



Title	泡沫分離・硝化システムによるヒラメの閉鎖循環式養殖
Author(s)	丸山, 俊朗; 鈴木, 祥広; 佐藤, 大輔 他
Description	第6回衛生工学シンポジウム (平成10年11月5日 (木) -6日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 7 調査事例 . 7-7
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 6, 270-274
Issue Date	1998-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7362
Type	departmental bulletin paper
File Information	6-7-7_p270-274.pdf



7-7 泡沫分離・硝化システムによるヒラメの閉鎖循環式養殖

丸山俊朗、鈴木祥広、佐藤大輔(宮崎大学工学部)
神田 猛、道下 保(宮崎大学農学部)

1. はじめに

閉鎖性水域における大きな汚濁負荷源の1つに養殖排水がある。海産魚、淡水魚のいずれも1トンの養殖負荷の人口当量は、少なく見積もっても、60人に達するので、陸上での循環型養殖が可能ならば、負荷源の削減に寄与できる¹⁾。本研究では、(1)循環型泡沫分離・硝化システム²⁾と流水式システムの両方でヒラメを養殖し、両者の成長速度などを比較して循環型養殖の可能性を明らかにし、同時に、(2)循環型泡沫分離・硝化システム²⁾によるヒラメ養殖におけるC、N、Pの物質収支を求め、それぞれのプロセスの処理機能に関する知見を得、流水式を閉鎖循環式養殖システムに替えた場合のヒラメ養殖における負荷削減量を見積もった。

高密度循環型養殖の研究は約10年ほど前から北西ヨーロッパ(デンマーク、オランダ、ドイツ、ノルウェーなど)、北アメリカ、イスラエル、及び日本で進められてきた。北西ヨーロッパにおける研究開発の目的は、①天然水の汚染と工業用水の需要増による用水不足、②加温必要地域での省エネルギーであったが、③労働力不足と保蔵技術の進歩が開発を促進し、④栄養塩の排出量削減の必要性が高まったため³⁾である。また、循環型養殖は開放式(流水式)養殖に比較して、①用水エネルギーの節約、労働生産性の向上、③土地面積当たりの生産性の向上、④全天候型産業への転換、⑤高齢者労働力の活用、などの利点が考えられる。

現在のところ、国際的な高密度循環型養殖の本格的実用化例は多くはない。その理由は、開放型養殖に比較して設備費と運転維持管理費が高く、生物処理が必ずしも安定しないために飼育成績に不安があったためであるが、現時点ではシステムは著しく改善されてきている⁴⁾。欧米で開発された高密度養殖システムの代表的な基本構成は、「飼育水槽⇒物理的懸濁物除去⇒バイオフィルター⇒酸素供給」⁴⁾である。バイオフィルターにはさまざまなプロセスが採用されている。このシステムに、飼育水の硝酸イオン濃度の低下と懸濁物質の減量を目的として、分離された固形物を炭素源にした脱窒プロセスをバイパスで設けるシステム³⁾が提案されている。循環養殖システムにおける最も重要なポイントは懸濁物除去とアンモニアの硝化である。これまでに報告されている閉鎖循環式養殖システムと称されているシステムでは、すべて1日換水率が数%である。換水率が数%であっても、負荷削減量は著しく低下してしまう。負荷削減を主目的とする養殖システムは、注水も排水もしない完全な閉鎖循環式養殖システムでなければならない。

2. システム、材料、および実験方法

閉鎖循環式養殖システムの必須条件：適切な飼育水の条件はpHと水温が適切な範囲にあり、溶存酸素濃度(DO)がほぼ飽和濃度に保持され、懸濁物とアンモニア性窒素がないことである。したがって、閉鎖循環式養殖システムは、給餌によって連続的に生じる高負荷のもとで、これらの条件を満たす制御プロセスと処理プロセスとが必要になる。pHと水温の制御は市販品を利用することができるので、閉鎖循環式の高密度養殖システムには酸素供給、懸濁物除去、およびNH₄-Nの硝化を速やかに達成できるプロセスが必要になる。NO₃-Nの毒性が低いことから本システムに組み込んでいない。

