

マダイを対象とした閉鎖系循環飼育 (1)

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2025-06-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山本, 義久, 鴨志田, 正晃, 岩本, 明雄 メールアドレス: 所属:
URL	https://fra.repo.nii.ac.jp/records/2014694

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.



マダイを対象とした閉鎖系循環飼育－I ～生物ろ過装置の機能向上について～

山本義久^{*1}・鴨志田正晃^{*2}・岩本明雄^{*1}

(^{*1} 屋島栽培漁業センター, ^{*2} 栽培漁業部)

我が国では、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近年取りざたされ、環境保全の立場から陸上養殖による閉鎖系循環飼育が注目されつつある。あわせて、環境負荷の軽減と疾病等の外的リスクを回避可能なシステムの構築が検討されている。我が国の閉鎖系循環飼育システムに関する研究は1950～60年代にかけて主に水族館を中心に行われ、ろ過槽の機能¹⁻⁵⁾や浄化微生物の生理特性^{6,7)}等について多くの知見が集積された。また世界的にみれば1970年代に欧米における養殖分野で盛んに実証され、様々なシステム開発がなされている。しかし、欧米での閉鎖系循環飼育の概念では、10～20% / 日程度の換水率でも閉鎖系循環飼育の範疇に入るため、閉鎖度の高い飼育システムについては十分な検討がなされていない⁸⁾。疾病等の外的リスクを徹底して削減するためには極力新水を添加しない方法が必要であり、近年の魚類種苗生産や養殖分野でのウイルスを主体とした疾病の脅威から考えると、より徹底した管理の行えるシステムの構築が必要とされている。

屋島栽培漁業センター（以下、当センター）では、2000年よりマダイを対象とした閉鎖系循環飼育システムに関する技術開発を実施し、現在は5 kℓ水槽規模で1日の換水率が1%以下で全長30mmサイズまでの種苗生産が可能となっている。しかし、今後閉鎖度が高く、かつ窒素負荷が高い高密度飼育等に対応可能な閉鎖系循環飼育システムを構築するためには、高い硝化能力機能が必要である。本技術開発では、マダイの閉鎖系循環飼育システムにおいて、生物ろ過装置の硝化能力の向上を目的に、ろ材の材質、ろ過水の回転率、水温、および酸素付加について検討した。

材 料 と 方 法

閉鎖系循環システムの構成 飼育水槽には5 kℓ FRP水槽（実容量4 kℓ）を使用した。当センターの閉鎖系循環飼育システムは、泡沫分離装置、生物ろ過装置、および紫外線殺菌装置からなる。泡沫分離装置では飼育水中の懸濁物の除去、生物ろ過装置ではアンモニア態窒素および亜硝酸態窒素の硝化、紫外線殺菌装置では細菌数の低下を目的としている（図1）。飼

