suspended solids removed by foam fractionation. *Prog. Fish. Cult.*, 1992; 55: 69–75.
- Chen S, Timmons MB, Aneshansley DJ, Bisogni Jr. JJ. Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications. *Aquaculture* 1993; 112: 143–155.
- Colberg PJ, Lingg AJ. Effect of ozonation on microbial fish pathogens, ammonia, nitrate, nitrite, and BOD in stimulated reuse hatchery water. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 1978; 35: 1290–1296.
- Colt J, Ludwig R, Tchobanoglous G, Cech Jr JJ. The effect of nitrite on the short-term growth and survival of channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Aquaculture* 1981; 24: 111–122.
- Cytryn E, Minz D, Gelfand I, Neori A, De Beer D, Van Rijn J. Sulfide-oxidizing activity and bacterial community structure in a fluidized bed reactor from a zero-discharge mariculture system. *Environ Sci Technol.* 2005; 39: 1802–1810.
- Dalsgaard J, Lund I, Thorarindottir R, Drengstig A, Arvonen K, Pedersen PB. Farming different species in RAS in Nordic countries: current status and future perspectives. *Aquacultural Engineering* 2013; 53: 2–13.
- Davidson J, Summerfelt S. Solids flushing, mixing, and water profiles within large (10 and 150m<sup>3</sup>) circular ‘Cornell-type’ dual-drain tanks. *Aquacultural Engineering* 2004; 32: 245–271.

- Delong DP, Losordo TM. A comparison of alternative designs and technologies in recirculating aquaculture. In: Proceeding of the Canada Freshwater Aquaculture Symposium, 2004; pp86–90.
- Dunning RD, Losordo TM, Hobbs AO. The economics of recirculating tank systems: A spreadsheet for individual analysis. SRAC Publicaton 1998; No. 456 USDA, 8pp.
- Ebeling JM, Ogden SR, Sibrell PL, Rishel KL. Application of chemical coagulation aids for the removal of suspended solids (TSS) and phosphorus from the microscreen effluent discharge of an intensive recirculating aquaculture system. *North American Journal of Aquaculture* 2004; 66:198–207.
- Eding EH, Kamstra A. Netherlands farms tune recirculation systems to production of varied species. *Global Aquaculture Advocate* 2002; 5:52–54.
- Eding EH, Kamstra A, Verreth JAJ, Huisman EA, Klapwijk A. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. *Aquacultural Engineering* 2006; 34:234–260.
- Ehrich S, Behrens D, Lebedeva E, Ludwig W, Bock E. A new obligately chemolithoautotrophic, nitrite-oxidizing bacterium, *Nitrospira moscoviensis* sp. Nov. and its phylogenetic relationship. *Arch. Microbiol.*, 1995; 164 (1): 16–23.
- Eikebrokk B, Ulgenes Y. Recirculation technologies in Norwegian aquaculture. The second International Conference on Recirculating Aquaculture, Roanoke, Virginia, USA, 1998; pp. 129–137.
- Endo M, Takeuchi T. Effect of production on fish under the closed systems and microgravity. *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* 2013; 30(2): 111–119.
- FAO: “The State of World Fisheries and Aquaculture 2012”, FAO Fisheries and aquaculture department FAO, Rome. 2012.
- Gao X-Y, Xu Y, Liu Y, Liu Y, Liu Z-P. Bacterial diversity, community structure and function associated with biofilm development in a biological aerated filter in a recirculating marine aquacultural system. *Marine Biodiversity*, 2012; 42(1): 1–11.
- Greiner AD, Timmons MB. Evaluation of the nitrification rates of microbead and trickling filters in an intensive recirculating tilapia production facility. *Aquacultural Engineering* 1998; 18:189–200.
- Guerrero MA, Jones RD. Photoinhibition of marine nitrifying bacteria. I. Wavelength – dependent response. *Marine Ecology Progress Series*, 1996; 141: 183–192.
- Gutierrez-Wing MT, Malone RF. Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications. *Aquaculture Engineering* 2006; 34: 163–171.
- Harms H, Koops H-P, Wehrmann H. An ammonia-oxidizing bacterium, *Nitrosovibrio tenuis* nov. gen. nov. sp. *Arch. Microbiol.*, 1976; 108: 105–111.
- 平山和次. 海産動物飼育海水の循環濾過式浄化法に関する研究－Ⅰ. 濾過による海水浄化量の指標としての溶存酸素の減少量. *日水誌* 1965a ; 31 : 977–982.