閉鎖循環式泡沫分離・硝化システムの構成：これまでに筆者らが開発してきた閉鎖循環式泡沫分離・硝化システム(以下、閉鎖循環式システムとする)は、欧米で開発されたシステムと基本的に異なる点は、泡沫分離法と硝化担体にある。飼育水槽(水量1m³)、空気自吸式エアレーター(400W)を設置した気液接触泡沫分離槽(0.6m³)、pH・水温調整槽(0.4m³)、および硝化槽(0.6m³)からなり、全水量は2.6m³である(図-1)。なお、今回の実験では、温暖な地域で水温調整を行わない養殖の可能性に関する知見を得るため、水温調整を行っていない。

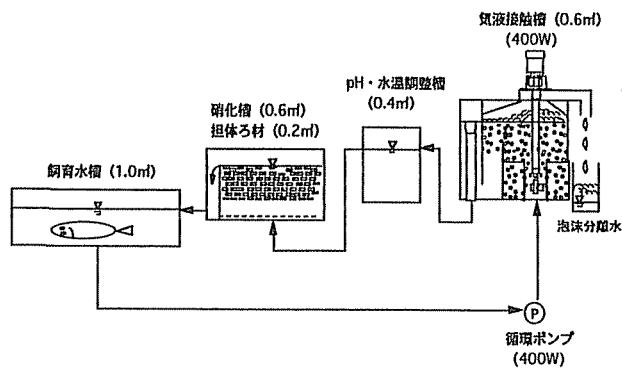


図-1 閉鎖循環式泡沫分離・硝化システム

泡沫分離法の原理：本研究で用いた閉鎖循環式システムの特徴の1つは、泡沫分離法である。その原理を簡単に述べる。魚類は常時体表面粘質物(タンパク質の一種)を分泌しており、この物質は界面活性を有し、懸濁物に吸着する。気泡を供給すると、懸濁物に吸着した体表面粘質物が気泡の気液界面に強く結合して浮上し、水面に集積する。そして、次々に供給される気泡によって水面に消泡し難い安定泡沫が形成される。この泡沫を分離することによって、飼育水から体表面粘質物と懸濁物が除去される。安定泡沫は放置すると泡沫分離水になる。体表面粘質物は水質を悪化させる溶解性有機物であり、これを効果的に利用し、同時に溶存酸素濃度を飽和にすることが本泡沫分離処理の特筆すべき特徴である。このような機能を発揮させるには強力な気液混合が必要で、いわゆるプロテインスキマーの機能を高効率に発揮させた方法といえる。

気液接触槽：気液接触槽には気泡を供給するため、空気自吸式エアレーターを設置してある。このエアレーターは、モーター直結でインペラーを回転させると負圧を生じて、空気を水中に引き込み、空気は水でせん断されて微細気泡を供給する。飼育水は下方から揚水され、槽内で泡沫分離処理される。生成された安定泡沫は気液接触槽の一ヶ所に設けた排気ダクトから自然に排除されるようにしてある。

硝化槽：硝化槽に充填した担体は、比重0.93の高密度ポリエチレン製の波状中空円筒(長さ1.45cm、外径1.41cm、内径1.08cm)で、充填容積は0.2m³とし、上向流ろ過を行った。したがって、担体はろ材の役割も果たし、中空内ろ材における沈殿効果を期待している。砂ろ過の場合のようにろ材を取り出して洗浄する必要はなく、単に水面に張り付いている中空ろ材を攪拌するだけで大部分の補足された懸濁物は分離され、沈殿する。養殖実験に先立って、塩化アンモニウム(NH₄Cl)を用いて、硝化菌の増殖と硝化能力を確認してから養殖試験を行った。

養殖試験：養殖試験は、本学農学部付属水産実験所において1996年12月19日～1997年3月21日の90日間にわたって、流水式と閉鎖循環式について行った。流量は両システムとも120ℓ/minとした。流水式の平均滞留時間は8分、閉鎖循環式では1回転時間が22分となり、平均滞留時間は、飼育水槽では8.5分、気液接触槽では5.1分、硝化槽では5.1分、pH・水温調整槽では3.4分となる。初期体重142gのヒラメ200尾(総重量28.4kg)を収容し、配合飼料を用いて90日間養殖した。対照区としてコンクリート水槽(水量1m³)に初期体重169gのヒラメを200尾(総重量33.8kg)収容し、広く行われている流水式養殖を行った。給餌は月曜から金曜の間は1日2回、土曜は1回の飽食給餌とした。流水式の飼育水には砂ろ過天然海水を用いた。閉鎖循環式の水補給は、蒸発分は水道水を、泡沫分離

