

閉鎖循環式泡沫分離・硝化システムを用いたヒラメの飼育における飼育水水質および物質収支

鈴木祥広, 丸山俊朗, 佐藤大輔, 神田 猛, 道下 保

(1998年8月10日受付)

Water Quality and Mass Balances in a Culture of Japanese Flounder using a Closed Recirculating System with Foam-separation and Nitrification Units

Yoshihiro Suzuki,^{*1} Toshiroh Maruyama,^{*1} Daisuke Sato,^{*1}
Takeshi Kanda,^{*2} and Tamotsu Michishita^{*2}

In this study, water quality and mass balances in the closed recirculating culture of Japanese flounder were examined. The closed system consisted of rearing tank, foam-separation and nitrification units, pH and temperature controlling units, and a circulation pump. Fish were fed commercial pellet diet for 90 days.

Average values of oxygen saturation and turbidity in the rearing water through the culture were 96% and 3.1 TU, respectively. Ammonia was mostly kept at less than 1 mg-N/l, and nitrate increased linearly according to the amount of diet supplied. It is estimated that 33% of dietary carbon (C) was accumulated in the fish, as well as 52% of nitrogen (N), and 26% of phosphorus (P). The carbon released as CO₂ was 63%. Nitrate in the rearing water corresponded to 28% of N-input, and 66% of P was settled in the nitrification unit as precipitate.

キーワード：閉鎖循環式, 飼育システム, 泡沫分離, 硝化, 固液分離, 水質, 物質収支

海産魚類の養殖において、飼育水を浄化することにより、排水せずに繰り返し使用する閉鎖循環式の高密度養殖が可能となれば、現行の養殖場からの汚濁負荷量が軽減でき、沿岸環境の保全・修復にも寄与できると考えられる。著者らは、酸素溶入を目的とする気液接触と泡沫分離を兼ね備えたプロセス（以降、泡沫分離プロセスと称する）、硝化と固液分離を兼ね備えたプロセス（以降、硝化プロセスと称する）、および pH・水温を調整するプロセスを組み合わせた閉鎖循環式の魚類飼育システム（閉鎖循環式泡沫分離・硝化システム、以降、本システムと称する）を構築し（Fig. 1）、ほとんど排水しない条件において、数カ月に亘るヒラメ *Paralichthys olivaceus* の飼育実験を行った。泡沫分離プロセスを導入したシステムを用いて、給餌を伴う閉鎖循環式飼育を行った報告は国内外においても見られない。新しい魚類飼育システムを開発していく上で、本システムにおける各プロセスの機能に関する基礎的知見が必要であると考えられる。

そこで本報では、本システムの飼育実験における飼育水の水質変化、ならびに炭素 (C)、窒素 (N)、およびリン (P) の収支について調べ、水質維持特性と各プロセスの機能について検討することにした。

実験方法

システム 本システムは、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 m³ である (Fig. 1)。硝化槽には高密度ポリエチレン製円筒形の担体（古河電工製、外径 14 mm、長さ 14 mm）を 0.2 m³（表面積 116 m²）充填した。設置場所は宮崎大学農学部附属水産実験所の屋根付き実験施設内とした。飼育水は、循環ポンプで気液接触槽に送られて、ここで、酸素が溶入され、同時に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態窒素（以降 NH₄-N とする）が硝化され、

^{*1} 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).

^{*2} 宮崎大学農学部附属水産実験所 (Fisheries Research Laboratory, Miyazaki University, Akamizu, Nobeoka 889-0517, Japan).

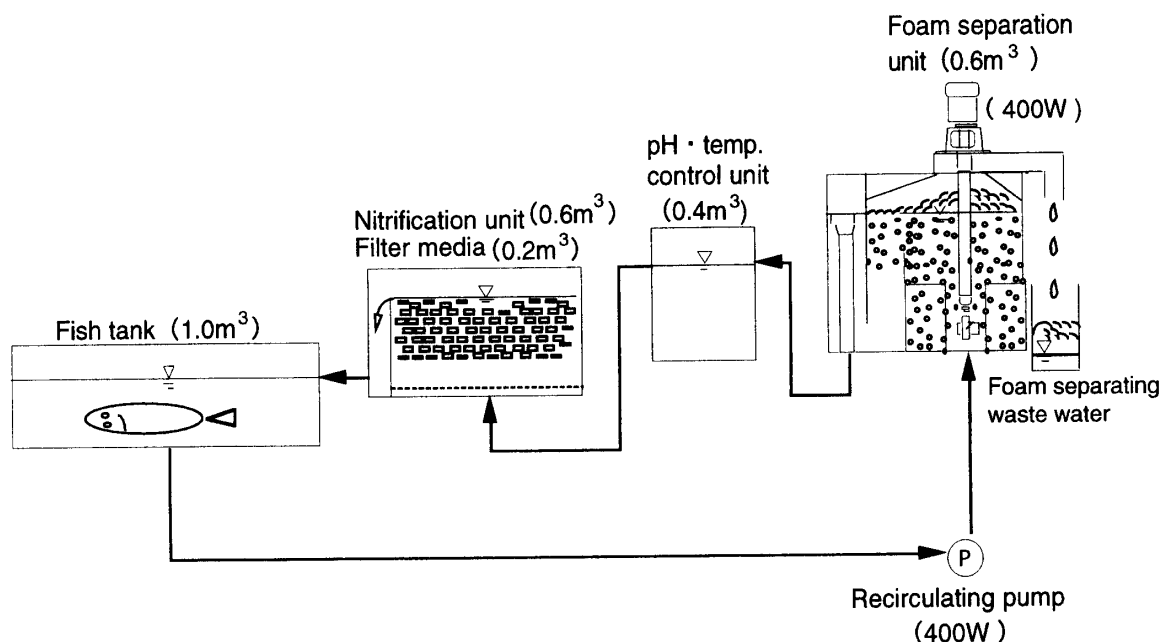


Fig. 1. Schematic diagram (not to scale) of the closed recirculating system with foam-separation and nitrification units.