- 平山和次. 海産動物飼育海水の循環濾過式浄化法に関する研究－Ⅱ. 濾過速度および砂層の厚さと海水浄化量との関係. *日水誌* 1965b ; 31 : 983–990.
- 平山和次. 海産動物飼育海水の循環濾過式浄化法に関する研究－Ⅲ. 濾砂の粒径と海水浄化量 (OCF) との関係. *日水誌* 1966a ; 32 : 11–19.
- 平山和次. 海産動物飼育海水の循環濾過式浄化法に関する研究－Ⅳ. 飼育魚による海水の汚濁, および循環濾過式飼育水量の安全収容量. *日水誌* 1966b ; 32 : 20–27.
- Heinsbroek LTH, Kamstra A. Design and performance of water recirculation systems for eel culture. *Aquacultural Engineering* 1990; 9: 187–207.
- Hochheimer JN, Wheaton, FW. Biological filters: trickling and RBC design. In: Libey, G.S., Timmons, M.B. (Eds.), Proceedings of the Second International Conference on Recirculating Aquaculture, Roanoke, VA, 16–19 July, 1998; pp. 291–318.
- Honda H, Watanabe K, Kikuchi N, Iwata S, Takeda H, Uemoto M, Kiyono M. High density rearing of Japanese flounder with a closed seawater recirculating system equipped with a denitrification unit. *Suisanzoshoku* 1993; 41(1): 19–26.
- Honda H. Displacement behavior of Japanese flounder estimated by the difference of oxygen consumption rate. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* 1988; 54(7): 1259.
- Isaacs SH, Henze M, Soeberg H, Kummel M. External carbon source addition as a means to control an activated sludge nutrient removal process. *Water Research* 1994; 28(3): 511–520.
- Kaiser GE, Wheaton FW. Nitrification filters for aquatic culture systems: state of the art. *J. World Maricult. Soc.* 1983; 14: 302–324.
- Kaiser H, Moskwa G, Schmitz O. Growth of trout in a recirculated system with pH-stabilization by

- denitrification. *J. World Aquacult. Soc.* 1989; 20(1): 46.
- Kamstra A, van DerHeul JW, Nijhof M. Performance and optimization of trickling filters on eel farms. *Aquacultural Engineering* 1998; 17:175-192.
- 河合 章, 吉田陽一, 木俣正夫. 循環濾過飼育水槽の微生物学的研究 - I. 魚の飼育に伴う水質ならびに微生物相の変化について. *日水誌* 1964; 30: 55-62.
- 河合 章, 吉田陽一, 木俣正夫. 循環濾過飼育水槽の微生物学的研究 - II. 濾過砂の硝酸化成作用について. *日水誌* 1965; 31: 65-71.
- Kikuchi K, Takeda S, Honda H, Kiyono M. Oxygen consumption and nitrogenous excretion of starved Japanese flounder. *NIPPON SUISAN GAKKAISHI* 1990; 56(11): 1891.
- Kikuchi K, Takeda S, Honda H, Kiyono M. Effect of feeding on nitrogen excretion of Japanese flounder. *NIPPON SUISAN GAKKAISHI* 1991; 57(11): 2059-2064.
- Kikuchi K, Takeda S, Honda H, Kiyono M. Nitrogenous excretion of juvenile and young Japanese flounder. *NIPPON SUISAN GAKKAISHI* 1992; 58(12): 2329-2333.
- Kikuchi K, Honda H, Kiyono M. Ammonia oxidation in marine biological filters with plastic filter media. *Fisheries Sci.* 1994; 60: 133-136.
- Kim I-B, Jo J-Y. Recirculating aquaculture systems in Korea - development of an environmentally friendly aquaculture system, intensive bio-production Korean (IBK) system. The second International Conference on Recirculating Aquaculture, Roanoke, Virginia, USA, 1998; pp. 139-146.
- Kim I-B. Closed aquaculture systems for the mass production of food fish. *SUISANZOUSHOKU* 1997; 45(3): 423-436.
- Kim S, Kong I, Lee B, Kang L, Lee M, Suh K. Removal of ammonium - N from a recirculation aquacultural system using an immobilized nitrifiers. *Aquacultural Engineering* 2000; 21:139-150.
- 北尾高嶺. 生物学的排水処理工学. (株)コロナ社. 東京. 2003; 186pp.
- 北川政美. 好気性生物処理技術の特徴と発展の流れ. *エバラ時報* 2010; 228: 13-22.
- 北田修一. 栽培漁業の成功条件と生物学的問題点. 栽培漁業を考える (第5回). アクアネット, 東京. 1998; 11: 42-44.