水分は海水を補充した。pH調整には5%重炭酸ナトリウム溶液を用いた。

水質は、飼育水については、水温、塩分、pH、DO、濁度、DOC、TOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、ならびにTPを、泡沫分離水についてはTOC、TN、ならびにTPを分析した。実験終了日に硝化槽を洗浄し、その洗浄水についてTOC、TN、TPを分析して、C、N、Pの物質収支に用いた。

3. 結果と考察

(1)完全循環養殖の可能性

補給水量：循環型泡沫分離・硝化システムは、90日間全く飼育海水を交換することなしに養殖することができた。補充した全水道水量は850ℓ（全水量の3.3%で1日約9ℓ）であり、全泡沫分離水量はわずか256ℓ（全水量の0.1%で1日平均2.8ℓ）であった。

生残率：生残率は、循環型では93.5%が得られ、流水式システム(98%)とほとんど差がなく極めて高かった（図-2）。死亡原因は、給餌の際の魚同志の接触による傷のためであった。

成長：平均体重を比較すると、流水式では平均体重 $324 \pm 59 \text{ g}$ ($n=50$)（総重量64.2 kg）、循環型では $269 \pm 58 \text{ g}$ ($n=50$)（総重量50.3kg）であり（図-3）、流水式システムに近い収穫量を得ることができた。収容率は全水量に対して2%、飼育水槽容量に対して5%に相当する高密度である。流水式と閉鎖循環式での体重に幾らかの差が生じたが、この理由は、実験時期が冬季であり、循環型の方の水温が気温の変化に依存して低くなり、ヒラメの摂餌が抑制されたためと考えられた。流水式の水温と摂餌量の関係から、最低水温を 15°C 以上に維持する必要がある。（その後の実験で最低水温を 15°C 以上に維持すると体重増加がみられた。）なお、ヒラメの適水温は $23 \sim 25^\circ\text{C}$ とされている。

餌料転換効率：90日間の流水式と閉鎖循環式のヒラメの総増重量はそれぞれ30kgと22kgで総給餌料はそれぞれ27kgと19kgなので、餌料転換効率(=魚増重量/給餌料 $\times 100$)は、それぞれ111%と116%となり、閉鎖循環式の方が幾分良い成績であった。

閉鎖循環式システムの維持管理性：養殖期間中の管理項目は、①給餌、②蒸発分の水道水補給(週に1度)、③pH調整用5% NaHCO_3 溶液

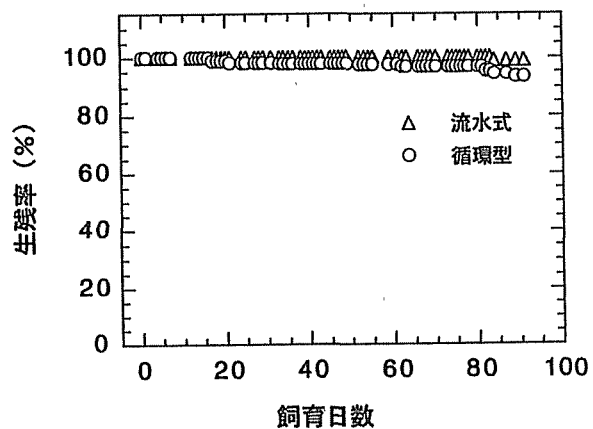


図-2 養殖試験におけるヒラメの生残率。

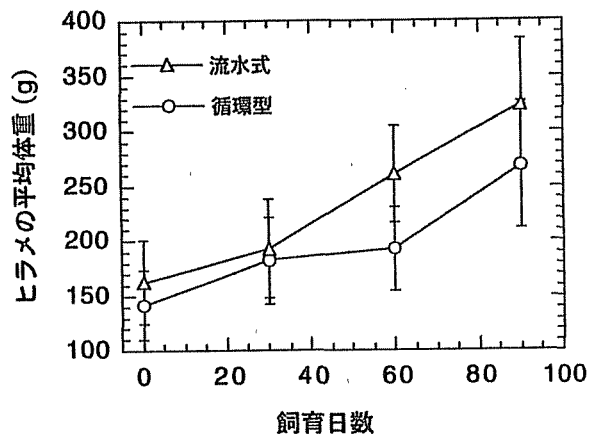


図-3 流水式と閉鎖循環式システムのヒラメの体重変化。(n=50, mean \pm SD)

