

## 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

丸山俊朗, 鈴木祥広, 佐藤大輔  
神田 猛, 道下 保

(1998年8月10日受付)

### Performance of a Closed Recirculating System with Foam-separation and Nitrification Units for Intensive Culture of Japanese Flounder

Toshiroh Maruyama,\*<sup>1</sup> Yoshihiro Suzuki,\*<sup>1</sup> Daisuke Sato,\*<sup>1</sup>  
Takeshi Kanda,\*<sup>2</sup> and Tamotsu Michishita\*<sup>2</sup>

Rearing experiment of Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* was conducted with two different culture systems, a closed recirculating system having a foam-separation unit and a flow-through system in which natural seawater was continuously supplied. The closed recirculating system consisted of a fish tank of 1 m<sup>3</sup> in water volume, foam-separation and nitrification units, pH and temperature controlling units, and a circulation pump. A key feature of this system is the foam-separation unit, which is equipped with an air inhalation-type aerator that vigorously injects numerous fine bubbles into the rearing water. Fish were fed commercial pellet diet for 90 days.

The survival rate of fish was 93.5%, and the gross weight of fish increased from 28.4 kg to 50.0 kg during the experiment in the closed recirculating system without the effluent. In the flow-through system, the survival rate was 98%, and the weight increased from 33.8 kg to 64.1 kg. Based on these results, intensive aquaculture can be achieved with the closed recirculating system.

キーワード：閉鎖循環式，流水式，飼育システム，泡沫分離，硝化，固液分離，高密度飼育，ヒラメ

わが国の沿岸環境は、長期的にみると改善の傾向にあるものの、内湾、内海などの閉鎖性水域における環境基準の達成率はここ10年以上横這いであり、改善の兆しは見られない。この原因の一つとして、陸水からの汚濁負荷の他に、養殖生産に伴う汚濁負荷が挙げられる。<sup>1,2)</sup> わが国の給餌を伴う海面養殖（ハマチ *Seriola quinqueradiata*，タイ *Pagrus major*，マアジ *Trachurus japonicus*，その他）の生産量は、年間256,000トン（1996年<sup>3)</sup>）である。コイ *Cyprinus carpio* の養殖場からの負荷量は、配合飼料を与えた場合、養殖魚1トン当たり人口当量で約60人分（窒素NとリンPではそれぞれ64人と61人）に相当する。<sup>2)</sup> この値を海産魚に当てはめると、約1,500万人分となる。坂本<sup>4)</sup>のハマチ養殖場の試算例（生餌給餌）では、この1.9倍に相当する。いずれにしても、相当量のNやPが養殖場から海に負荷さ

れ続けていると考えざるを得ない。環境へのダメージを最小限度にとどめた状態で、タンパク源である魚介類を生産・供給していくためには、新しい持続可能な養殖形態に移行しなければならない。

現在の給餌養殖の主な形態は、海面で行う網生け簀養殖である。近年、飼育水を処理しつつ循環し、その一部を換水する循環式の養殖システムが開発され、ヒラメ *Paralichthys olivaceus* などの高級魚が陸上で養殖できるようになってきているが、その規模は小さい。網生け簀の場合では魚の排泄物と残餌が直接的に、また、循環式の陸上養殖の場合には換水時に高い濃度の有機物と栄養塩を含んだ養殖排水がほとんど未処理のまま環境に排出されている。最近、北西ヨーロッパや北アメリカにおいて、主に淡水魚を対象とした循環式の高密度養殖システム（Recirculating system for intensive aquaculture）

\*<sup>1</sup> 宮崎大学工学部土木環境工学科（Department of Civil and Environmental Engineering, Miyazaki University, Gakuenkibanadai, Miyazaki 889-2192, Japan）.

\*<sup>2</sup> 宮崎大学農学部附属水産実験所（Fisheries Research Laboratory, Miyazaki University, Akamizu, Nobeoka 889-0517, Japan）.

の技術が確立され、<sup>5-8)</sup> エネルギー効率や生産性の著しく高い養殖が可能となってきた。1日の換水率数%で養殖されるのが一般的であるが、負荷削減に主眼をおいた養殖システムは極めて少ないため、負荷削減量は著しく低い。養殖排水を全く出さずに、これまで以上の収穫量を上げることができる養殖システムが開発できれば、汚濁負荷量の削減に著しく寄与でき、さらには富栄養化の進んだ沿岸海域の環境修復にも寄与できると考えられる。このような背景から、最近、飼育水を高度に浄化し、繰り返し使用する「閉鎖循環式」の「高密度養殖」が可能なシステム (Closed recirculating system for intensive aquaculture) の研究・開発が注目されてきている。<sup>9)</sup>

わが国における閉鎖循環式の高産魚類飼育システムに関する研究は古く、1950~1960年代にかけて佐伯、<sup>10)</sup> 河合ら、<sup>11,12)</sup> ならびに平山<sup>13-16)</sup>によって先駆的知見が集積されており、今日の水族館などにおける魚類飼育システムの基礎を築いてきた (当時は、「循環ろ過式」と称されたが、飼育水を排出せずに処理しつつ循環する方式であるから閉鎖循環式に属する)。しかし、高密度養殖を目的とする「閉鎖循環式高密度養殖システム」に関する研究は、国内外において現在も極めて少ない。わが国においては、ヒラメを対象魚として、特殊ろ材を用いたろ過方式の処理プロセスを組み込んだ閉鎖循環式システムに関する研究・開発<sup>17-19)</sup>が進められているものの、その他の閉鎖循環式システムに関する事例は見あたらない。