- Knowles G, Downing AL, Barrett MJ. Determination of kinetic constants for nitrifying bacteria in mixed culture, with the aid of an electric computer. *J. Gen. Microbiol.* 1965; 38: 263-278.
- Kolarevic J, Selset R, Felip O, Good C, Snekvik K, Takle H, Ytteborg E, Baeverfjord G, Asgard T, Terjesen BF. Influence of long term ammonia exposure on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) parr growth and welfare. *Aquaculture Research* 2012a; 1-16.
- Kolarevic J, Takle H, Felip O, Selset R, Ytteborg E, Selset R, Good CM, Baeverfjord G, Asgard T, Terjesen BF. Molecular and physiological responses to long-term sublethal ammonia exposure in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquatic Toxicology* 2012b; 125: 48-57.
- Kristensen T, Atland A, Rosten T, Urke HA, Rosseland BO. Important influent-water quality parameters at freshwater production sites in two salmon producing countries. *Aquacultural Engineering* 2009; 41(2): 53-59.
- Krom MD, Neori A. A total nutrient budget for and experimental intensive fishpond with circularly moving seawater. *Aquaculture* 1989; 83:345-358.
- Krunner G, Rosenthal H. Efficiency of nitrification in trickling filters using different substrates. *Aquacultural Engineering* 1983; 2:49-67.
- Kumar VJR, Achuthan C, Manju NJ, Philip R, I.S.B. Singh ISB. Activated packed bed bioreactor for rapid nitrification in brackish water hatchery system. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 2008; 355-365.
- Kumar VJR, Achuthan C, Manju NJ, Philip R, Singh, ISB. A stringed bed suspended bioreactor (SBSBR) for in situ nitrification in penaeid and non-penaeid hatchery systems. *Aquacult. Int.* 2009a; 17: 479-489.
- Kumar VJR, Achuthan C, Manju NJ, Philip R, Singh ISB. Activated packed bed bioreactors (PBBR) for the rapid nitrification in brackish water hatchery system. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 2009b; 36: 355-365.
- Kumar VJR, Joseph V, Philip R, Singh, ISB. Nitrification in brackish water recirculating aquaculture system integrated with activated packed bed bioreactor. *Water Sci. Tech.* 2010; 61(3): 797-805.
- Lee PG, Turk PE, Yang WT, Hanlon RT. Biological characteristics and biomedical applications of the squid *Sepioteuthis lessoniana* cultured through multiple generations. *Biol. Bull.* 1994; 186: 328-341.
- Lee PG, Turk PE, Whitson JL. Automated closed recirculating aquaculture filtration system. Patent No. US 6,171,480 B1, 2001.
- Lee PG, Lea RN, Dohmann E, Prebilsky W, Turk PE, Ying

- H, Whitson JL. Denitrification in aquaculture systems: an example of a fuzzy logic control problem. *Aquacultural Engineering* 2000; 23: 37–59.
- Lee PG. A review of automated control systems for aquaculture and design criteria for their implementation. *Aquacultural Engineering* 1995; 14: 205–227.
- Lee PG. Process control and artificial intelligence software for aquaculture. *Aquacultural Engineering* 2000; 23: 13–36.
- Legube B, Croue JP, Reckhow DA, Dore M. Ozonation of organic precursors: effects of bicarbonate and bromide. Pages 73–86 in R. Perry and A.E. McIntype, editors. Proceeding of the international conference on the role of ozone in water wastewater treatment. Pelper, Ltd., London. 1986.
- Lewis WM, Buynak GL. Evaluation of a revolving plate type biofilter for use in recirculating fish production and holding tanks. *Trans. Am. Fish. Soc.* 1976; 105: 704–708.
- Liao PB, Mayo RD. Salmonid hatchery water reuse systems. *Aquaculture* 1972; 1: 317–335.
- Libey GS. Evaluation of a drum filter for removal of solids from a recirculating aquaculture system. pp. 519–532. In J.K. Wang, Editor. Techniques for modern aquaculture. American Society of Agricultural Engineers, Saint Joseph, Michigan. 1993.
- Liltved H, Hekton H, Efraimsson H. Inactivation of bacterial and viral fish pathogens by ozonation or UV irradiation in water of different salinity. *Aquacultural Engineering* 1995; 14: 107–122.
- Liu H, Chen J, Ni Q, Xu H. Design of a recirculating aquaculture system based on mass balance. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2009; 25(2): 161–166.