同時に固液分離されて、処理水は再び飼育水槽に返送される。泡沫によって分離される海水並びに蒸発する水分を補充するため、ろ過海水並びに水道水を加えた。

飼育実験 飼育実験-1は、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。ヒラメの幼魚200尾（開始時魚総重量28.4kg）で飼育を開始した。飼育用海水は、実験所施設内に給水されている砂ろ過海水を用いた。水量は 2.6 m^3 （飼育水槽 1 m^3 ）、流量は 120 l/min としたので、1循環時間が22分となった。一日当たりの給餌回数は、月曜日から金曜日は午前9時と午後5時の2回、土曜日は午前9時の1回とし、日曜日と祭日は無給餌とした。市販のヒラメ用配合飼料（マルハ製）を用い、飽食量を給餌した。pH自動制御装置（イワキ製、EH/W-PH型）と5%炭酸水素ナトリウム水溶液（和光純薬製、特級）を用い、飼育水のpHを7.86～8.39の範囲に維持した。本システムの信頼性ならびに細菌数と色度除去について検討を加えるため、繰り返し実験（飼育実験-2）を1997年12月24日～1998年3月11日の77日間にわたり、飼育実験-1とはほぼ同一条件で実施した。なお、飼育実験-1では水温調整を行わず、飼育実験-2では加温装置を作動させて下限水温を 15°C に設定した。

試料採取 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 250 ml のポリビンに採水し、直ちに分析する試料と冷凍保存（ -20°C ）する試料に分けた。気液接触槽から排除される泡沫分離水については、給餌後にすべてを回収し、その都度、水

量を測定し、冷凍保存した。

水質分析 分析項目と分析方法は次の通りとした。水温・気温（棒状温度計と自動温度記録計、CHINO製LA660型）、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）、溶存酸素（以降DOとする）（ウインクラー・アシ化ナトリウム変法）、溶解性有機炭素（以降DOCとする）と全有機性炭素（以降TOCとする）（燃焼-赤外線分析法、島津製作所製TOC-5000型）、 260 nm の吸光度（以降 260 nm 吸光度とする）（ 260 nm 吸光度法、¹⁾島津製作所製UV-2200型）、 $\text{NH}_4\text{-N}$ （ネスラー法、HACH製DR-2000型）、硝酸態窒素（以降 $\text{NO}_3\text{-N}$ とする）（カドミウム還元法、HACH製DR-2000型）、亜硝酸態窒素（以降 $\text{NO}_2\text{-N}$ とする）（ジアゾ化法、HACH製DR-2000型）、全窒素（以降T-Nとする）（アルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウム分解-紫外外部吸光度法）、リン酸態リン（以降 $\text{PO}_4\text{-P}$ とする）（アミノ酸法、HACH製DR-2000型）、全リン（以降T-Pとする）（ペルオキシ二硫酸カリウム分解法）、濁度（積分球式光度法、東京電色製T-2600型）、カルシウム（以降Caとする）・マグネシウム（以降Mgとする）（キレート滴定法）。なお、濁度は精製カオリン 1 mg/l 懸濁液の光学特性値を1濁度単位（TU）とした。 260 nm における吸光度は、生物難分解性有機物濃度の一指標とされる。¹⁾また、DO飽和度は、飼育水を1時間以上曝気後静置したものをDO飽和水として、それに対する相対百分率として求めた。

細菌数 飼育実験-2における飼育水および泡沫分離水の生菌数とビブリオ菌群数を計数した。生菌数の測定には、50%濃度の人工海水²⁾で調製した普通寒天培地(日水製薬製)を用い、同じ人工海水を用いて数段階に希釈した試料0.1 mlを寒天培地平板上に滴下し、コンラージ棒で表面に広げた。20°Cで10日間培養し、平板上に発育したコロニーを計数した。ビブリオ菌群数の測定には、20%人工海水で調製したTCBS培地(日水製薬製)を用い、生菌数の場合と同様にして、35°Cで20~24時間培養し、平板上に発育したコロニーをビブリオ菌群数とした。

色度除去 飼育実験-2の68日目から、着色飼育水の処理を試みた。閉鎖循環式システムとは別に、約30 lのろ過槽を用意し、あらかじめ水道水で洗浄し、水に浸漬しておいた粒状活性炭(ポリシーP、水道機工製)20 lを充填した。活性炭ろ過槽は飼育水槽の上部に設置し、飼育水を下向流式で導入し、処理水は飼育槽に戻した。流水速度は約1 l/minとした。色度除去の評価のため、活性炭ろ過槽設置前後の飼育水の260 nm吸光度を測定した。

物質収支の測定方法 飼育実験終了後、硝化槽に充填した担体を全て取り出して別途用意した500 lの容器に移し、砂ろ過海水を用いて3回洗浄し、担体に蓄積した沈殿物を回収した。硝化槽内に蓄積した沈殿物も全て回収し、これらの沈殿物のTOC、T-N、およびT-Pを分析した。なお、実験に用いた配合餌料のC、N、およびPの組成は上記の方法で分析した結果から重量比でそれぞれ45%、7.8%、および1.0%であった。また、ヒラメ魚体のC、N、およびPの組成は文献値³⁾から44%、12%、および0.7%とした。硝化槽以外の箇所では配管を含め、沈殿物は蓄積していなかった。したがって、物質収支は、総給餌量、魚増重量、飼育水と泡沫分離水の水質ならびに水量、および硝化槽の沈殿物量から求めた。

結 果

飼育実験-2における飼育水の水質変化、泡沫分離水の水質は、飼育実験-1と類似した結果であった。したがって、検討を要した細菌試験と色度除去以外の飼育実験-2に関する記述は省略した。

飼育水の水質 1. 気温と水温 期間中における平均気温(午前9時)は $11.1 \pm 3.6^\circ\text{C}$ (平均±標準偏差, 測定回数 $n=62$)で範囲は $4.2 \sim 20.6^\circ\text{C}$, 飼育水の平均水温(午前9時)は $12.6 \pm 3.0^\circ\text{C}$ ($n=62$)で範囲は $8.1 \sim 20.3^\circ\text{C}$ であった。本システムの水温の変化は、気温の変化に依存し、1~2日遅れて変化する傾向を示した。しかし、水温の変動幅は気温の変動幅と比較して小さか