一方、丸山らは、従来用いられてきた水処理法とは全

く異なる泡沫分離装置を開発し、この泡沫分離装置と硝化槽を組み合わせた閉鎖循環式のシステムを構築し、活魚輸送や畜養に極めて効果的に利用できることを明らかにした。<sup>20,21)</sup> このシステムは活魚輸送、魚介類畜養施設、あるいは水族館などで採用され、好結果を得ている。したがって、このシステムによる閉鎖循環式の高密度養殖の実現に期待がもたれる。しかし、無給餌の畜養とは異なり、給餌を伴う養殖の場合にはシステムへの負荷量が著しく大きく、不明な点が多い。また、従来の流水式養殖と閉鎖循環式養殖を平行して実験し、比較検討した事例は見あたらない。閉鎖循環式の養殖システムの開発に向けて、泡沫分離・硝化システムの高密度養殖への可能性、および流水式養殖と閉鎖循環式養殖の比較に関する知見が必要である。

そこで、本研究では海産魚ヒラメを対象魚とし、従来の流水式システムと泡沫分離・硝化システムによる飼育実験を行い、海産魚類の閉鎖循環式の高密度養殖の可能性を明らかにすることを目的とした。

#### システム、材料、および実験方法

**閉鎖循環式泡沫分離・硝化システム** 閉鎖循環式泡沫分離・硝化システム (以降、閉鎖循環式システムとする) は、飼育水槽、空気自給式エアレーター (400 W) を設置した気液接触・泡沫分離槽 (以降、気液接触槽とする)、pH・水温調整槽、および硝化・固液分離槽 (以降、硝化槽とする) から成り、全水量は2.6 m<sup>3</sup>である (Fig. 1)。飼育水槽の水量は1 m<sup>3</sup>とし、飼育海水には砂ろ過海水を用い、流量を120 l/minとしたので、一循

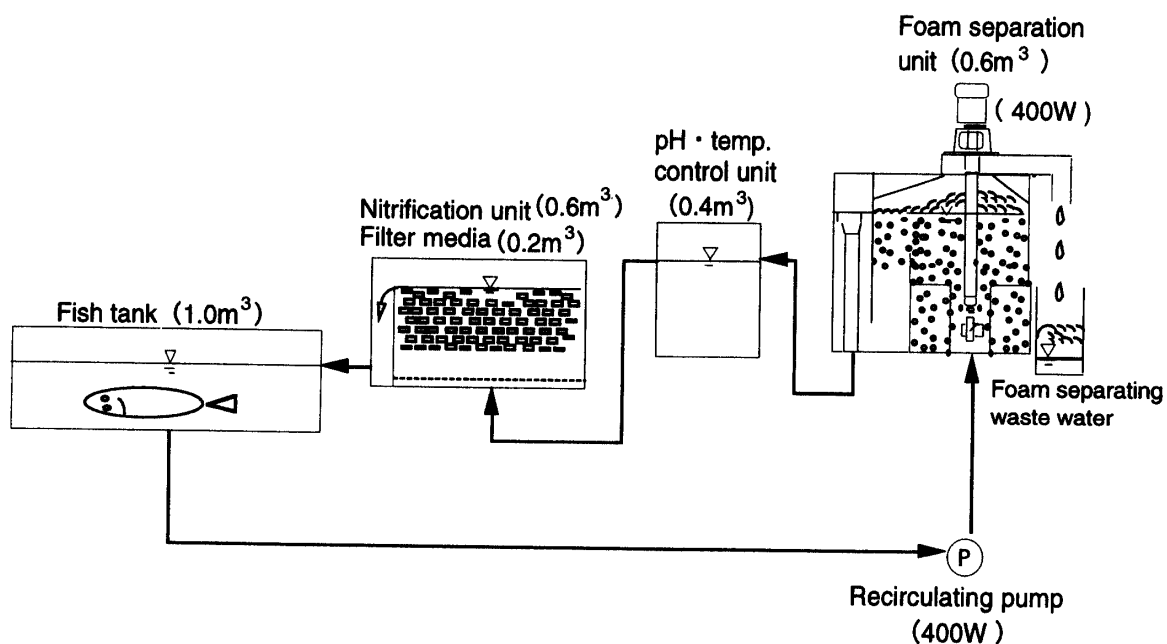


Fig. 1. Schematic diagram (not to scale) of the closed recirculating system with foam-separation and nitrification units.

環時間は 22 分になる。飼育水槽の水深を 0.4 m としたので、水表面積は 2.5 m<sup>2</sup> である。飼育水は、循環ポンプで気液接触槽に送られ、ここで溶存酸素濃度（以降 DO とする）は飽和に達し、同時に懸濁物などが泡沫分離処理される。続いて、pH・水温調整槽を通り、上向流の硝化槽でアンモニア性窒素（以降 NH<sub>4</sub>-N とする）が硝化され同時に懸濁物が除去されて、処理水は再び飼育水槽に返送される。飼育水の pH は、pH 自動制御装置（イワキ社製、EH/W-PH、薬液貯留槽 50 l）を用いて 5% 炭酸水素ナトリウム溶液（和光純薬、特級）を滴下し、下限 pH を 7.85 に設定した。また、このシステムでは、泡沫の分離による海水の減少量を海水で、蒸発による水分の減少量を水道水で調節したので、ほぼ完全な閉鎖循環式システムと言える。設置場所は、屋外の屋根付き実験施設内とした。

**気液接触槽** 気液接触槽には、気泡を供給するために、空気自給式エアレーター（特許「曝気装置」昭 62-34438）を設置してある（Fig. 2）。空気自給式エアレーターの構造図および羽根の形状を Fig. 3-a, b に示す。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、空気を自動的に水中に引き込み、空気は羽根と水でせん断されて微細気泡を供給し、邪魔板の効果も加わって激しく混合される。飼育水は下方から流入し、気液接触槽内で発生した安定泡沫が分離