- Losordo TM, Westerman PW. An analysis of biological, economic, and engineering factors affecting the cost of fish production in recirculating aquaculture systems. *J. World Aquaculture Society* 1994; 24: 193–203.
- Losordo TM, Hobbs AO. Using computer spreadsheets for water flow and biofilter sizing in recirculating aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* 2000; 23: 95–102.
- Losordo TM, Hobbs AO, DeLong DP. The design and operational characteristics of the CP&L/EPRI fish barn: a demonstration of recirculating aquaculture technology. *Aquacultural Engineering* 2000; 22: 3–16.
- Losordo TM, Masser MP, Rakocy J. Recirculating aquaculture tank production systems: An overview of critical considerations. SRAC Publication No. 451 USDA, 6pp. 1998.
- Losordo TM. Tilapia culture in intensive recirculating systems. In: Tilapia Aquaculture in the Americas. Vol. 1. pp. 185–211. (Costa-Pierce, B.A. and J.E. Rakocy, Eds.). Baton Rouge, Louisiana: The World Aquaculture Society. 1997.
- Loyless JC, Malone RF. A sodium bicarbonate dosing methodology for pH management in freshwater recirculating aquaculture systems. *Prog. Fish-Culturist* 1997; 59(3): 198–205.
- Malone RF, Beecher LE. Use of floating bead filters to recondition recirculating waters in warm water aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* 2000; 22: 57–74.
- Malone RF, Pfeiffer TJ. Rating fixed-film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 2006; 34: 389–402.
- Malone, R.F., and D.E. Coffin, (1991) Biofiltration and solids capture with low density bead filters, in “Design of high-density recirculating aquaculture systems” (A workshop proceeding, September 25–27, 1991), Louisiana sea grant communication office, Baton rouge, 1991, pp. 29–35.
- Malone RF, Manthe DP. Chemical addition for accelerated nitrification of biological filters in closed blue crab shedding systems. National Symposium on the soft-shelled blue crab fishers, Ocean Springs, MS. 1985.
- Malone RF, Chitta BS, Drennan DG. Optimizing nitrification in bead filters for warm water recirculating aquaculture system. In: Wang, J K (Ed.), Techniques for modern aquaculture, American society of agriculture engineers, Michigan, pp. 315–325. 1993.
- Malone RF. Floating media biofilter. U.S. Patent No. 5,126,042. 1992.
- Malone RF. Floating media hourglass biofilter. U.S. Patent No. 5,232,586. 1993.
- Malone, R.F., Becher, L.E., DelosReyes Jr., A.A. Sizing and management of floating bead bioclarifiers. In Proceeding the second international conference of recirculating aquaculture, July 16–19; pp. 319–341. 1998.
- Manthe DP, Malone RF, Kumar S. Submerged rock filter evaluation using an oxygen consumption criterion for closed recirculating system. *Aquacultural Engineering* 1988; 7: 97–111.
- Manthe DP, Malone RF, Kumar S. Limiting factors associated

- with nitrification in closed blue crab shedding systems. *Aquacultural Engineering* 1984; 3: 119–140.
- Martins CIM, Eding EH, Verdegem MCJ, Heinsbroek LTN, Schneiden O, Blancheton JP, d'Orbcasteld ER, Verreth JAJ. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering* 2010; 43(3): 83–93.
- マリノフォーラム21水産養殖研究会. 閉鎖循環式陸上養殖システムの開発(環境創出型養殖技術)技術資料. 社)マリノフォーラム21, 東京. 2003; 1–85.
- Maruyama T, Suzuki Y. The present stage of effluent control in Japan and pollutant load from fish culture to environment. Possibility of intensive recirculating fish culture systems. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1998; 64, 216–226.
- Maruyama T, Okuzumi M, Saheki A, Shimamura S. The purification effect of the foam separating system in living fish transportation and preservation. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1991; 57: 219–225.
- 丸山俊朗. 養魚排水の量・濃度と環境への負荷. 「水産養殖とゼロエミッション研究. (日本水産学会監修) (日野明徳, 丸山俊朗, 黒倉 寿編). 水産学シリーズ No.123.」. 恒星社厚生閣, 東京. 1999; 9–24.
- Masser MP, Rackocy J, Losordo TM. Recirculating aquaculture tank production systems: management of recirculating systems. Southern Regional Aquaculture Center, Publication no. 452. 12pp. 1999.
- Meincke M, Krieg E, Bock E. Nitrososivrio spp., the dominant ammonia-oxidizing bacteria in building sandstone. *Appl. Environ. Microbiol.* 1989; 55(8): 2108–2110.