った。Fig. 2には、1997年1月7日の30分間隔の気温と水温の日内変動を示した。気温は大きく変化するのに対して、水温は急激に変化せず、気温の変化に対して非常に緩やかに変動した。

2. pH pHは飼育実験期間中、7.86~8.39の間で推移し、平均 8.08 ± 0.14 ($n=18$)であった。90日間で使用した5%炭酸水素ナトリウム水溶液の総量は約120 l(炭酸水素ナトリウム約6 kg使用)であった。

3. 塩分 塩分の変化、水道水添加量、および海水添加量をFig. 3に示した。塩分は水道水添加あるいは海水添加後に測定した値である。ヒラメ収容前の塩分は34.4であったが、実験期間中は33.2~36.2の間で変化し、平均 34.9 ± 0.9 ($n=18$)であった。実験期間中に加えた水道水量は計856 l、海水量は計190 lであり、総添加水量(1,046 l)の82%は蒸発分に相当する水道水であった。

4. DO ヒラメ収容前の飼育水のDO飽和度は99%であった。また、実験期間を通じて88~99%の間で変

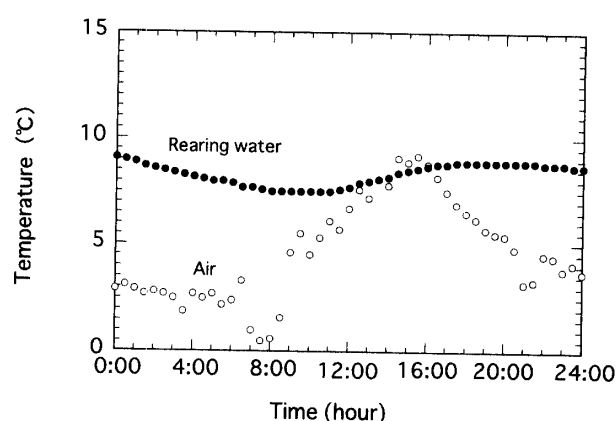


Fig. 2. Diurnal variation of the air and the rearing water temperature.

○, air; ●, rearing water.

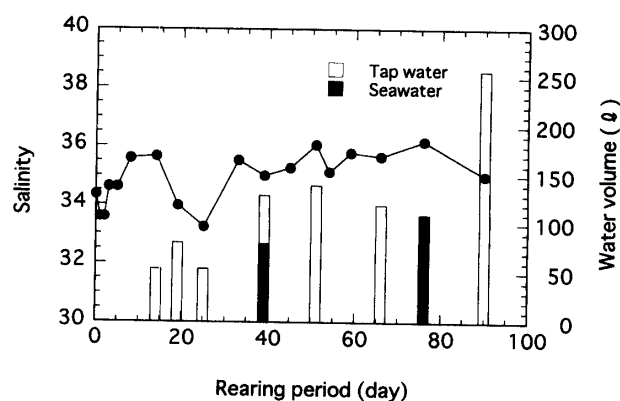


Fig. 3. Salinity in the rearing water, and added amounts of water during experiment-1.

●, salinity.

化し, 平均して $96 \pm 3\%$ ($n=18$) であった (Fig. 4)。DO 濃度で表すと $8.0 \pm 0.7 \text{ mg-O}_2/\text{l}$ である。また, 飼育日数 76 日目において 88% の最低値を示した。飼育実験-2 においても 77 日間の飼育実験期間を通じて, 飼育水の DO 飽和度は 86~98% ($94 \pm 4\%$, $n=11$) の範囲であり, 高い値で維持された。

5. 有機炭素 (DOC・TOC) DOC と TOC の変化を Fig. 5 に示した。ヒラメ収容前の DOC 濃度は $1.54 \text{ mg-C}/\text{l}$, TOC 濃度は $1.63 \text{ mg-C}/\text{l}$ であった。いずれも, 飼育日数の経過とともに直線的に増加する傾向を示し, TOC 濃度は実験終了時には $36.53 \text{ mg-C}/\text{l}$ に達した。大部分は, DOC として存在していた。

6. 260 nm 吸光度 飼育実験-1 および 2 の期間中における 260 nm 吸光度の変化を Fig. 6-a に示した。飼育実験-1 では, 260 nm 吸光度は DOC および TOC と類似した変化を示し, 飼育日数の経過とともに増加した。260 nm 吸光度と DOC 濃度について相関関係を調べた結果, 有機炭素の蓄積と飼育水の紫外外部吸光度との間には高い正の相関が認められた (Fig. 6-b)。飼育実験-2 においても飼育日数の経過とともに 260 nm 吸光度は増加した。しかし, 68 日目に活性炭ろ過槽への通水を開始すると, その後の 5 日間で 260 nm 吸光度は 1/4 以

下に低下した (Fig. 6-a)。目視においても飼育水の黄褐色の濃さが低下し, 活性炭処理を開始してから 5 日後にはほとんど消失した。5 日間では飼育水の全量が活

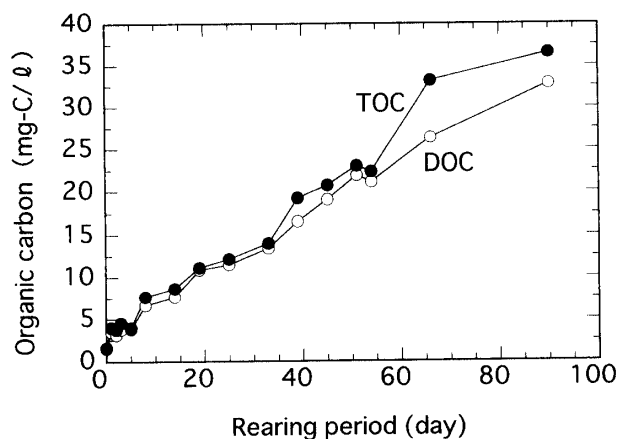


Fig. 5. Concentrations of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC) in the rearing water during experiment-1.