される。生成された安定泡沫は気液接触槽に設けた排気ダクトから自動的に排除される。また、このエアレーターは、微細気泡を供給し、激しく混合するため、気液接触槽に流入した飼育水には、泡沫分離処理と同時に酸素が極めて効率良く溶解する。

**硝化槽** 硝化槽には、高密度ポリエチレン製波状円筒形の担体（古川電気工業(株)製、径 14 mm、内径 11 mm、長さ 14 mm、比重 0.93, Fig. 4）を 0.2 m<sup>3</sup>（総表面積 116 m<sup>2</sup>）充填した。なお、担体には予め硝化菌を定着させ、活性化を確認してから実験に供した。

**流水式システム** 閉鎖循環式システムの対照区として、従来の流水式システムを並列して設置した。設置場所は、閉鎖循環式システムと同様に屋外屋根付き実験施設内とした。コンクリート製の角形水槽（縦 1.5 m、横 2 m、深さ 1 m、水深 0.35 m、水量 1 m<sup>3</sup>）において、連続注水を行い、注水量に相当する水量を排水する方式（掛け流し方式）とした。飼育水槽の水量は、閉鎖循環式システムと同様である。飼育海水には砂ろ過海水を用い、注水量を 120 l/min とし、水理学的平均滞留時間は 8 分とした。飼育水はエアストーンで曝気（空気量 40 l/min）した。

**飼育実験-1** 宮崎大学農学部附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 にわたって実施した。流水式システムと閉鎖循環式シス

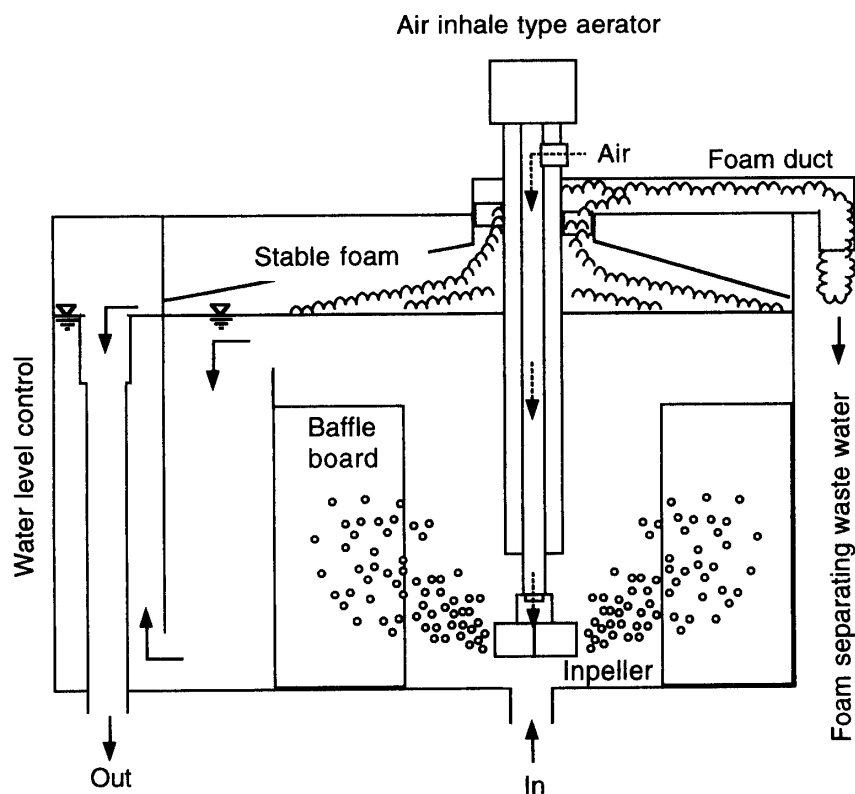


Fig. 2. Schematic diagram of the foam-separation unit.