- Miller GE, Libey GS. Evaluation of three biological filters suitable for aquaculture applications. *J. World Maric. Soc.* 1985; 16: 158–168.
- 守村慎次. 負荷低減研究における国際情勢. 「水産養殖とゼロエミッション研究. (日本水産学会監修. 日野明徳, 丸山俊朗, 黒倉 寿編) 水産学シリーズNo.123.」 恒星社厚生閣, 東京. 1999; 32–40.
- Mozes N, Eshchar M, Conijeski D, Fediuk M, Ashkenazy, A. Marine recirculating systems in Israel – performance, production cost analysis and rationale for desert condition. *Israeli J. Aquacult. – Bamidgah* 2003; 55(4): 274–282.
- Muller-Neugluck M, Engel H. Photoinaktivierung von *Nitrobacter uinogradskyi*. *Buch. Arch. Mikrobiol.* 1961; 39: 130–138.
- 中里 靖. 養魚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. (日本水産学会監修. 日野明徳, 丸山俊朗, 黒倉 寿編) 水産学シリーズ No.123」 恒星社厚生閣, 東京. 1999; 25–31.
- Neori A, Shpigel M, Ben-Ezra D. Sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone. *Aquaculture* 2000; 186: 279–291.
- Neori A, Chopin T, Troll M, Buschmann AH, Kraemer GP, Halling C, Shpigel M, Yarish C. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture* 2004; 231: 361–391.
- Nijhof M. Bacterial stratification and hydraulic loading effects in a plug-flow model for nitrifying trickling filters applied in recirculating fish culture systems. *Aquaculture* 1995; 134: 49–64.
- Nobel C, Kankainen M, Setala J, Berrill IK, Ruohonen K, Damsgard B, Toften H. The bio-economic costs and benefits of improving productivity and fish welfare in aquaculture: utilization CO<sub>2</sub> stripping technology in norwegian Atlantic salmon smolt production. *Aquaculture Economics & Management* 2013; 16(4): 414–428.
- Odegaard H, Rusten B, Westrum T. A new moving bed biofilm reactor – applications and results. *Water Sci. Technol.* 1994; 29: 157–165.
- Okey RW, Albertson OE. Diffusion's role in regulating rate and masking temperature effects in fixed-film nitrification. *J. Water Pollution Control Federation* 1989; 61(4): 500–509.
- Olson RJ. Differential photoinhibition of marine nitrifying bacteria: a possible mechanism for the formation of the primary nitrite maximum. *J. Mar. Res.* 1981; 39: 227–288.
- Otte G, Rosenthal H. Management of a closed brackish water system for high-density fish culture by biological and chemical water treatment. *Aquaculture* 1979; 18(2): 169–181.
- Owsley DE. Ozone for disinfecting hatchery rearing water. Pages 417–420 in J. Colt and R.J. White, editors. Fisheries bioengineering symposium. American Fisheries Society, Symposium 10, Bethesda, Maryland. 1991.
- Painter HA, Loveless JE. Effect of temperature and pH value on the growth-rate constants of nitrifying bacteria in the activated-sludge process. *Water Research* 1983; 17: 237–

- 248.
- Park E-J, Seo J-K, Kim M-R, Jung II-H, Kim JY, Kim S-K. Salinity acclimation of immobilized freshwater denitrifier. *Aquacultural Engineering* 2001; 24(3): 169-180.
- Park J, Kim P-K, Jo J-Y. Growth performance of disk abalone *Haliotis discus hannai* in pilot- and commercial-scale recirculating aquaculture systems. *Aquacult. Int.* 2008; 16: 191-202.
- Park J, Kim H-B, Kim P-K, Jo J-Y. Feces production and ammonia excretion of pacific abalone, *Haliotis discus hannai*, fed kelp, *Laminaria japonica*, in relation to water temperature and shell length. *Journal of the World Aquaculture Society* 2009; 40(2): 207-215.
- Payne WJ. Reduction of nitrogenous oxides by microorganisms. *Bacteriol. Rev.* 1973; 37(4): 409-452.
- Pedersen L-F, Karin IK, Dalsgaard J, Pedersen P, Arvin E. Effects of feed loading on nitrogen balances and fish performance in replicated recirculating aquaculture systems. *Aquaculture* 2012; 338: 237-245.
- Peirong Z, Wei L. Use of fluidized bed biofilter and immobilized *Rhodopseudomonas palustris* for ammonia removal and fish health maintenance in a recirculation aquaculture system. *Aquaculture Research* 2013; 44(3): 327-334.