の調整・補充(2週に1度)、および④泡沫分離水相当分の海水補充と塩分調整(月1度程度)のみである。したがって、本システムの維持管理は、従来法のろ材(砂)の洗浄や散気装置の閉塞防止などの作業を全く必要としないので、格段に容易であると考えられる。

(2) 養殖水の水質と物質収支

飼育水の水質: 水温は気温の変化に依存し、平均 $12.6 \pm 3.1^\circ\text{C}$ ($N=105$) で $7.5 \sim 20.9^\circ\text{C}$ の間で変化した。pHは平均 8.08 ± 0.14 ($n=18$, 範囲 $7.86 \sim 8.39$)のほぼ一定に保たれた。溶存酸素飽和度は90日間を通して $88 \sim 99\%$ の間で変化した、平均 $95.9 \pm 2.7\%$ ($N=17$) で推移した(図-4)。溶存酸素濃度では $8.0 \pm 0.7 \text{mg-O}_2/\ell$ であった。濁度はヒラメ収容前は 0.9TU であったが、90日間の平均は 3.1 ± 3.0 ($n=18$, 範囲 $0.4 \sim 11.5 \text{TU}$)であった。濁度の不定期の上昇は飼育水に蓄積してきた $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ と海水中の Ca^{2+} および Mg^{2+} との化合物の生成のためである。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度が増加すると一挙に化合物が生成され、沈殿して濁度が低下する。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度は約 $15 \text{mg}/\ell$ 以上には上昇しないことがわかった。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は $1 \text{mg}/\ell$ 以下であり、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ は給餌量の累積に伴って増加し、90日後には $133 \text{mg}/\ell$ に達した。TNは $\text{NO}_3^-\text{-N}$ とほぼ同様の变化を示した。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ のグラフの傾きから期間中の硝化速度は、 $0.037 \text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ と見積もられた(図-5)。

泡沫分離水の水質: 泡沫分離水の濁度、SS、TOC、T-N、およびT-Pの平均濃度($n=32$)はそれぞれ、 $326 \pm 202 \text{TU}$ 、 $1,250 \pm 535 \text{mg}/\ell$ 、 $574 \pm 143 \text{mg-C}/\ell$ 、 $258.5 \pm 61.8 \text{mg-N}/\ell$ 、及び $60.9 \pm 8.6 \text{mg-P}/\ell$ であった。泡沫分離水の水質は、飼育水のそれに比較して著しく、特に懸濁物の濃縮が著しい。さらに、泡沫分離水には強い魚臭があり、粘性も高く体表面粘質物のほか、さまざまな物質が回収されたと考えられる。全泡沫分離水量も、後述する物質収支からも、泡沫分離のCNP除去に対する寄与度は高くはない。しかし、泡沫分離が速やかに行われなければ、たちまち飼育水は白