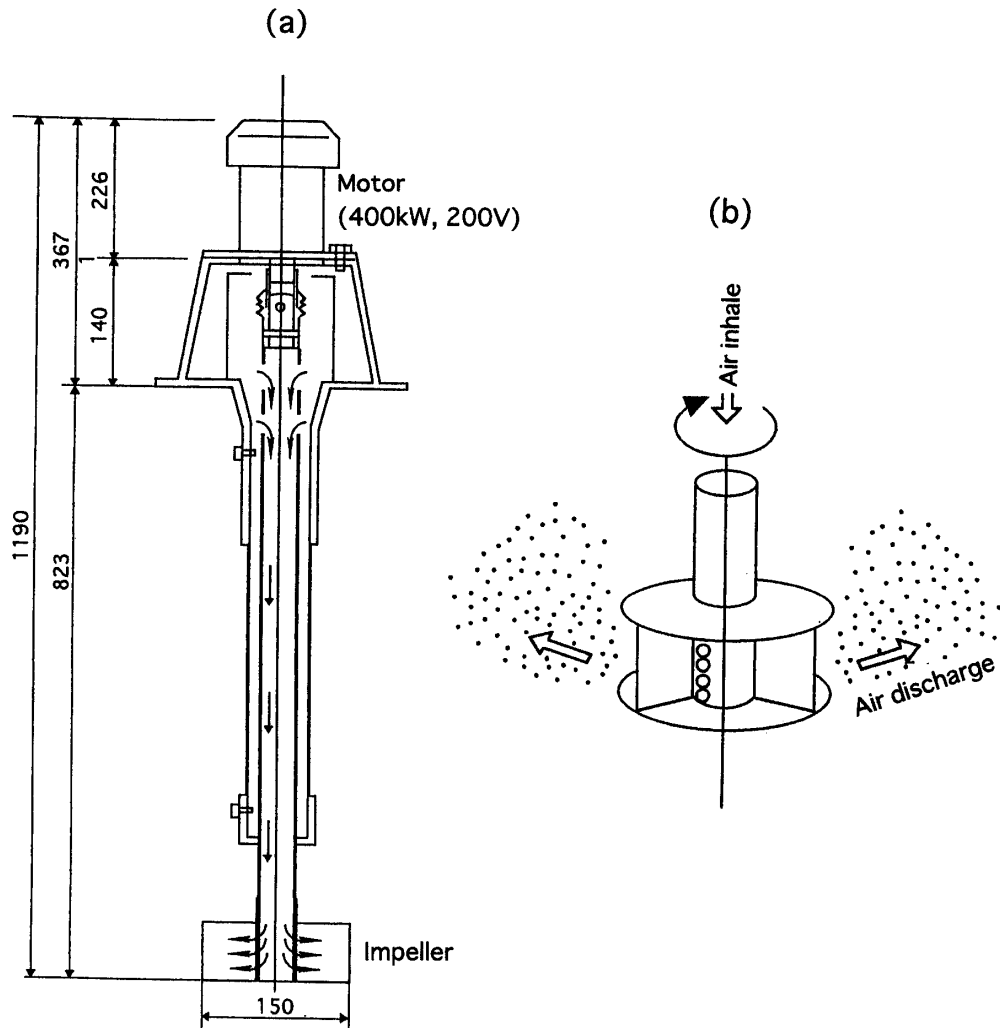


Fig. 3. Schematic diagram of the air inhale discharge type aerator. a: the whole shape (unit: mm), b: the impeller shape.

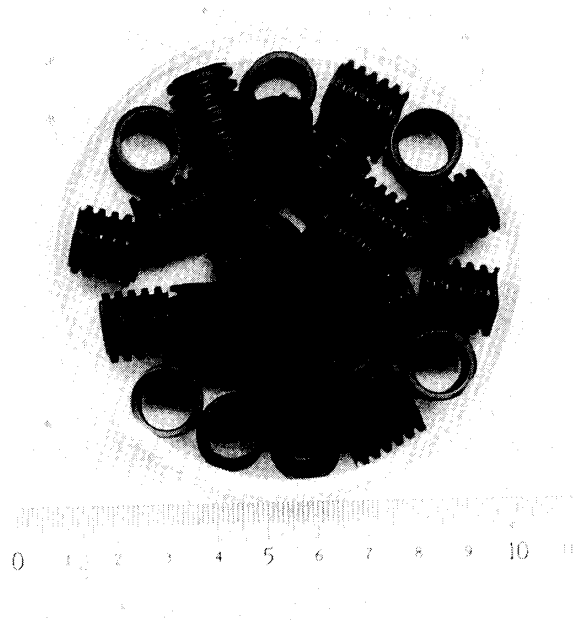
テムのいずれにも 200 尾のヒラメ幼魚を收容し、同時に飼育実験を開始した。開始時魚総重量は、流水式と閉鎖循環式でそれぞれ 33.8 kg と 28.4 kg であった。両システムでは同じ尾数を投入したのにも関わらず開始時魚総重量が異なった理由は、飼育実験を開始する前に順化を目的として約 3 週間の予備飼育を行っており、この際の摂餌に影響があったためである。予備飼育において、ヒラメ 200 個体の全長・体重の測定値とその中から無作為に取り出した 50 個体の測定値について有意差検定 ( $t$  検定, 危険率 5%) した結果、両者間には有意差がなかった。実験を開始してから一ヶ月毎に、両システムからそれぞれ無作為に 50 個体取り出し、各個体の全長と体重を測定した。測定方法は、麻酔剤として 5% の  $p$ -アミノ安息香酸エチル・エタノール溶液を砂ろ過海水 1 l に対して 1 ml の割合で添加した海水に数分間浸漬させて魚の活動を停止させた。全長と体重を測定した後、曝気した水槽に移し、遊泳するようになったの

を確認してからシステムに戻した。1 日当たりの給餌回数は、月曜日から金曜日には午前 9 時と午後 5 時の 2 回、土曜日は午前 9 時の 1 日 1 回とし、日曜日と祭日は給餌しなかった。市販のヒラメ用配合飼料(マルハ製)を用い、飽食給餌した。飼育実験-1 においては、両システムとも水温調整を行わなかった。

**水質分析** 水温と気温は給餌直後に毎回測定した。水質分析に供する飼育水は、午前 9 時の給餌前に、飼育水槽から 5~7 日毎にポリビンに採水し、つぎの項目を分析した。塩分(赤沼式比重計, 離合社製), pH(ガラス電極法, 東亜電波製 HM-12P 型), DO(ウインクラール・アジ化ナトリウム変法),  $\text{NH}_4\text{-N}$ (ネスラー法, HACH 社製 DR-2000), 硝酸性窒素(以降  $\text{NO}_3\text{-N}$  とする)(カドミウム還元法, HACH 社製 DR-2000), 亜硝酸性窒素(以降  $\text{NO}_2\text{-N}$  とする)(ジアゾ化法, HACH 社製 DR-2000), リン酸態リン(以降  $\text{PO}_4\text{-P}$  とする)(アミノ酸法, HACH 社製 DR-2000)。なお, DO につい