- Rogers GL, Klemetson SL. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. *Aquacultural Engineering* 1985; 4: 135-154.
- Rogers GL. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilters. *Aquacultural Engineering* 1985; 4: 135-154.
- Rosenthal H, Krüner G. Treatment efficiency of an improved ozonation unit applied to fish culture situations. *Ozone Sci. Eng.* 1985; 7(3): 179-190.
- 齊藤節雄, 高丸禮好, 森 立成. 生物濾過処理による魚類飼育海水の高度利用技術開発試験. 平成5年度北海道立栽培漁業総合センター事業報告書. 1994: 69-76.
- 佐伯有常. 魚介類の循環濾過式飼育法の研究基礎理論と装置設計基準. 日水誌 1958; 23: 684-695.
- 早乙女浩一. 栽培漁業の現状と課題. 日本水産学会誌 2009; 75(1): 131-137.
- 佐野和生. 水の再利用. 養殖工学概論. 緑書房, 東京. 1988; 140-156.
- Sauther N, Grasmick A, Blancheton LP. Biological denitrification applied to a marine closed aquaculture system. *Water Research* 1998; 32(6): 1932-1938.
- Schneider O, Schram E, Kals J, van der Heul J, Kankainen M, van der Mheen H. Welfare interventions in flatfish recirculation aquaculture systems and their economical implications. *Aquaculture Economics & Management* 2012; 16: 399-413.
- Schon G, Engel H. Der Einfluss des Lichtes auf *Nitrosomonas europaea*. *Win. Arch. Mikrobiol.* 1962; 42: 415-428.
- Schram E, Verdegem MCJ, Widjaja RTOBH, Kloet CJ, Foss A, Schelvis-Smit R, Roth B, Immsland AK. Impact of increased flow rate on specific growth rate of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*, Rafinesque 1810) *Aquaculture* 2009; 292: 46-52.
- Schroeder, G.L. Carbon and nitrogen budgets in manured fish ponds on Israel's coastal plain. *Aquaculture* 1987; 62: 259-279.
- Seo J-K, Jung II-H, Kim M-R, Kim BJ, Nam S-W, Kim S-K. Nitrification performance of nitrifiers immobilized in PVA (polyvinyl alcohol) for a marine recirculating aquarium system. *Aquacultural Engineering* 2001; 24(3): 181-194.
- Sharma B, Ahlert RC. Nitrification and nitrogen removal. *Wat. Res.* 1977; 11: 897-925.
- Spotte SS, Adams G. Pathogen reduction in closed aquaculture systems by UV radiation: Fact or Artifact? *Marine Ecology - Progress Series* 1981; 6: 295-298.
- Suhr KI, Pedersen PB. Nitrification in moving bed and fixed bed biofilters treating effluent water from a large commercial outdoor rainbow trout RAS. *Aquaculture* 2010; 42: 31-37.
- 水産動物の種苗の生産及び放流並びに水産動物の育成に関する基本方針. 「水産動物の種苗の生産及び放流並びに水産動物の育成に係る技術の開発に関する事項」. 2010; 4p.
- 水産白書. 「我が国水産業をめぐる動き」. 農林水産省, 東京. 2013; 108-112.
- Summerfelt ST, Cleasby JL. A review of hydraulics in fluidized-bed biological filters. *ASAE Trans.* 1996; 39(3): 1161-1173.
- Summerfelt ST, Hochheimer JN. Review of ozone processes and applications as an oxidizing agent in aquaculture. *The Progressive Fish-Culturist* 1997; 59: 94-105.
- Summerfelt ST, Sharrer MJ. Design implication of carbon dioxide production within biofilters contained in recirculating salmonid culture systems. *Aquacultural Engineering* 2004; 32: 171-182.



- Summerfelt ST, Wade EM. Fluidized-sand biofilters installed at two farms. *Recirc. Today* 1998; 1(1): 18-21.
- Summerfelt ST, Hankins JA, Durant MD, Goldman JN. Removing obstructions: modified pipe-lateral flow distribution mechanism reduces backflow in fluidized-sand biofilter. *Water Environ. Technol.* 1996; 8: 39-49.
- Summerfelt ST, Hankins JA, Weber AL, Durant MD. Ozonation of a recirculating rainbow trout culture system II. Effects on microscreen filtration and water quality. *Aquaculture* 1997; 158: 57-67.