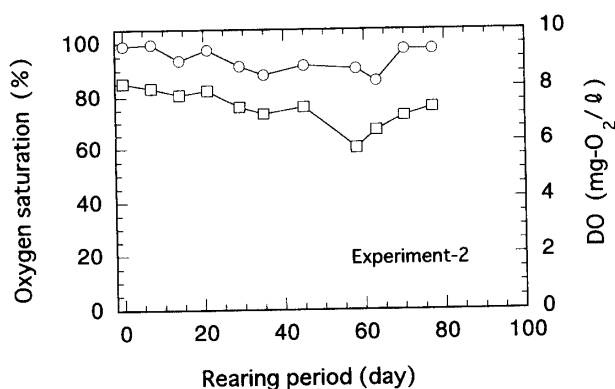
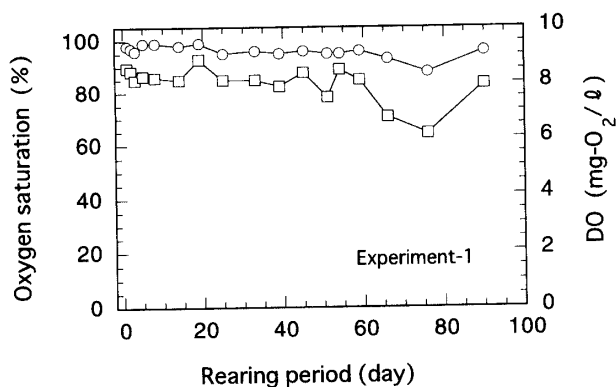


Fig. 4. Dissolved oxygen level in the rearing water.
○, oxygen saturation; □, concentration.

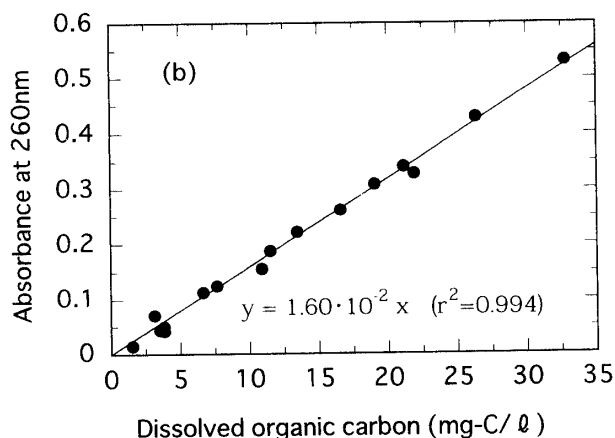
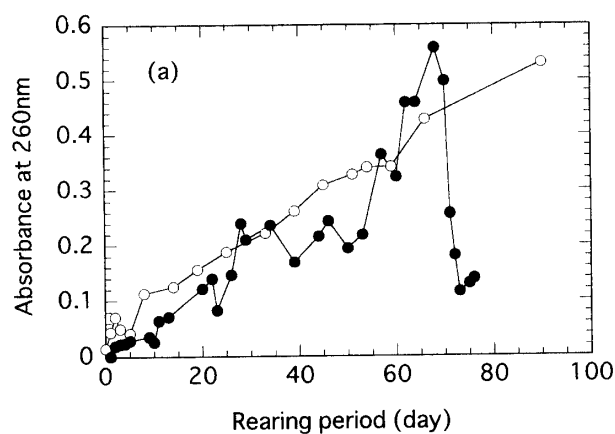


Fig. 6. (a) Absorbance at 260 nm in the rearing water, and (b) relationship between DOC and the absorbance.

○, experiment-1; ●, experiment-2.

性炭ろ過槽を約3回通過したことになる。

7. $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, T-N $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, および T-N 濃度の経日変化を Fig. 7 に示した。ヒラメ収容前の $\text{NH}_4\text{-N}$ は 0.17 mg-N/l であり, 実験期間中 $0.12 \sim 2.39 \text{ mg-N/l}$ の間で変化し, 平均すると $0.49 \pm 0.51 \text{ mg-N/l}$ ($n=18$) であった。飼育2日目の 1.01 mg-N/l と飼育8日目の 2.39 mg-N/l を除くと, ほぼ 0.5 mg-N/l 以下であった。 $\text{NO}_2\text{-N}$ は, ヒラメ収容前には 0.072 mg-N/l であり, 飼育実験中 $0.072 \sim 1.99 \text{ mg-N/l}$ の範囲で変化し, 平均すると $0.74 \pm 0.51 \text{ mg-N/l}$ ($n=18$) であった (Fig. 7)。一方, ヒラメ収容前の $\text{NO}_3\text{-N}$ は 1.2 mg/l であったが, 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 mg/l に達した。また, T-N は, $\text{NO}_3\text{-N}$ に依存し, 飼育日数の経過とともに増加し, 実験終了時には 169 mg/l に達した (Fig. 7)。

8. $\text{PO}_4\text{-P}$, T-P, および濁度 $\text{PO}_4\text{-P}$, T-P, および濁度の経日変化を Fig. 8 に示した。 $\text{PO}_4\text{-P}$ と T-P は極めて類似した変化を示し, 飼育水のリンは, 主に $\text{PO}_4\text{-P}$ として存在していたことがわかった。ヒラメ収容前の $\text{PO}_4\text{-P}$ は 0.38 mg/l であり, 51日目までは, 飼育日数の経過とともに直線的に増加した。飼育日数51日目には最高値の 21.3 mg/l に達したが, 54日目には 14.7 mg/l まで減少し, その後は $11.7 \sim 12.5 \text{ mg/l}$ でほぼ一定となった。濁度についてみると, ヒラメ収容前は 0.9 TU であり, 実験期間中 $0.4 \sim 11.5 \text{ TU}$ の範囲で変化し, 平均 $3.1 \pm 3.0 \text{ TU}$ ($n=18$) であった。濁度と透明