ては飼育水を1時間以上曝気したものを飽和酸素濃度として飽和度を求めた。

**飼育実験-2** 閉鎖循環式システムの信頼性ならびに飼育水の加温効果を明らかにすることを目的として、飼育実験-1で用いた閉鎖循環式システムに加温装置(水温を15°C以上に保持)を付設したこと、供試魚のサイズが少し異なることを除き、実験場所、流水式と閉鎖循環式システム、および実験条件は飼育実験-1と同一とし、1997年12月24日~1998年3月11日の77日間にわたって飼育実験を再度行った。流水式システムと閉鎖循環式システムのいずれも200尾のヒラメ幼魚を収容し、開始時魚総重量は、流水式と閉鎖循環式でそれぞれ25.1 kgと24.2 kgであった。



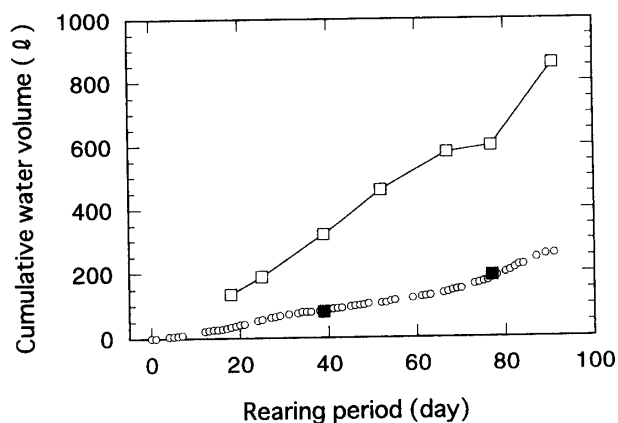
**Fig. 4.** Filter media used in the experiment.  
(a diameter, 14 mm; length, 11 mm; density, 0.93)

## 結 果

**補充水量** 飼育実験-1における閉鎖循環式システムの泡沫分離水補充水(水道水と海水)の累積水量をFig. 5に示した。横軸は飼育日数、縦軸は累積水量である。泡沫分離水の90日間の累積水量は256 l、1日当たりの排出量は平均2.8 lであり、この量はシステム全水量(2,600 l)の0.1%である。泡沫分離水量の補充と塩分調整を目的として、海水を実験期間中2回に分けて190 l加えた。また、蒸発分に相当する水道水は856 lであり、補充水の大部分(82%)を占めた。90日間の飼育に使用した全海水量は2.8 m<sup>3</sup>であった。

**生残率** 流水式と閉鎖循環式システムの飼育実験-1におけるヒラメの実験終了時の生残率は、流水式では98%、閉鎖循環式では93.5%であった(Table 1)。

**ヒラメの成長** Fig. 6-aには、飼育実験-1におけるヒラメの平均体重の変化を示した。横軸は飼育日数、縦軸は魚体平均体重である。両者とも良好に成長し、実験



**Fig. 5.** Cumulative volume of make up water during the experiment.  
□, tap water; ○, foam separating waste water; ■, seawater.

**Table 1.** Results of experiment-1 and experiment-2

	[Initial]		[Final]			Water temperature during experiment (mean, °C)
	Total weight (kg)	Survival rate (%)	Total weight (kg)	Total feed (kg)	FCR* (%)	
(Experiment-1)						
Flow-through system	33.8	98	64.1	27.6	110	15.3
Closed recirculating system	28.4	93.5	50.3	18.7	117	12.6
(Experiment-2)						
Flow-through system	25.1	99	50.1	20.8	120	16.6
Closed recirculating system	24.2	99.5	44.4	17.1	118	15.1

\* FCR, feed conversion ratio.  $FCR(\%) = [\text{fish growth}(\text{kg})] / [\text{feed}(\text{kg})] \times 100$ .

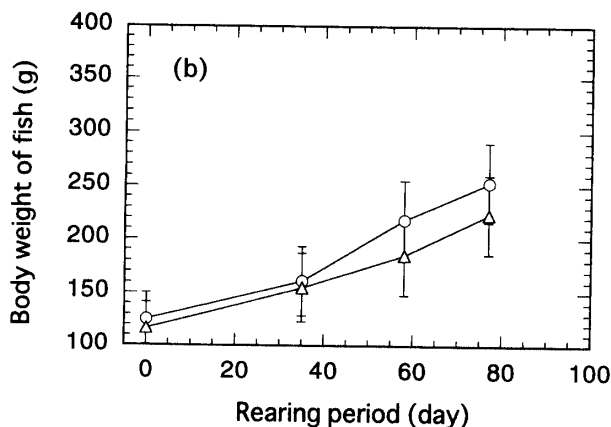
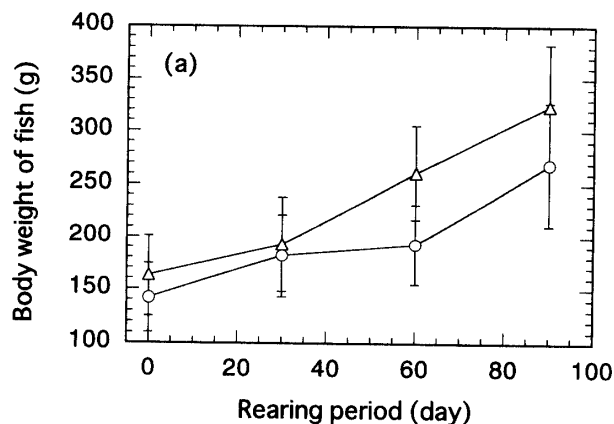


Fig. 6. Growth of the flounder in experiment-1 (a) and experiment-2 (b). Data represent the mean  $\pm$  SD ( $n=50$ ).  $\Delta$ , flow-through system;  $\circ$ , closed recirculating system.