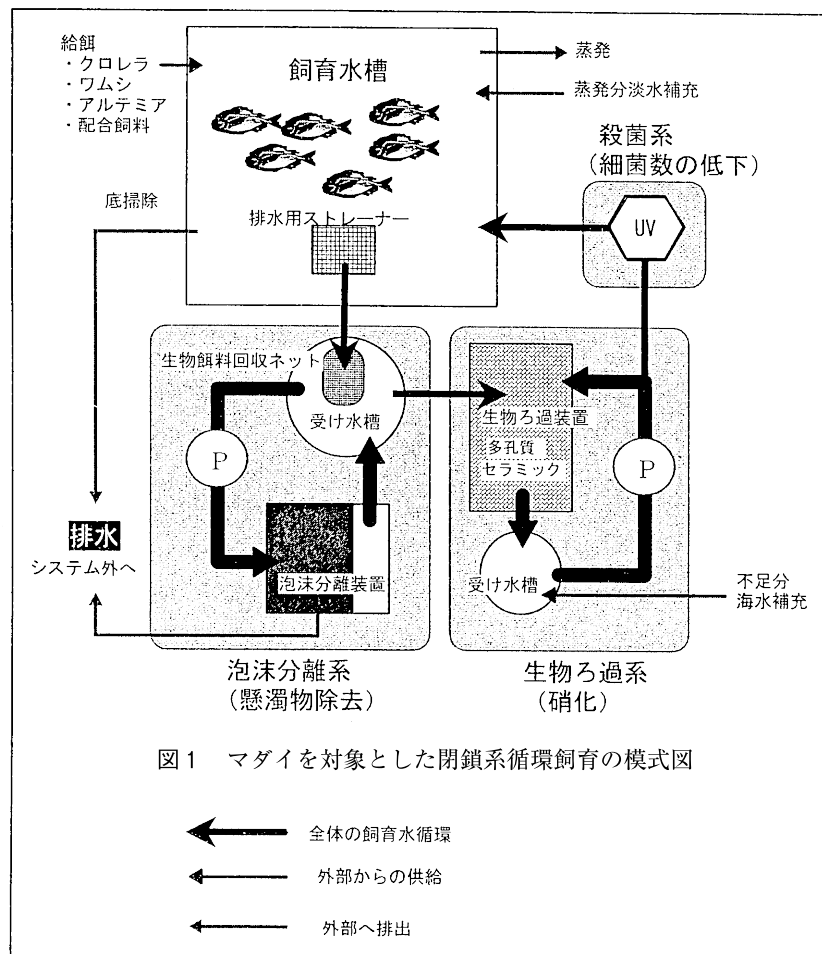
育水は、飼育水槽からの排水を生物餌料の回収を行う受け水槽に貯水し、自吸式ポンプ(0.2kw:寺田ポンプ)を介して泡沫分離装置、生物ろ過装置および紫外線殺菌装置を経由して飼育水槽に戻る経路で循環させた。泡沫分離装置は、カーバエアレーター（自吸式気液混合装置）を備えたKA式泡沫分離装置（容量250ℓ:TAS環境エンジニアリング）を用い、生物ろ過装置は400ℓのFRP水槽に200ℓ容量のろ材を収容し、上方向から下方へろ過水を環流させる浸漬ろ床方式とした。泡沫分離装置および生物ろ過装置内では、自吸式ポンプで飼育水を循環させた。紫外線殺菌装置はフロンライザー 2DL（千代田工販）を使用した。

3 態窒素濃度の測定とアンモニア態窒素の硝化速度測定 アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素および硝酸態窒素の濃度は、DR/2000（HACH）によりそれぞれサリチル酸法、ジアゾ化法、カドミウム還元法で測定した。

アンモニア態窒素の硝化速度の測定方法は、閉鎖系循環飼育システムに塩化アンモニウム20gを添加後、経時的にアンモニア態窒素濃度を測定した値から、アンモニア態窒素濃度(Y:mg/ℓ)と経過時間(X:時間)の関係を求め、硝化速度は回帰式の傾き(a)の絶対値とした。

ろ材の材質 ろ材はソフトセラミック（多孔質セラミック:フィルテック）、ファビオス（ポリエステル繊維担体:ユニチカ）、サランロック（塩化ビニデリン繊維:旭化成）およびライトホーム（ガラス製バيوフィルター:ライトウエーブ研究所）の4種類を使用した。ろ過槽にはFRP水槽（実水量400ℓ）を用い、各ろ材30ℓと硝化細菌の元種用に十分に熟成させたソフトセラミック10ℓを収容した。海水にはろ過海水250ℓを用い、小型水中ポンプを用いて100回転/日(20ℓ/分)の割合で循環させた。硝化細菌着床のための栄養源として、塩化アンモニウムを0.8～4g/日添加した。熟成1カ月後と3カ月後に元種用のろ材のみを除去し、硝化能力試験として塩化アンモニウム50～60gを添加後、3日目のアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素および硝酸態窒素の濃度を測定し、ろ材の違いによる硝化能力を比較した。

ろ過水の回転率 ろ材（ソフトセラミック）を200



ℓ 収容したろ過槽（実容量350 ℓ）を用い、循環ポンプの流量を調節することで回転率を10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400回転/日に変えた試験を行った。試験は、ろ材の熟成度合いが異なる3水槽で実施し、塩化アンモニウム20gを添加して10～12時間後までのアンモニア態窒素の硝化速度を測定した。また、それぞれ回転率と硝化速度の関係の回帰式を求めた。

ろ過水の水温 サーモスタットと1kw ヒーターを用いて、ろ過水の水温を14, 17, 20, 23, 26℃とする5段階を設定した。試験では、塩化アンモニウム20gを添加し、10～12時間後までのアンモニア態窒素の硝化速度を測定した。ろ過水の回転率は100回転/日とし、同一水槽で試験を実施した。その他の条件は、ろ過水の回転率の試験と同様とした。また、それぞれ回転率と硝化速度の関係の回帰式を求めた。