- Summerfelt ST, Vinci BJ, Piedrahita RH. Oxygenation and carbon dioxide control in water reuse systems. *Aquacultural Engineering* 2000; 22: 87-108.
- Summerfelt ST, Sharrer MJ, S.M. Tsukuda SM, Gearheart M. Process requirements for achieving full-flow disinfection of recirculating water using ozonation and UV irradiation. *Aquacultural Engineering* 2009; 40(1): 17-27.
- Summerfelt ST. Engineering design of modular and scalable recirculating systems containing circular tanks, microscreen filters, fluidized-sand biofilters, cascade aerators, and low-head or U-tube oxygenators. pp. 217-244 in G.S. Libey and M.B. Timmons, editors. *Aquacultural Engineering Society Proceedings II: Successes and failures in commercial recirculating aquaculture*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, New York. 1996.
- Summerfelt ST. Ozonation and UV irradiation - an introduction and examples of current applications. *Aquacultural Engineering* 2003; 28: 21-36.
- Summerfelt ST, Hankins JA, Heinen JM, Weber AL, Morton JD. Evaluation of the triangle TM microsieve filter in a water-reuse system. pp. 45 In world aquaculture society symposium (Proceedings). World aquaculture society, Baton Rouge, Louisiana. 1994.
- Suzuki Y, Maruyama T, Numata H, Sato H, Asakawa M. Performance of a closed recirculating system with foam separation, nitrification and denitrification units for intensive culture of eel: towards zero emission. *Aquacultural Engineering* 2003; 29: 165-182.
- Takeuchi T, Endo M. Recent advances in closed recirculating aquaculture systems. *Eco-Engineering* 2004a; 16(1): 15-20.
- Takeuchi T, Endo M. Nutrient removal from aquaculture waste using the green alga *Scenedesmus quadricauda*. *Eco-Engineering* 2004b; 16(3): 195-201.
- Tal Y, Watts JEM, Schreier SB, Sowers KR, Schreier HJ. Characterization of the microbial community and nitrogen transformation processes associated with moving bed bioreactors in a closed recirculated mariculture system. *Aquaculture* 2003; 215: 187-202.
- Tal Y, Schreier HJ, Sowers KP, Stubblefield JD, Place AR, Zohar Y. Environmentally sustainable land-based marine aquaculture. *Aquaculture* 2006; 286: 28-35.
- Tam NFT, Wong YS, Leung G. Effect of exogenous carbon sources on removal of inorganic nutrient by the nitrification-denitrification process. *Water Research* 1992; 26: 1229-1236.
- Terjesen BF, Ulgenon Y, Faera SO, Summerfelt ST, Brunsvik P, Baeverfjord G, Nerland S, Takle H, Norvik OC, Kittelsen A. RAS research facilities dimensioning and design: a special case compared to planning production systems. In *Aquaculture Engineering Society Issues Forum Proceeding*. Roenoke, Virginia, 23rd-24th July, 2008. 223-238.
- Theisen DD, Stansell DD, Woods LC. Disinfection of nauplii of *Artemia franciscana* by ozonation. *The Progressive Fish-Culturist* 1998; 60(2): 149-151.
- Timmons MB. Use of foam fractionators in aquaculture. In: Timmons, M.B., Losordo, T.M. (eds.), *Aquaculture Water Reuse System: Engineering Design and Management*. Elsevier, Amsterdam, pp. 247-279. 1994.
- Timmons M, Chen S, Weeks N. Mathematical model of a foam fractionator used in aquaculture. *J. World Aquaculture Soc.* 1995; 26: 225-233.
- Timmons MB, Summerfelt ST. Application of fluidized-sand biofilters. In: Libey GS, Timmons MB. (eds.), *Proceedings of the Second International Conference on Recirculating Aquaculture*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Roanoke, VA, pp. 342-354. 1998.
- Timmons MB, Ebeling JM, Wheaton FW, Summerfelt ST, Vinci BJ. *Recirculating Aquaculture Systems*. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, New York, p. 647. 2001.
- Timmons MB, Holder JL, Ebeling JB. Microbead Filters: Cost-Effective, Scalable Filtration. *Global Aquaculture Advocate* 2005; 8: 68-69.
- Timmons MB, Holder JL, Ebeling JB. Application of microbead biological filters. *Aquacultural Engineering* 2006; 34: 332-343.
- 鳥居茂樹, 齊藤節雄, 森 立成, 高丸禮好, 川真田憲治, 清野勝博, 余湖孝吉, 川崎周次成. ヒラメ種苗生産における好適飼育条件について-生物濾過処理によ

- る魚類飼育海水の高度利用技術開発試験－平成6年度水産試験研究成果発表会講演要旨集. 1994; 4p.