度の関係^{4,5)}から, 3.1 TU における透明度は $4 \sim 5 \text{ m}$ となるので, 一時的に 11.5 TU の高い値を示したものの, 飼育水は試験期間を通して, 濁質の少ない透明度の高い状態にはほぼ保たれたといえる。

泡沫分離水の発生量 一日当たりの泡沫分離水量と積算泡沫分離水量の経日変化を Fig. 9 に示した。全泡沫水量は 256 l であり, 一日当たりの水量は平均すると 2.8 l/day となる。この水量は, システム総水量の 0.1% に相当する。

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 を測定した。分取した 32 試料の平均濃度は, 濁度 $326 \pm 202 \text{ TU}$, SS $1,250 \pm 535 \text{ mg/l}$, TOC $574 \pm 143 \text{ mg-C/l}$, T-N $258.5 \pm 61.8 \text{ mg-N/l}$, および T-P $60.9 \pm 18.6 \text{ mg-P/l}$ であった。飼育水と比較して, いずれも飼育水と比べて高く, 特に懸濁物では顕著であった。泡沫分離水には強い魚臭があり, 粘性も高かった。

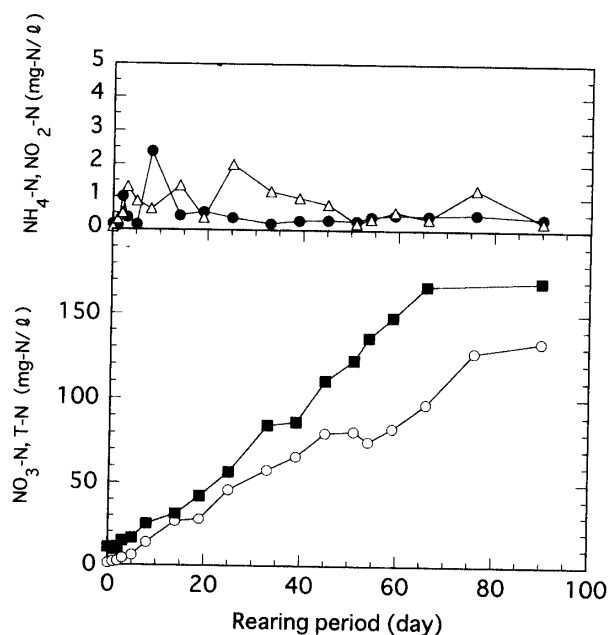


Fig. 7. Concentrations of nitrogen compounds in the rearing water during experiment-1.
●, $\text{NH}_4\text{-N}$; ○, $\text{NO}_3\text{-N}$; △, $\text{NO}_2\text{-N}$; ■, T-N.

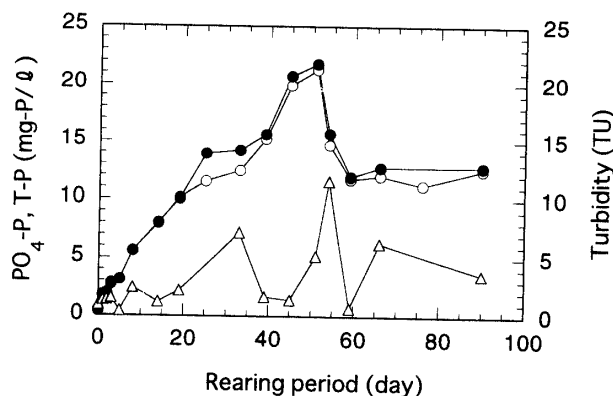


Fig. 8. Concentrations of phosphorus compounds and turbidity in the rearing water during experiment-1.
○, $\text{PO}_4\text{-P}$; ●, T-P; △, turbidity.

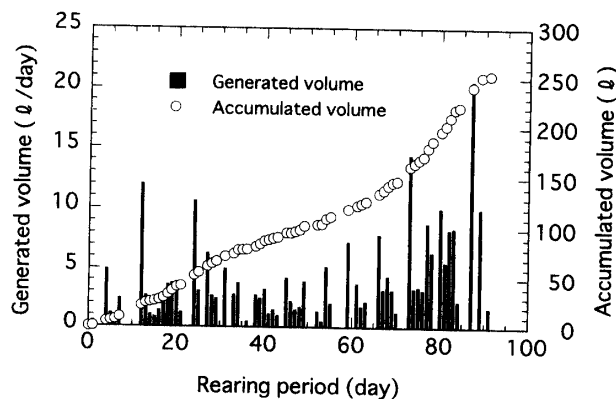


Fig. 9. Changes in generated volume of foam separating wastewater, and accumulated volume of the wastewater during experiment-1.

硝化槽の沈殿物 硝化槽内に蓄積した沈殿物の総重量は乾燥重量で1,880 gであり, C, N, およびPの量は, それぞれ117 g, 113 g, および125 gであった。

細菌数試験 飼育実験-2における飼育水と泡沫分離水中の生菌数の経日変化をFig. 10に示した。飼育水の生菌数は, 平均して 2.6×10^5 CFU/ml ($1.3 \times 10^3 \sim 2.2 \times 10^6$ CFU/ml, $n=10$)であり, 飼育日数が経過しても細菌数は増加しない傾向を示した。一方, 泡沫分離水中の生菌数は, 飼育水と比較して1~2オーダー高く, 平均して 6.8×10^6 CFU/ml ($1.2 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^7$ CFU/ml, $n=4$)であった。ビブリオ菌群数は, 試験開始直後の

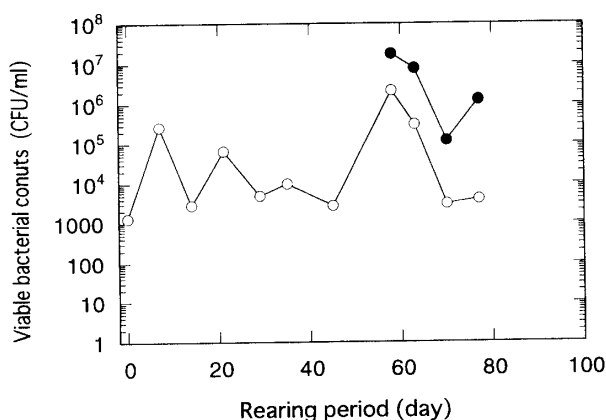


Fig. 10. Bacterial cell counts in the rearing water and the foam separating wastewater during experiment-2.