ろ過槽への酸素付加 ろ過槽への酸素付加方法は、純酸素を循環経路内のパイプに送り込み循環水と混合させることで、酸素飽和度が180～190%になるように調整した試験区と、酸素付加を行わない対照区の2試験区を設けた。試験では、塩化アンモニウム20gを

添加して開始し、10～12時間後までのアンモニア態窒素の硝化速度を測定した。ろ過槽の回転率は100回転/日、水温は20℃とし、同一水槽で試験を実施した。その他の条件設定はろ過水の回転率の試験と同様とした。

結 果

ろ材の材質 試験結果の概要を表1および表2に示した。アンモニア態窒素の硝化能力は、熟成1ヵ月後の試験ではソフトセラミックが8.0mg/ℓ/時と最も優れた硝化能力を示した。熟成3ヵ月後の試験では、ソフトセラミックとライトホームはそれぞれ9.0mg/ℓ/時、9.1mg/ℓ/時と差はなかった。一方、ファビオスとサランロックの硝化能力は前述の2種より劣り、それぞれ熟成1ヵ月後の試験では2.8mg/ℓ/時と4.2mg/ℓ/時、熟成3ヵ月後の試験では5.0mg/ℓ/時と5.4mg/ℓ/時であった。

試験開始3日目の亜硝酸態窒素濃度は、1ヵ月間熟成させたろ材ではソフトセラミックが39.0mg/ℓ、

表1 1カ月間熟成した各種ろ材の硝化能力に関する試験結果の概要

ろ材名	実水量 (ℓ)	ろ材容量 (ℓ)	アンモニア態窒素濃度(mg/ℓ)		アンモニア態窒素 の硝化能力* (mg/ℓ/h)	亜硝酸態窒素(mg/ℓ)	硝酸態窒素(mg/ℓ)
			試験開始時	試験開始3日後		試験開始3日後	
ソフトセラミック	250	30	70.0	1.0	8.0	39.0	41.6
ライトホーム	250	30	64.0	3.0	7.1	33.0	44.8
ファビオス	250	30	66.0	42.0	2.8	7.8	17.4
サランロック	250	28	68.0	34.0	4.2	9.6	17.4

* アンモニア態窒素の硝化能力 = 試験開始時と終了時のアンモニア態窒素濃度の差 / 経過時間 × 水量 / ろ材量

表2 3カ月間熟成した各種ろ材の硝化能力に関する試験結果の概要

ろ材名	実水量 (ℓ)	ろ材容量 (ℓ)	アンモニア態窒素濃度(mg/ℓ)		アンモニア態窒素 の硝化能力* (mg/ℓ/h)	亜硝酸態窒素(mg/ℓ)	硝酸態窒素(mg/ℓ)
			試験開始時	試験開始3日後		試験開始3日後	
ソフトセラミック	250	30	80.0	2.0	9.0	1.7	63.5
ライトホーム	250	30	80.0	1.3	9.1	3.3	64.0
ファビオス	250	30	79.8	36.2	5.0	5.3	27.5
サランロック	250	28	79.9	36.1	5.4	4.4	28.0

* アンモニア態窒素の硝化能力 = 試験開始時と終了時のアンモニア態窒素濃度の差 / 経過時間 × 水量 / ろ材量

ライトホームが33.0mg/ℓと高濃度に蓄積し、硝酸態窒素への移行が十分進んでいなかった。しかし、3カ月間熟成させたろ材ではソフトセラミックが1.7mg/ℓ/h、ライトホームが3.3mg/ℓとなった。また、アンモニア態窒素濃度もそれぞれ2.0mg/ℓ、1.3mg/ℓと低くなったが、硝酸態窒素は63.5mg/ℓ/時、64.0mg/ℓと高濃度であった。両ろ材とも添加したアンモニア態窒素はほぼ硝化されて硝酸に移行したことから、十分に熟成したと考えられた。ファビオスとサランロックでは、3カ月間の熟成でも試験開始3日目のアンモニア態窒素濃度はともに約36mg/ℓと高かった。今回の試験で、ソフトセラミックとライトホームはほぼ同等の硝化能力を示したが、同容量で重量的に軽いソフトセラミックがろ材として適正であると判断した。