終了時の流水式と閉鎖循環式の個体の平均体重は、それぞれ  $324 \pm 59$  g (平均  $\pm$  標準偏差,  $n=50$ ) と  $269 \pm 58$  g ( $n=50$ ) であり、有意差検定 ( $t$  検定, 危険率 5%) すると、流水式の方が有意に高い結果となった。

**収穫量** 飼育実験-1 終了時における流水式と閉鎖循環式システムの魚総重量 (収穫量) は、それぞれ 64.1 kg と 50.3 kg であり、飼育水槽の水量 (1 t) に対して、それぞれ重量パーセントで 6.4% と 5.0% を占めていた。

**飼料効率** 飼育実験-1 における飼料効率は、流水式と閉鎖循環式で、それぞれ 110% と 117% となった (Table 1)。なお、流水式と閉鎖循環式の飼育水の平均水温は  $15.3^\circ\text{C}$  と  $12.6^\circ\text{C}$  であった。

**水質 1. DO** ヒラメ収容前の閉鎖循環式システムの飼育水の DO は、飽和度で表す (以降、DO 飽和度とする) と 99% であった。飼育水の DO 飽和度は飼育期間を通じて 88~99% で推移し、測定値の平均は、 $96 \pm 3\%$  (18 回) であった (Fig. 7)。なお、流水式シ

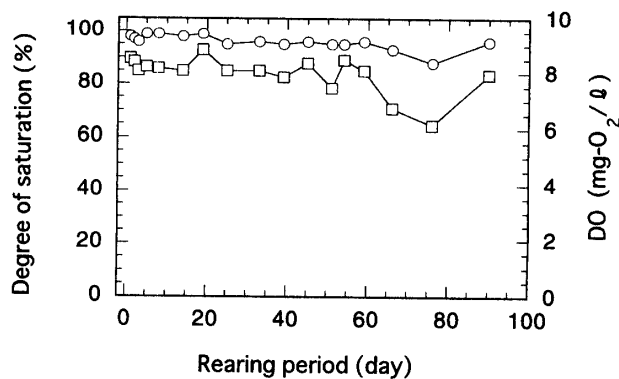


Fig. 7. Dissolved oxygen level in the rearing water of experiment-1.  $\circ$ , percent saturation;  $\square$ , concentration.

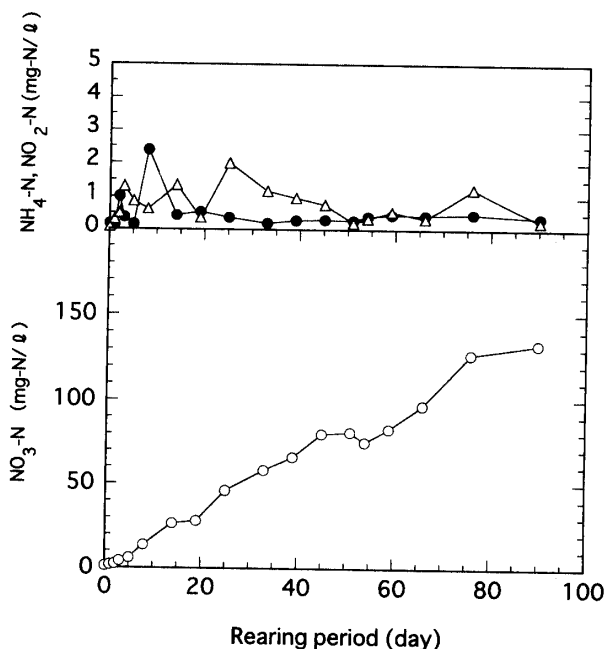


Fig. 8. Concentration of nitrogen compounds in the rearing water of experiment-1.  $\bullet$ , NH<sub>4</sub>-N;  $\square$ , NO<sub>3</sub>-N;  $\Delta$ , NO<sub>2</sub>-N.

ステムに注水する海水の DO 飽和度は、実験期間中を通して 90% 前後であった。

2. NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, および NO<sub>3</sub>-N 閉鎖循環式システムにおける飼育水の NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, および NO<sub>3</sub>-N 濃度の経日変化を Fig. 8 に示した。NH<sub>4</sub>-N は、ヒラメ収容前では  $0.17$  mg-N/l であり、実験期間中を通して  $0.12 \sim 2.39$  mg-N/l の間で推移し、平均  $0.49 \pm 0.51$  mg-N/l (18 回) であった。NH<sub>4</sub>-N は、飼育開始から 10 日まで多少変動したが、10 日目以降はほぼ  $0.5$  mg-N/l 以下であった。NO<sub>2</sub>-N は、ヒラメ収容前には  $0.072$  mg-N/l であり、飼育実験中  $0.072 \sim 1.99$  mg-N/l の範囲で変動し、平均  $0.74 \pm 0.51$  mg-N/l (18 回) であった (Fig. 8)。NO<sub>3</sub>-N は実験開始時の  $1.2$  mg/l から

飼育日数の経過とともに直線的に増加し, 実験終了時の濃度は  $133 \text{ mg/l}$  に達した。なお, 流水式システムに注水した海水の  $\text{NH}_4\text{-N}$  と  $\text{NO}_3\text{-N}$  の濃度は, それぞれ  $0.17\sim 0.54 \text{ mg-N/l}$  と  $1.1\sim 2.1 \text{ mg-N/l}$  の範囲であった。