○, rearing water; ●, foam separating waste water.

飼育水で 2.0×10^2 CFU/mlが検出されたが, それ以降は検出されなかった。

物質収支 飼育実験-1における総給餌量は18.7 kgであり, 投入したC, N, およびPの総量は, それぞれ8.41 kg, 1.46 kg, および0.19 kgとなる。実験開始時には28.4 kgであったヒラメの総重量は, 90日後に50.3 kgとなり, 増重量は21.9 kgとなった。また, 全泡沫水量は256 lであった。以上の結果をもとにC, N, およびPの物質収支をFig. 11に示した。投入されたCの33% (飼育実験-2では31%, 以下同じ)に相当する量がヒラメの成長に利用され, 1% (1%)が溶解性有機物として飼育水に蓄積し, 2% (3%)が泡沫水として除去され, 1% (1%)が沈殿物として硝化槽に蓄積した。残りの63% (64%)はヒラメの呼吸や微生物の分解によって二酸化炭素ガスとなってシステム外に放出されたと考えられる。Nでは, 52% (50%)がヒラメの成長に利用され, 28% (35%)が飼育水に蓄積し, 4% (7%)が泡沫分離で除去され, 8% (8%)が硝化槽に沈殿物として蓄積した。残りの8% (0%)は脱窒作用により N_2 ガスとしてシステム外に放出されたと考えられる。なお, CとNのガスの割合は, 飼育水, 硝化槽, およびヒラメに相当する割合を差し引いて得られた値であるため, 分析誤差とその他の見積もり誤差を含んだ値である。Pは, 26% (23%)がヒラメの成長に利用され, 16% (20%)が飼育水に PO_4 -Pと有機態Pとして蓄積し, 8% (16%)が泡沫で除去され, 66% (29%)が沈殿物として硝化槽に蓄積した。Pの割合を合計すると116% (88%)となり, 100%にならない。

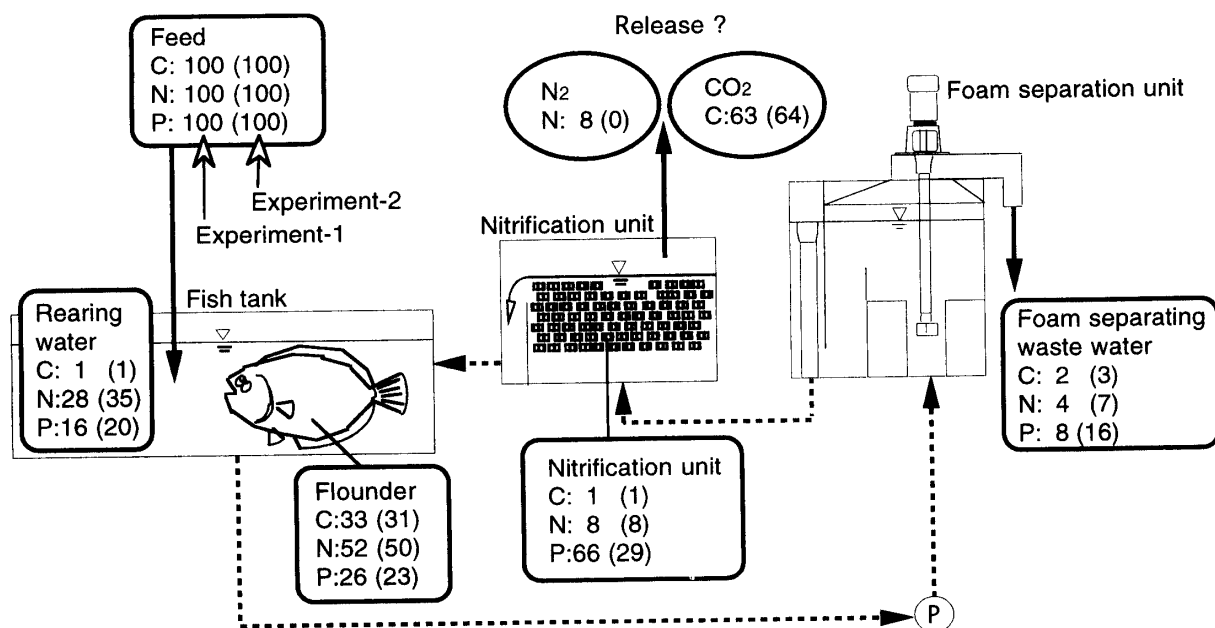


Fig. 11. Mass balances in the closed recirculating system.

これは、分析誤差、餌のP重量パーセント、およびヒラメの体成分推定値の誤差によって生じたと考えられる。

考 察

泡沫分離水の発生量 飼育日数の経過にともなって、生物量（魚体表面積）が増加し、飼育水中に分泌される体表面粘質物の量は増加すると考えられる。タンパク質を利用した泡沫分離法⁶⁾では、タンパク質量の増加は泡沫分離水を多く発生させることから、体表面粘質物量の変化が泡沫分離水量の変化を支配したのではないかと考えられる。泡沫分離水の発生は、給餌直後、給餌後6～8時間後以降、および魚の体長・体重測定の際に多くみられた。泡沫分離システムを蓄養水槽で用いた際の泡沫分離水の発生量は、水温によって変化する魚の活動度に依存することが示唆されている。^{7,8)}

黄褐色物質の除去 閉鎖循環式システムでヒラメを飼育すると、黄褐色の溶解性有機物質が蓄積することがわかった。閉鎖循環式の飼育システムにおける飼育水の黄褐色化については他にも報告がある。^{9,10)}黄褐色物質が魚類に及ぼす影響について詳細に検討した例はみられないが、高濃度の蓄積は、魚の成長を抑制する可能性があると考えられている。¹⁰⁾また、飼育水が著しく着色すると、目視による魚の健康状態の確認が困難となるばかりでなく、ヒラメの摂餌活動にも影響を及ぼすと考えられる。今回行った飼育実験の範囲では、黄褐色物質がヒラメの生育に及ぼす影響はほとんどみられなかった。黄褐色物質の処理には、オゾンによる酸化分解が有効である^{11,12)}が、海水では毒性の強い臭素酸 (BrO_3) が生成され、¹³⁾飼育水中に残留する可能性があるため、あまり適切とは考えられない。黄褐色物質は、活性炭処理でも除去できる。