ろ過水の回転率 ろ過水の回転率ごとのアンモニア

態窒素濃度と経過時間の関係を表3に示した。それぞれの相関係数は0.93以上と高く、直線回帰していると考えられた。上記の回帰式の傾きaの絶対値をアンモニア態窒素の硝化速度とし、ろ過水の回転率との関係から算出した関係式は以下のように対数関係を示した(図2)。

水槽1 : $Y=0.314\text{Ln}(X)-0.272$ ($R^2=0.936$)

水槽2 : $Y=0.233\text{Ln}(X)-0.272$ ($R^2=0.970$)

水槽3 : $Y=0.196\text{Ln}(X)-0.030$ ($R^2=0.937$)

以上の様に、熟成度合いが異なる3水槽で、ろ過水の回転率の増加に伴いアンモニア態窒素の硝化速度は向上し、100回転/日以下では急激に硝化能力が低下する傾向が示された。

ろ過水の水温 ろ過水の水温ごとのアンモニア態窒素濃度と経過時間の関係を表4に示した。それぞれの相関係数は0.9以上と高く、直線回帰していると考え

表3 ろ過水の回転率とアンモニア態窒素の硝化速度の関係式

回転率 (回転/日)	水槽1			水槽2			水槽3		
	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
10	-0.50	19.35	0.970	-0.49	18.79	0.981	-0.52	18.74	0.934
25	-0.65	20.64	0.988	-0.77	20.11	0.953	-0.72	19.82	0.959
50	-0.58	19.16	0.936	-0.79	18.56	0.970	-0.75	17.53	0.965
75	-0.82	20.23	0.954	-0.92	19.01	0.963	-1.12	19.02	0.980
100	-0.78	21.00	0.983	-1.02	19.05	0.959	-1.32	20.10	0.960
200	-0.98	17.00	0.950	-1.18	19.06	0.991	-1.34	18.20	0.963
300	-1.15	16.98	0.992	-1.30	17.75	0.993	-1.55	16.41	0.978
400	-1.17	18.32	0.972	-1.40	16.70	0.998	-1.61	16.40	0.971

Y (アンモニア態窒素濃度) = aX (経過時間) + b, (R²: 相関係数)

られた。上記の回帰式の傾き a の絶対値をアンモニア態窒素の硝化速度とし、ろ過水の回転率との関係から算出した関係式は以下のように指数関係を示した（図3）。

$$Y = 0.2992e^{0.0528X} \quad (R^2 = 0.990)$$

ろ過水の水温が14～26℃の範囲では、水温が高いほどアンモニア態窒素の硝化能力は向上する傾向が示された。

ろ過水への酸素付加 ろ過槽への酸素付加の有無に

よるアンモニア態窒素濃度と経過時間の関係は、以下の関係式で示された（図4）。

$$\text{酸素付加有り：} Y = -0.82X + 21.49 \quad (R^2 = 0.992)$$

$$\text{酸素付加なし：} Y = -0.80X + 20.50 \quad (R^2 = 0.999)$$

上記の回帰式の傾き a の絶対値をアンモニア態窒素の硝化速度として比較した結果、酸素付加の有無で硝化速度に差はなく、アンモニア態窒素の硝化能力にほとんど影響は認められなかった。