**飼育実験-2** 飼育実験-2は, 閉鎖循環式システムでは77日間で死亡した個体は1匹だったので, 生残率は99.5% (流水式は99%) と飼育実験-1よりも高い値を示した (Table 1)。飼育水の平均水温は, 流水式と閉鎖循環式で, それぞれ  $16.6^\circ\text{C}$  と  $15.1^\circ\text{C}$  であり, 飼育実験-1のときと比較して水温差は小さかった。また, 流水式と閉鎖循環式システムにおける実験終了時のヒラメの平均体重は, それぞれ  $253\pm 42 \text{ g}$  ( $n=50$ ) と  $223\pm 37 \text{ g}$  ( $n=50$ ) となり, 両システムのヒラメの平均体重の差は, 飼育実験-1の結果と比較して小さい傾向を示した (Fig. 6-b) が, 飼育実験-2においても, 流水式システムの方が有意 (危険率5%) に高い結果を示した。飼料効率を求めると, 流水式と閉鎖循環式はそれぞれ120%と118%であり, 両システムは飼育実験-2においても同等の飼料効率を示した。

### 考 察

**ヒラメの生長と水温** 飼育実験-1における流水式システムと閉鎖循環式システムのヒラメの平均体重の変化をみると, 30日目の測定では両者間で有意差 (危険率5%) がなく, 60日目と実験終了時には, 流水式システムが有意に高い値を示した (Fig. 6-a)。そこで, 体重に差の生じた要因として, 両システムの飼育水の水温から考察する。飼育実験-1の流水式と閉鎖循環式システムの水温変化を Fig. 9 に示した。流水式の場合は, 沿岸の海水を常時汲み上げてろ過して流水しており, 海水の水温変動は気温と比較して小さく, 実験期間を通じて  $15^\circ\text{C}$  前後 (平均  $\pm$  標準偏差  $15.3\pm 1.2^\circ\text{C}$ , 範囲  $13.4\sim 17.7^\circ\text{C}$ , 測定回数 62回) でほぼ一定であった。一方, 閉鎖循環式システムの飼育水の水温は気温の影響を直接的に受けるため, 冬季において  $10^\circ\text{C}$  を下まわる日 ( $12.6\pm 3.1^\circ\text{C}$ ,  $8.1\sim 20.9^\circ\text{C}$ , 62回) が多くみられた。魚の摂餌量は飼育水の水温と密接に関係しており, 閉鎖循環式システムの積算給餌量は, 流水式よりも約30%少なく, ヒラメの体重増加量の差は17%であった (Table 1)。また, 飼育実験-2では, 閉鎖循環式システムに加温装置を付設して水温を  $15^\circ\text{C}$  以上に保持したが, 平均水温は流水式システムと比較して  $1.5^\circ\text{C}$  低く, 閉鎖循環式システムのヒラメの体重は有意に低い結果を示した (Fig. 6-b)。飼育実験-2においても閉鎖循環式システムの積算給餌量は, 流水式よりも約20%少なかった (Table 1)。したがって, 飼育実験-1と2において, 閉

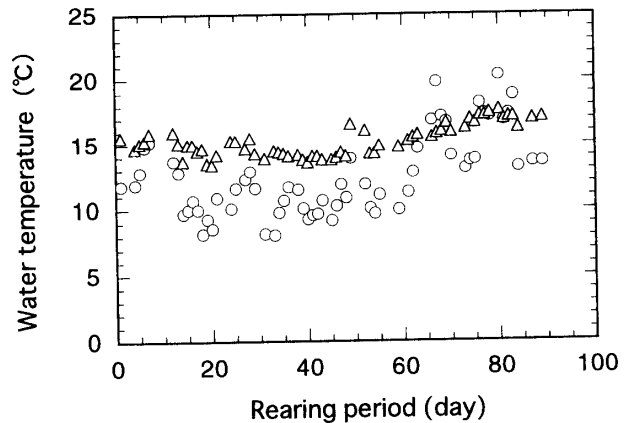


Fig. 9. Rearing water temperature in experiment-1.

$\Delta$ , flow-through system;  $\circ$ , closed recirculating system.

鎖循環式システムの収穫量が流水式と比較して小さくなった原因は, 水温の低下によってヒラメの摂餌量が減少し, 生長が遅くなったためと考えられる。

**維持管理** 閉鎖循環式システムにおける管理項目は, ①給餌, ②蒸発分の水量を水道水で注水して水位を調節 (週1回), ③pH調整剤の5%炭酸水素ナトリウム水溶液を作成して薬液タンクに補充 (2週1回), ④海水を補充して塩分調整 (月1回程度) を行っただけである。従来, 循環式システムで広く採用されてきた砂や網状のろ過装置は, 懸濁物による目づまりが生じるため, ろ材を頻繁に洗浄しなければならない。90日間の飼育実験終了時まで, ろ過槽の役割も兼ねていた硝化槽の閉塞は生じず, 洗浄は一度も行わなかった。

**処理システムの縮小・改良** 閉鎖循環式システム (Fig. 1) の全水量 ( $2.6 \text{ m}^3$ ) に対する水処理装置の部分 ( $1.6 \text{ m}^3$ ) の割合は約60%を占め, 飼育水量 ( $1 \text{ m}^3$ ) より大きい, 大幅に縮小できると考えられる。pHと水温調整は硝化槽の流出部で行うことができるので, pH・水温調整槽 ( $0.4 \text{ m}^3$ ) は不要であり, また, 硝化槽 ( $0.6 \text{ m}^3$ ) は担体の容量 ( $0.2 \text{ m}^3$ ) で十分であるから  $0.4 \text{ m}^3$  分が過大であるので, これらを改良するだけで処理部分の容量は  $1.6 \text{ m}^3$  から  $0.8 \text{ m}^3$  程度まで縮小できる。本研究における閉鎖循環式システムの設計は, ヒラメの酸素消費量  $0.3 \text{ g/kg-ヒラメ}\cdot\text{h}$  ( $100 \text{ g}$  のヒラメの酸素消費量<sup>23)</sup>の2倍相当) と  $\text{NH}_4\text{-N}$  排泄量<sup>24)</sup>  $10 \text{ mg-N/kg-ヒラメ}\cdot\text{h}$  を基準にした非常に大まかなものであった。閉鎖循環式システムにおける飼育水のDO飽和度は全期間を通じて88~99%であり (Fig. 7),  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度は, ほぼ  $0.5 \text{ mg-N/l}$  以下に保たれた (Fig. 8)。酸素供給能と硝化能はともに魚の飼育に適切な条件を満た