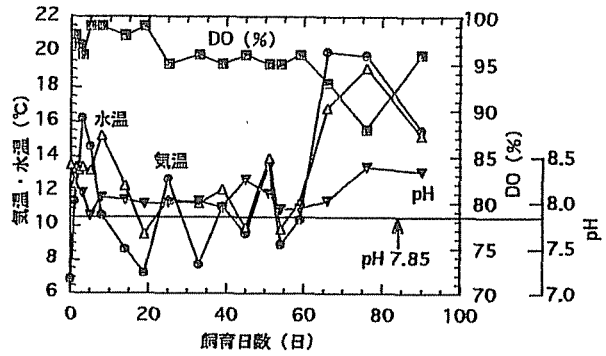


図-4 気温、水温、DO濃度、およびpHの経日変化。

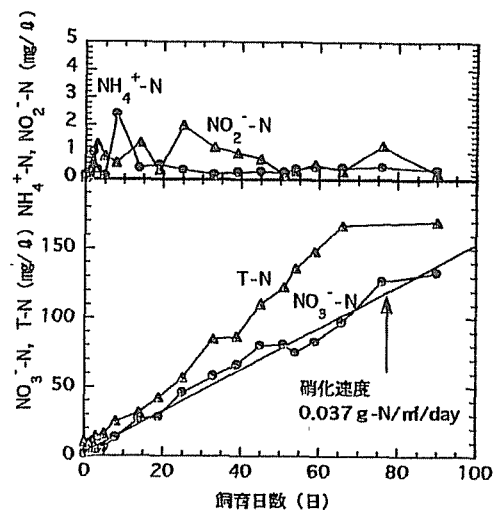


図-5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、およびT-Nの経日変化。

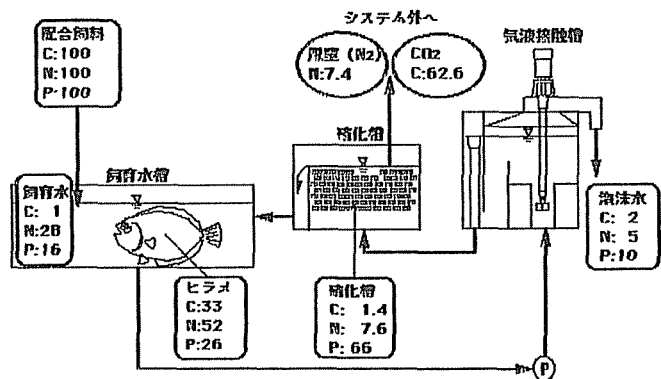


図-6 90日間の養殖における物質収支。

濁する。したがって、泡沫分離法は、C、N、Pの濃度と収支のみでは評価できない重要な役割を果たしていると考えている。

物質収支：図-6には90日間養殖における物質収支を示した。物質収支は次のように求めた。まず、全給餌量（18.7kg）中のCは8.5kg、Nは1.5kg、Pは0.2kgであり、それぞれを100%とする。Cはヒラメへの蓄積量が33%、飼育水に蓄積した量が1%、硝化槽に蓄積した量が1.4%、泡沫分離水として除去された量が2%、CO₂としてシステム外に出たと考えられる量が62.6%と見積もられた。Nは、ヒラメへの蓄積量が52%、飼育水に蓄積した量が28%、硝化槽に蓄積した量が7.6%、泡沫分離水として除去された量が5%、残りの7.4%が脱窒されてシステム外へ出たと考えられる。Pはヒラメに26%、硝化槽に66%、飼育水に16%蓄積し、泡沫分離水として10%が除去された。

システムの縮小・改良：以上の水質変化とそのレベルから、図-1のシステムの処理部分の割合を大幅に縮小できると考えられる。すなわち、図-1のシステムの全容量は2.6m³で飼育水容量は1m³、処理部分の容量は1.6m³で、処理部分のシステム全体に占める割合は、61.5%に達する。気液接触槽は1回転して酸素飽和度が平均95.9±2.7%（範囲88~99%）までしか低下していないのであるから、これを飽和のするためには容積は1/2の0.3m³（平均滞留時間で4.3分）で十分であろう。pH・水温調整槽容量は硝化槽流出部分で行うことができるので不要である。一方、硝化槽はアンモニアの硝化速度からみると、一般に0.3g/m²・ろ材・day⁴であり、本実験で得られた本システムの硝化速度が0.037g/m²・ろ材・dayであるから、ろ材所要量は1/8となるが、安全をみて1/2の0.1m³とする。このように考えると、処理部分の容積は1.6m³から0.4m³に縮小できると考えられる。0.4m³はシステム全体の28.6%（=0.4/1.4）になる。

4. まとめ

（1）完全循環養殖の可能性

- 1) 泡沫分離・硝化システムによって完全循環型養殖が可能であり、このシステムは流水式システムとほぼ同等の生産量が得られた。さらにランニングコストを考慮した場合においても、本システムは経済的に十分期待できる。

（2）養殖水の水質と物質収支

- 2) 水質は良好に保たれた。したがって、過大処理設備であり、縮小可能と考えられた。
- 3) 流水式の場合、環境に与える負荷量は、与える餌に含まれるCの67%、Nの48%、Pの74%と試算される。解放式から閉鎖循環式に転換することで環境に対する負荷を著しく削減できる。

今後の課題は、それぞれのプロセスの養魚の収容量または給餌量に対する最適設計条件を明らかにすることと考えている。

文献

- 1) 丸山俊朗, 鈴木祥広 (1998) (総説)養魚排水の現状と水域への負荷 - クローズッド化への展望-, 日本水産学会誌, Vol.64, No.2, pp.216-226.
- 2) 丸山俊朗, 奥積昌世, 佐藤順幸 (1996) 循環式泡沫分離・ろ過システムによるヒラメ蓄養水の浄化, 日本水産学会誌, Vol.62, 578-585.
- 3) J.van Rijn(1986) The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture - A review. *Aquaculture*, 139, pp. 181-201.
- 4) R. Knosche(1994) An effective biofilter type for eel culture in recirculating syastem, *Aquacultural Engineering*, 13, pp. 71-82.