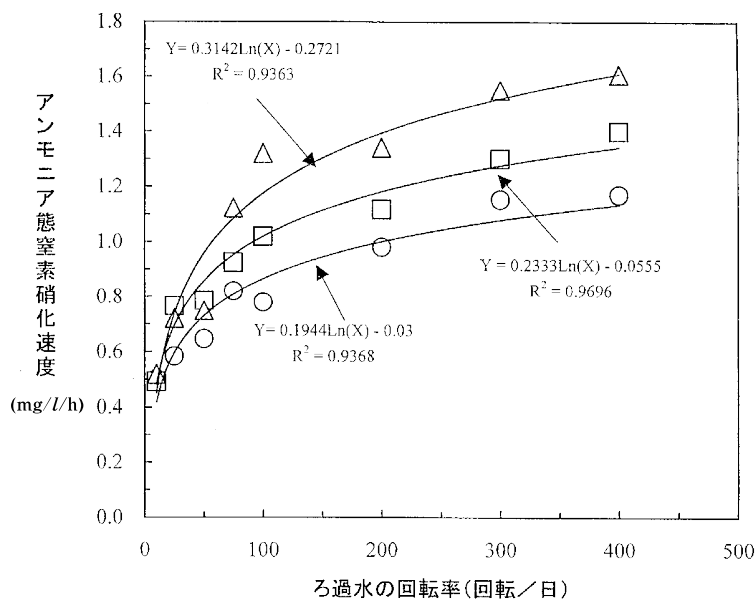


図2 ろ過水の回転率とアンモニア態窒素の硝化速度の関係
○水槽1 □水槽2 △水槽3

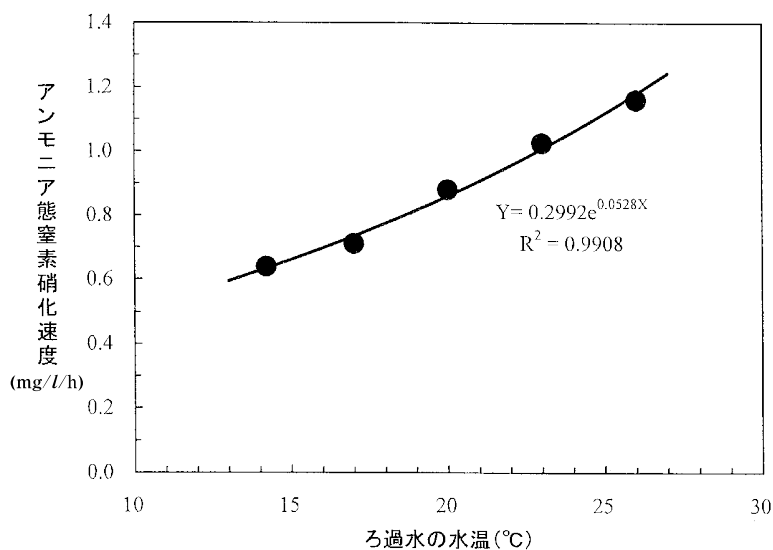


図3 ろ過水の水温とアンモニア態窒素の硝化速度の関係

表4 ろ過水の水温とアンモニア態窒素の硝化速度の関係式一覧

ろ過水水温 (℃)	関係式係数		
	a	b	R ²
14	-0.64	19.69	0.980
17	-0.71	20.25	0.905
20	-0.80	20.50	0.999
23	-1.03	19.90	0.994
26	-1.16	19.30	0.956

Y (アンモニア態窒素濃度) = aX (経過時間) + b, (R²: 相関係数)