しており、収容量をさらに多くできると考えられる。酸素の供給量と消費量、ならびに担体の硝化能力を検討し、魚の収容量に対する各プロセスの最適化を図ることが今後の課題である。

**閉鎖循環式高密度養殖の可能性** 本研究で対照区とした流水式システムでは、当該実験所の砂ろ過海水を120 l/minで流水し、飼育水の滞留時間を約8分と極めて短く設定し、常に新鮮な海水を供給し、さらに曝気を行って飼育した。これに対して、閉鎖循環式システムは、飼育水をほとんど換水しない厳しい制約条件下において、流水式に近い飼育結果を得ることができた。これは、閉鎖循環式システムの泡沫分離と硝化のプロセスが効果的に働き、飼育水を連続的かつ適切に処理し、水質を良好に保持できたためと考えられる。閉鎖循環式システムによる高密度養殖に期待が持たれる。

### 謝 辞

本研究を遂行するに当たり、タス環境エンジニアリング(株)佐藤鐵三郎氏にはシステムの製作を、旭有機材工業(株)ならびに清本鉄工(株)には実験施設の設置および改造等の援助を、(株)西原衛生研究所には担体(ろ材)の提供を賜った。ここに深く謝意を表します。本論文の初稿を推敲するに際し、多数の有益なご意見を賜り、ご尽力くださった審査委員の方々に、心より感謝いたします。

### 文 献

- 村上彰男：漁業からみた閉鎖性海域の窒素・リン規制，恒星社厚生閣，東京，1986，155pp.
- 丸山俊朗，鈴木祥広：養魚排水の現状と水域への負荷-問題点とクローズド化への展望．日水誌，**64**，216-226 (1998).
- 農林水産省統計情報部：漁業・養殖業生産統計年報，1997.
- 坂本市太郎：魚類給餌養殖の視点からの窒素・リン負荷の規制，「漁業から見た閉鎖性海域の窒素・リン規制」(村上彰男編)，恒星社厚生閣，東京，1986，pp. 96-133.
- J. Bovendeur, E. H. Eding, and A. M. Henken: Design and performance of water recirculation system for high-density culture of the african catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell 1822). *Aquaculture*, **63**, 329-353 (1987).
- L. T. H. Heinsbroek and A. Kamstra: Design and performance of water recirculation systems for eel culture. *Aquacult. Eng.*, **9**, 187-207 (1990).
- R. Knosche: An effective biofilter type for eel culture in recirculating system. *Aquacult. Eng.*, **13**, 71-82 (1994).
- J. v. Rijn: The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture-A review. *Aquaculture*, **139**, 181-201 (1996).
- 水産庁栽培養殖課：環境創出型養殖技術の開発．養殖，**5**，38-40 (1998).
- 佐伯有常：魚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 (1958).
- 河合 章，吉田陽一，木俣正夫：循環ろ過式飼育水槽の微生物化学的研究-I．日水誌，**30**，55-62 (1964).
- 河合 章，吉田陽一，木俣正夫：循環ろ過式飼育水槽の微生物化学的研究-II．日水誌，**31**，65-72 (1965).
- 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．日水誌，**31**，977-982 (1965).
- 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．日水誌，**31**，983-990 (1965).
- 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．日水誌，**32**，11-19 (1966).
- 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．日水誌，**32**，20-27 (1966).
- 武田重信，本田晴朗，菊池弘太郎，岩田仲弘，清野道康：高能率魚類生産のための水質浄化技術の開発，5.ヒラメの長期飼育時における水質変化．電力中央研究所報告，**U900412**，1-24 (1990).
- 武田重信，菊池弘太郎：高能率魚類生産のための水質浄化技術の開発，11.養魚システムの物質収支と物理化学的浄化法の評価．電力中央研究所報告，**U93056**，1-23 (1994).
- H. Honda, Y. Watanabe, K. Kikuchi, N. Iwata, S. Takeda, H. Uemoto, T. Furuta, and M. Kiyono: High density rearing of Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus* with a closed seawater recirculation system equipped with a denitrification unit. *Suisanzoushoku*, **41**, 19-26 (1994).
- 丸山俊朗，奥積昌世，佐伯昭和，島村 茂：活魚輸送・畜養における泡沫分離法の飼育海水浄化能．日水誌，**57**，219-225 (1991).
- 丸山俊朗，奥積昌世，佐藤順幸：循環式泡沫分離-ろ過システムによるヒラメ畜養水の浄化．日水誌，**62**，578-585 (1996).
- 建設省：粒状ろ材固定床型好気性バイオリアクターの開発，「バイオテクノロジーを活用した新排水システムの開発」，土木研究センター，東京，1993，pp. 572-582.
- 本田晴朗，菊池弘太郎，佐伯 功，植本弘明，清野道康：飼育実験と酸素消費量から推定したヒラメの飼育限界密度．電力中央研究所報告，**U87074**，1-19 (1988).
- 菊池弘太郎，武田重信，本田晴朗，清野道康：高能率魚類生産のための水質浄化技術の開発，4.ヒラメの窒素排泄量について．電力中央研究所報告，**U90016**，1-21 (1990).