水質維持特性 1. DO 本システムは、気液接触槽に特殊な空気自給式エアレーターを設置して、微細な気泡を供給し、さらに激しく攪拌するように設計されており、飼育実験中の飼育水のDO飽和度は、飼育実験-1では88～98%（平均8.0 mg- O_2 /l, 平均水温12.6°C）、飼育実験-2では86～98%（平均7.2 mg- O_2 /l, 平均水温15.5°C）といずれも高い値で維持された。飼育日数の経過とともに飽和度が減少する傾向を示した（Fig. 4）が、この原因はヒラメの成長ならびに水温の上昇に伴う酸素消費量の増加によると考えられる。飼育実験-1と飼育実験-2の終了時における魚の総重量は、それぞれ50.3 kgと44.4 kgであり、本システムの水量が2.6 m³であったことから、単位飼育水当たりの収容量は、それぞれ1.9%と1.7%となった。

2. 硝化 本研究では、飼育初期に $\text{NH}_4\text{-N}$ の一時的な上昇が認められたが、この原因としては、硝化菌を含

む微生物相が安定状態に至っていなかったことが考えられる。その後についても、 $\text{NO}_2\text{-N}$ の上昇が認められたものの、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ とも連続的に増加することもなく、低濃度で維持されており、硝化機能には特に問題はなかったと考えられる。また、飼育実験-1を通じて摂餌が活発であったことから、これらの上昇がヒラメに重大な影響を与えることはなかったと考えられる。本研究の $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度範囲（130 mg-N/l）ではヒラメの生育には影響は見られなかった。500 gサイズのヒラメでは、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が400～500 mg/l以上になるまで換水をせずに飼育を続けると、体色が黒化して摂餌が不活発になる場合があること、ヒラメの幼魚を800～900 mg/l前後で2週間飼育した場合成長に影響が現れることが報告されている。⁹⁾ $\text{NO}_3\text{-N}$ の除去については、脱窒処理、^{14,15)}あるいは植物による吸収^{16,17)}などの方法を含めて今後の検討課題とする。

3. リン酸塩懸濁物の生成 閉鎖循環式システムの飼育水では、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は高濃度には蓄積しないことが報告されている。^{9,18)} $\text{PO}_4\text{-P}$ が一定濃度以上になると、海水に含まれるCaやMgと懸濁物を形成して溶液側から除かれるためと考えられ、海水中における平衡濃度は、6 mg-P/l¹⁸⁾から30～40 mg-P/l⁹⁾であるとされている。本研究においてもリン酸塩懸濁物が生成し、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が変化した可能性がある。そこで、海水中における $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の変化をpHとの関係から調べた。人工海水²⁾1 lに $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が100 mg-P/lになるように NaH_2PO_4 を添加し、0.1 Nの塩酸でpH 5.9に調製した。続いて、0.1 NのNaOH溶液によりpHを上昇させた際のろ液中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 Ca^{2+} 、および Mg^{2+} 濃度を測定した。その結果、pHが7以上で白色の懸濁が生じ、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 Ca^{2+} 、および Mg^{2+} の濃度が急激に減少した（Fig. 12-a）。また、pHと $\text{PO}_4\text{-P}$ の平衡濃度の対数値は、pH 7～10の範囲では直線関係（ $y = -0.647x + 6.58$, $r^2 = 0.991$, プロット数7点）を示した（Fig. 12-b）。このことから海水中では $\text{PO}_4\text{-P}$ の平衡濃度はpHに依存し、平衡濃度を越えると、 Ca^{2+} と Mg^{2+} と反応して懸濁物を生成することがわかった。本実験においても飼育水中で、これと類似した反応が生じ、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は60日目以降一定となったと推定できる（Fig. 8）。

4. Ca^{2+} と Mg^{2+} リン酸塩懸濁物の生成に伴って、海水中の Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 濃度の低下が予測されるが、飼育水中の Ca^{2+} と Mg^{2+} の濃度は、飼育実験を通して、それぞれ 369 ± 79 （平均±標準偏差, $n=5$ ）mg/lと $1,243 \pm 79$ （ $n=5$ ）mg/lであり、減少する傾向は見られなかった。この原因の一つとして、配合飼料からのCaとMgの供給が考えられる。すでに、武田ら⁹⁾も閉鎖循環式ろ過システムにおける長期間のヒラメ飼育にお

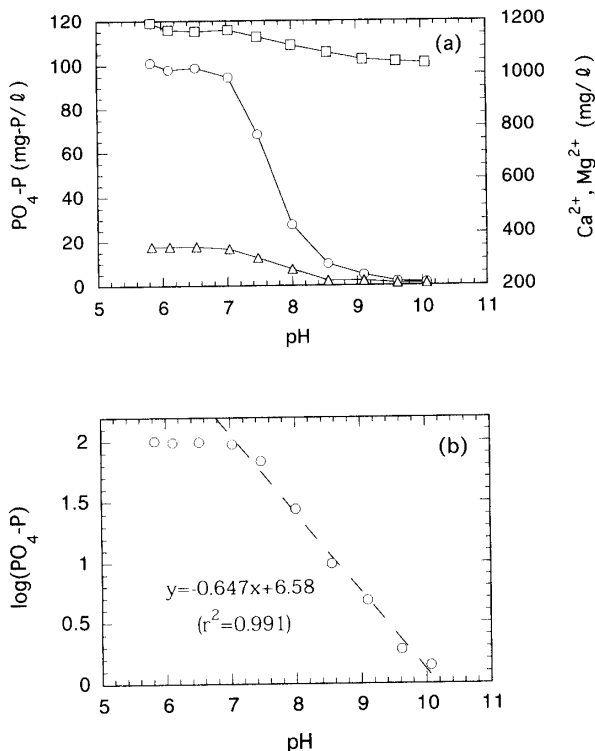


Fig. 12. (a) Effect of pH on phosphate (O), calcium (Δ) and magnesium (□) concentration, and (b) phosphate solubility in artificial seawater.