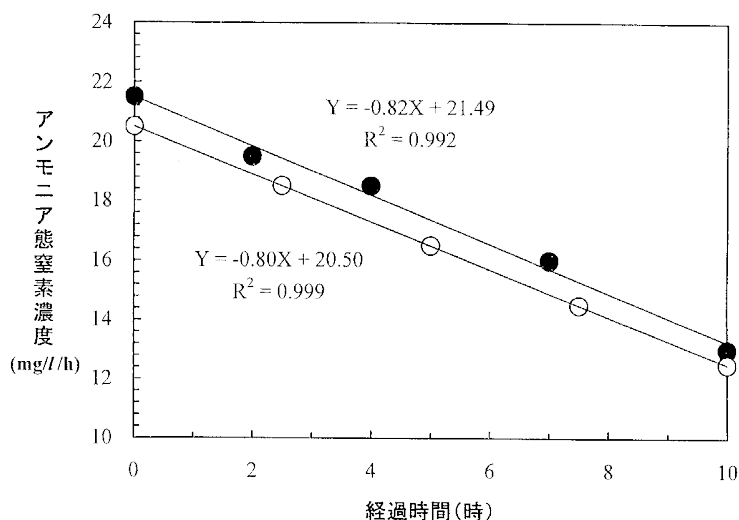


図3 ろ過槽への酸素付加の有無による硝化速度の比較

●酸素有り ○酸素なし

考 察

ろ材の材質 生物ろ過槽の機能は、毒性の強いアンモニア態窒素と亜硝酸態窒素を低濃度では毒性がない硝酸態窒素に硝化させることにある。硝化作用は、ろ材や装置の壁等に定着した独立栄養細菌である硝化細菌が行っており、硝化作用はアンモニアから亜硝酸への酸化と、亜硝酸から硝酸への酸化の2つの過程からなる。それぞれの酸化作用で主要となる細菌群は異なることが知られており⁹⁾、概ね前者の作用をする細菌が卓越した後に後者の作用をする細菌が増殖する。今回行ったろ材の材質選定の試験で、1カ月間熟成させたろ材の硝化能力では、アンモニアから亜硝酸への酸化作用は進んでいたが、亜硝酸から硝酸への酸化は進んでおらず、1カ月の熟成期間では後者の作用をする細菌群の増殖には短いと考えられた。しかし、ろ材を3カ月間熟成させることで亜硝酸態窒素の蓄積は少なくなり、亜硝酸から硝酸への酸化作用を持つ細菌群も増殖したと考えられた。ろ材の熟成期間は2～3カ月程度と報告¹⁰⁾されており、本試験でも同様の結果が得られた。

現在、当センターではろ材の熟成用の水槽を設けて、周年塩化アンモニウムを適宜添加し、常時熟成されたろ材を確保している。また、今回の試験では、ソフトセラミックが硝化能力、重量等の点からろ材として適していると判断したが、さらに、硝化細菌を早く効率的に定着させ、かつ安価であるろ材についての検討を進め、種苗生産に適したろ材の選定を行うことが必要である。

硝化細菌の着床方法としては、今回行った水界に存在する硝化細菌を利用する方法の他に、効率的な硝化作用がある細菌を培養し、これを積極的に添加してろ材に定着させる方法、および培養した硝化細菌を高分子の透過性のビーズ等に包括する微生物固定法等⁸⁾がある。微生物固定法として、植本ら¹¹⁾は、海洋性硝化細菌の固定化利用法で、通常の生物膜法の約6倍の処理能力を持つ技術を開発している。本技術開発では、自然に定着・増殖した硝化細菌を利用したが、今後は効率的な硝化作用を持つ硝化細菌の分離、培養と固定化技術の応用が必要である。

ろ過水の水温と回転率 ろ過槽の機能向上の方法として、ろ過水の水温と回転率を上昇させることに効果

が認められた。水温に関する既存の知見¹²⁾と同様に、水温が高いほど硝化能力は向上した。海洋性硝化細菌の増殖好適水温は30～35℃とされ¹³⁾、今回の試験設定の最高水温(26℃)よりも高い。マダイの種苗生産では、飼育に適正な水温は16～23℃程度¹⁴⁾であるため、ろ過水槽の水温を30℃以上にすると飼育水槽の水温も上昇するため冷却装置が必要となり経費的に問題となる。このため、ろ過水槽の設定水温は25℃前後が適正と考えられた。

閉鎖系循環飼育システムの特徴は、ポンプで生物ろ過槽内の飼育水を高回転率で循環させ、その一部を紫外線殺菌装置に通してから飼育水槽に戻す方法を用いており、硝化作用を効率的に行い、生物ろ過槽の省スペース化を図ることを目的としている。この方法は、既存の閉鎖系循環飼育システムではほとんど導入されてはならず、一般的には飼育水の全体の循環率で生物ろ過槽内の水の出入りが行われている。ろ材の硝化能力と循環量について、平山³⁾と田中・青海¹⁵⁾が今回と同様の結果を報告している。一方、閉鎖系循環システムは種苗生産を目的としているため、飼育水全体の循環率を過度に上げると生物餌料が飼育水槽から流出し、仔稚魚の成長、生残に影響すると考えられる。ろ過槽内を再循環させる方法は、生物餌料の密度を維持しつつ、ろ過槽の硝化能力を向上させる手法として有効である。さらに、今回の結果からろ過水の回転率を上げ、かつ経費の軽減を考える上では、ポンプ送水以外にエアリフトの併用も検討の価値がある。

閉鎖系循環飼育システムの機能向上の試算 今回の試験で、ろ材はソフトセラミックが優れ、最も硝化能力が高かったろ過水の条件は水温26℃、回転率400回転/日であった。それぞれの最適条件で試算した硝化能力は、現生物ろ過槽の種苗生産時の条件(水温20℃前後、回転率100回転/日)と比較して、水温では1.36倍、回転率では平均1.37倍となった。さらに、両条件を組み合わせた場合の硝化能力は、現状の設定条件の1.86倍となり、効率的に硝化能力の向上が図れることが示された。