- Van Gorder SD, Jug-Dugakovic J. Performance characteristics of rotating biological contactors within a commercial recirculating aquaculture system. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Recirculating Aquaculture, July 2005; 22–24, pp. 350–360.
- Van Rijn J. The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture – A review. *Aquaculture* 1996; 139: 181–201.
- Van Rijn J, Barak Y. Denitrification in recirculating aquaculture systems: from biochemistry to biofilter. In: The Second International Conference on Recirculating Aquaculture, Cooperative Extension/Sea Grant, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, pp. 179–187. 1998.
- Van Rijn J, Tal J, Schreier HJ. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacultural Engineering* 2006; 34:364–386.
- Van Rijn J. The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture—A review. *Aquaculture* 1996; 139: 181–201.
- Von Gunten U, Hoigne J. Bromate formation during ozonation of bromide-containing waters: interaction of ozone and hydroxyl radical reactions. *Environ. Sci. Technol.* 1994; 28(7): 1234–1242.
- Wang H, Liu C-F, Qin C-X, Cao S-Q, Ding J. Using a macroalgae *Ulva pertusa* biofilter in a recirculating system for production of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Aquacultural Engineering* 2007; 36(3): 217–224.
- Watson SW. Characteristics of a marine nitrifying bacterium, *Nitrosocystis oceanus* sp. N. *Limnol. Oceanogr.* 1965; 10: 274–289.
- Watson SW. Taxonomic considerations of the family *Nitrobacteraceae* Buchanan. *Int. J. Systematic Bacteriology* 1971; 21(3): 254–270.
- Weeks N, Timmons M, Chen S. Feasibility of using foam fractionation for the removal of dissolved and suspended solids from fish culture water. *Aquacultural Engineering* 1992; 11: 251–265.
- Westerman PW, Losordo TM, Wildhaber ML. Evaluation of various biofilters in an intensive recirculating fish production facility. *Trans. ASAE* 1996; 39: 723–727.
- Wheaton F, Hochheimer J, Kaiser GE. Fixed film nitrification filters for aquaculture. In: Brune DE, Tomasso JR. (Ed.), *Aquaculture and Water Quality*. World Aquacult. Soc., Baton Rouge, LA, pp. 272–303. 1991.
- Wilderer PA, Jones WL, Dau U. Competition in denitrification systems affecting reduction rate and accumulation of nitrite. *Water Res.* 1987; 21: 239–245.
- World Population Prospects. The 2012 version. “Highlights and Advance Tables.” United Nations New York. 2013.
- Wortman B, Wheaton F. Temperature effects on biofilm nitrification. *Aquacultural Engineering* 1991; 10(3): 183–205.
- Xiao Y, Zeng GM, Yang ZH, Liu YS, Ma YH, Yang L, Wang RJ, Xu ZY. Coexistence of nitrifiers, denitrifiers and anammox bacteria in a sequencing batch biofilm reactor as revealed by PCR-DGGE. *Journal of Applied Microbiology* 2009; 106: 496–505.
- Yang WT, Hanlon RT, Lee PG, Turk PE. Design and function of closed seawater systems for culturing loliginid squids. *Aquacultural Engineering* 1989; 8(1): 47–65.
- Yoshioka T, Saijo Y. Photoinhibition and recovery of  $\text{NH}_4^+$ -oxidizing bacteria and  $\text{NO}_2^-$ -oxidizing bacteria. *J. Gen. and Appl. Microbiology* 1984; 30: 151–166.
- Zhang S-Y, Li G, Wu H-B, Liu X-G, Yao Y-H, Tao L, Liu H. An integrated recirculating aquaculture system (RAS) for land-based fish farming: The effects on water quality and fish production. *Aquacultural Engineering* 2011; 45: 93–102.
- Zheng H, Liu Y, Sun G, Gao X, Zhang Q, Liu Z. Denitrification characteristics of a marine origin psychrophilic aerobic denitrifying bacterium. *Journal of Environmental Sciences* 2011; 23(11): 1888–1893.
- Zheng H-Y, Liu Y, Gao X-Y, Ai G-M, Miao L-L, Liu Z-P. Characterization of a marine origin aerobic nitrifying-denitrifying bacterium. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 2012; 114(1): 33–37.
- Zhu S, Chen S. The impact of temperature on nitrification rate in fixed film biofilters. *Aquacultural Engineering* 2002; 26: 221–237.