Initial phosphate concentration was 100 mg-P/l.

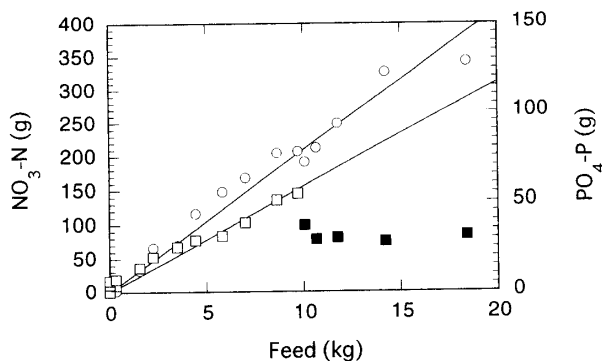


Fig. 13. Relationship of nitrate and phosphate to the cumulative amount of feed in the closed recirculating system.

O, NO₃-N; □, PO₄-P before 51 days; ■, PO₄-P after 51 days.

いて飼育海水の主要成分は変化しないことを報告している。

単位給餌量当たりのシステムへのNとPの負荷量

飼育実験-1における積算給餌量とNO₃-NおよびPO₄-Pの蓄積量の関係をFig. 13に示した。積算給餌量(x)とNO₃-Nの生成量(y)は高い相関を示し、その回帰直線は、 $y = 20.0x$ ($r^2 = 0.977$)となった。従って、給餌

した配合飼料1kg当たり20.0g-NのNO₃-Nの量が生成することになる。飼育実験-2における積算給餌量とNO₃-Nの蓄積量の関係は、 $y = 23.3x$ ($r^2 = 0.977$)となった。飼育実験-1における一日当たりの最大給餌量は795g(84日目)であった。飼育水のNH₄-NとNO₂-Nは、実験初期を除くと、それぞれ0.5mg-N/lと1mg-N/l以下であったことから、この際に発生したNH₄-NはほとんどがNO₃-Nに酸化されたと考えられる。前述の式から795gの飼料に相当するNO₃-Nは16gであり、従って、16gのNH₄-Nが酸化されたことになる。硝化槽に充填した担体の表面積が116m²、水槽や配管などの表面積が16m²であることから硝化槽のアンモニア酸化(硝化)速度は、0.12g-N/m²/day(∴16/132=0.12)と見積もられる。

沈殿が形成される以前と考えられる51日目までの積算給餌量(x)とPO₄-Pの蓄積量(y)の関係は、 $y = 5.84x$ ($r^2 = 0.949$)となった(Fig. 13)。従って、飼料1kg当たり5.84gのPO₄-Pが飼育水中に蓄積すると考えられる。飼育実験-2では、4.66g-P/kg-飼料となった。

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の提供を、水道機工(株)には活性炭の提供を賜った。ここに深く謝意を表します。

文 献

- 1) 丹保憲仁, 亀井 翼: 処理評価のための水質変換マトリックス(Ⅱ)好気性生物処理による有機物除去の予測と評価. 水道協会誌, **531**, 15-24 (1978).
- 2) APHA: Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 18th ed., APHA, Washington DC, 1992, pp. 8-11.
- 3) 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).
- 4) 合田 健: 水質工学基礎編, 丸善, 東京, 1975, pp. 134-136.
- 5) 日本水産資源保護協会: 水産用水基準1995年版, 日本水産資源保護協会, 東京, p. 19.
- 6) 丸山俊朗, 鈴木祥広, 河添 智, 土手 裕, 増田純雄: 凝集剤とタンパク質を併用した空気分散型凝集-泡沫分離法による海産赤潮プランクトンの直接回収. 水環境学会誌, **21**, 310-317 (1998).
- 7) 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).
- 8) 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).
- 9) 武田重信, 本田晴朗, 菊池弘太郎, 岩田仲弘, 清野通康: 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, **U90042**, 1-24 (1990).
 - 10) K. Hirayama, H. Mizuma, and Y. Mizue: The accumulation of dissolved organic substances in closed recirculation system. *Aquacult. Eng.*, **7**, 73-87 (1988).
 - 11) G. Otte, V. Hilge, and H. Rosenthal: Effect of ozone on yellow substances accumulated in a recycling system for fish culture. ISCS Fisheries Improvement Committee, **C.M. 1977/E: 27**, 1-13 (1977).
 - 12) S. Takeda and M. Kiyono: The characterization of yellow substances accumulated in a closed recirculating system for fish culture, in "The Second Asian Fisheries" (ed. by R. Hirano, and I. Hanyu), Asian Fisheries Society, Manira, 1990, pp. 129-132.
 - 13) 磯野良介, 伊藤康男, 木下秀明, 城戸勝利: シロギス卵・稚魚の生残に及ぼす海水オゾン処理の影響. 日水誌, **57**, 1527-1533 (1993).
 - 14) 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. *Suisanzoshoku*, **41**, 19-26 (1994).
 - 15) J. van. Rijin: The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture—A review. *Aquaculture*, **139**, 181-201 (1996).
 - 16) M. D. Krom, S. Ellner, J. v. Rijin, and A. Neori: Nitrogen and phosphorus cycling and transformations in a prototype 'non-polluting' integrated mariculture system, Eilat, Israel. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **118**, 25-36 (1995).
 - 17) A. Neori, M. D. Krom, S. P. Ellner, C. E. Boyd, D. Popper, R. Rabinovitch, P. J. Davison, O. Dvir, D. Zuber, M. Ucko, D. Angel, and H. Gordin: Seaweed biofilters as regulators of water quality in integrated fish-seaweed culture units. *Aquaculture*, **141**, 183-199 (1996).
 - 18) 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).