硝化能力向上には、ろ材量の増加が最も効果的な方法と考えられる。当センターの閉鎖系循環飼育システムは、飼育水槽の容量4,000ℓに対してろ材量は5%程度の200ℓである。この値は既知の他のシステム¹⁶⁾と比較すると極めて少なく、ろ材量を拡充する余地は十分にある。当システムでろ材量を現在の2倍にした場合、上述したろ過水の最適水温と回転率の条件で試算すると、現生物ろ過槽の硝化能力は3.72倍まで向上すると考えられた。

当システムでは、生物ろ過の過程の前に懸濁物除去機能を有する泡沫分離装置を設置している。このた

め、懸濁物による生物ろ過槽の負担が軽減され、生物ろ過槽の容量が少なくても効果的に硝化作用が行われていると考えられる。泡沫分離装置の効果は、ヒラメ¹⁷⁾やウナギ¹⁸⁾の長期高密度飼育試験等で実証されているが、当センターのシステムでもろ材の閉塞原因となるクロレラの除去や細菌数の減少、アンモニア態窒素の物理的酸化作用などが明らかにされつつあり、多機能を有する泡沫分離装置と生物ろ過槽の組み合わせは効果的であると考えられる。一般的な種苗生産対象魚種では、生産期間は長くても3カ月程度であり、窒素負荷量も比較的少ないことから当システムによる種苗生産は十分可能である。今後は、高い収容密度での種苗生産や放流サイズまでの一貫飼育等の窒素負荷が高いと考えられる飼育への対応を目的に、今回の試験で得られた硝化能力向上の成果を組み入れた閉鎖系循環システムの再構築に取り組む。

文 献

- 1) 佐伯有常(1958)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, 23, 684-695.
- 2) 平山和次(1965)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, 31, 977-982.
- 3) 平山和次(1965)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, 31, 983-990.
- 4) 平山和次(1966)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, 32, 11-19.
- 5) 平山和次(1966)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, 32, 20-27.
- 6) 河合 章・吉田陽一・木俣正夫(1964)循環濾過飼育水槽の微生物化学的研究－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, 30, 55-62.
- 7) 河合 章・吉田陽一・木俣正夫(1965)循環濾過飼育水槽の微生物化学的研究－Ⅱ. 濾過砂の硝化作用について. 日水誌, 31, 65-71.
- 8) 菊池弘太郎(1999)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, 64-76.

- 9) 菊池弘太郎, 武田重信 (1999) 循環濾過養魚における水質変化と物質収支. 養殖, **4**, 42-47.
- 10) 菊池弘太郎 (1998) 循環濾過養魚のための水処理技術. 日水誌, **64**, 227-234.
- 11) 植本弘明, 渡辺良朗, 菊池弘太郎 (1994) 高能率魚類生産のための水質浄化技術の開発, 10. ヒラメ飼育への固定化微生物の適用. 電力中央研究所報告, U9304, p.22.
- 12) Brune, D. E. and D.C.Gunther (1981) The design of a new high rate nitrification filter for aquaculture reuse. *J. World Maricult. Soc.*, **12**, 20-31.
- 13) 菊池弘太郎 (2000) 生物ろ過のメカニズムとろ材の活用法, 養魚家のためのろ材のやさしい基礎知識. 養殖, **9**, 84-89.
- 14) 山口正男 (1978) タイ養殖の基礎と実際. 恒星社 恒星閣, 東京, 1-414.
- 15) 田中直幸, 青海忠久 (2003) 閉鎖循環飼育用濾材の硝化能力における枯草菌導入の効果と水温・pH など環境要因の硝化能力への影響. 日本水産増殖学会第2回大会講演要旨集, 水産増殖, **51**, 477.
- 16) 鈴木祥広, 丸山俊朗 (2001) ゼロエミッション型養殖システムとは. 21世紀の養殖施設, 01年度養魚施設ガイド, 養殖臨時増刊号, **39**, 48-53.
- 17) 丸山俊朗, 鈴木祥広, 佐藤大輔, 神田 猛, 道下 保 (1999) 泡沫分離・硝化システムによるヒラメの閉鎖循環式高密度飼育. 日水誌, **65**, 818-825.
- 18) 鈴木祥広, 丸山俊朗, 竹本 進, 小田リサ (1999) 泡沫分離・硝化脱窒システムによるウナギの閉鎖循環式高密度飼育. 水環境学会誌, **22**, 896-903.