

(5) 養殖のクローズドシステム化に関する基礎的研究

— 浸漬ろ床および藍藻床による水管理 —

A STUDY ON WATER CLOSED SYSTEM FOR FISH AQUACULTURE
- WATER PURIFICATION WITH BIOFILTER AND BLUE-GREEN ALGAL BED -

竹内正美*, 深川勝之*, 村上定瞭*, 中西 弘**

Masami TAKEUCHI*, Masayuki FUKAGAWA*

Sadaaki MURAKAMI*, Hiroshi NAKANISHI**

ABSTRACT; There is a growing awareness to wastewater from fish aquaculture which is bearing rich nutrients. In this study, we investigated the nutrient stripping system with alga together with biofilter. This system consists of the following processes. (1) Animal metabolites are oxidized and converted into inorganic salts by aerobic bacteria with passing water through filter bed. (2) The inorganic salts and hydrogen ion are stripped by algal bed.

The following facts was found from the experimental results regarding freshwater aquaculture system for goldfish. (1) The blue-green alga, *Chroococcus sp.* is a phytoplankton best for this system because of peculiar sedimentation property for liquid-solid separation and of species stability in long use. (2) This purification system keeps water from the accumulations of inorganic salts and from the acidification, and the aquaculture system needs no or only small quantity of refreshing water into aquarium, resulting in no or little wastewater disposal. (3) The growing rate of fish body weight in this system was found to be twice of that in the system with only biofilter.

KEYWORDS; Aquaculture, Water closed system, Nutrients stripping, Biofilter, Blue-green algal bed.

1. はじめに

近年、生活排水や養殖の自家汚染¹⁾等を原因とする湖沼や内湾の富栄養化が進行し、アオコや赤潮による養殖の被害が多発している^{2,3)}。ところで、養殖を水の利用方法から分類すると、淡水魚については、池や沼に放養する方法、流水を利用する方法、浸漬ろ床を設置した循環式池を用いる方法などがある⁴⁾。海水魚類では、従来養殖の多くは内湾に生簀を設置して行われて来たが、最近一部の魚種では陸上に飼育池を設置して海水流入法や浸漬ろ床法を利用した養殖が行われるようになった。今後、アオコ・赤潮の被害や養殖の自家汚染を避けるためには自然の浄化作用を利用した池や沼での放養法や内湾での生簀法は、浸漬ろ床等を利用した循環池法に変換されるであろう。しかし、浸漬ろ床法を用いた循環式池法にも重大な欠点がある。この方法では、魚の排泄物や食餌の残さをろ床内の担体に付着した好気性微生物により酸化分解して魚に無害な物質に変換するが、この酸化分解生成物である栄養塩類が蓄積するとともに、pHの低下が起こる^{5,6,7)}。このため、新鮮な水を連続的あるいは定期的に補給しなければならないが⁷⁾、この時放流される水には多量の栄養塩類が含まれており環境保全の観点から問題となっている。従って、将来の養殖には、水の交換量を極力減少させるか、あるいは水交換を不要とするクローズドシステムの開発が望まれている。

そこで、本研究では水槽中に放出される魚の排泄物の処理法として、従来の浸漬ろ床法に加えて藍藻による処理法を導入し、水管理に関するクローズドシステムを検討した。浸漬ろ床では魚の排泄物である糞や尿の酸化分解を行い、藍藻床では浸漬ろ床処理により生じた栄養塩類と水素イオンの除去を行う。淡水を用い

* 宇部工業高等専門学校 Ube Technical College

** 山口大学工学部 Faculty of Engineering, Yamaguchi University

たベンチスケール実験ではあるが、藍藻による水処理の導入により栄養塩類の蓄積と pH の低下を防ぐことができ、養殖に使用する水のクロズド化が原理的に可能となったので報告する。なお、養殖系における水処理への微細藻類の導入については、Poxton⁸⁾により提案されていたが、具体的な研究例は見られない。

2. 実験方法

2.1 試験魚

試験魚として、金魚 *Carassius auratus* を用いた。この金魚は、購入した後、2週間程度別の水槽で飼育観察して健康なものを選んで実験に用いた。浸漬ろ床のみの養魚水槽には11尾、浸漬ろ床および藍藻床の水槽には22尾飼育した。

飼育開始時の金魚の平均体重は、浸漬ろ床のみの系では $2.16 \pm 0.82 \text{ g}$ (平均±標準偏差)、浸漬ろ床・藍藻床の併用系では $2.13 \pm 0.75 \text{ g}$ であった。飼育期間中浸漬ろのみの系で2尾死亡、浸漬ろ床・藍藻床系では1尾死亡、5尾を分析試験に供した。死亡の原因は特定できなかった。

飼育中の金魚の総体重増加量 W は、次の式により求めた。

$$W = \sum W_s + \sum W_d - \sum W_i$$

ここで、 W_s : 生存した魚の各体重、 W_d : 死亡した、または試験に供した魚の各体重、 W_i : 飼育開始時の魚の各体重。

2.2 給餌

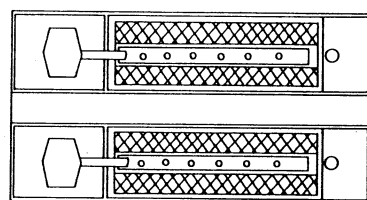
餌は熱帯魚・金魚用市販品(日本ペットフード製エンジェル、固形の浮餌)を用いた。餌は、1日3回(9:00, 13:00, 17:00の各前後)与えた。各回の投餌時間を15分として、この時間内に食べるだけの量を与え、食べ残しがないようにした。また、一度に多量の餌を与えると、この分量を食べ終わるまでに時間を要し溶解性成分の水槽への溶解量が多くなるので、少量ずつ分けて与え、食べ終わってから次の分量を与えた。

2.3 養魚水槽および浸漬ろ床

養魚水槽には、 5.0 d m^3 ($60 \times 30 \times 36 \text{ cm}$) のガラス製水槽を用いた。この上部に Fig. 1 に示すような市販品の下降流式浸漬ろ床(共和国産製サモアペット PM1800S)を2台設置した。循環ポンプの流量は $7.4 \text{ d m}^3 / \text{min}$ で、養殖系内の水の循環時間は6.8分である。ろ床のサイズは、 $35 \text{ (W)} \times 9 \text{ (D)} \times 8 \text{ (H)} \text{ cm}$ であった。それぞれのろ床には微生物担体として粒径4~6mmの玉砂利を 1.8 d m^3 充填した。この玉砂利は充填前に水道水で十分洗浄した。

新しく設置したろ床には微生物が存在しないので、正常に稼働している別の金魚の飼育水槽に設置したろ床内の玉砂利を容器に移し、水道水を加えて機械攪拌により砂利に付着した生物膜を剝離して、本実験に用いるろ床に移植した。この際、移植した微生物量を乾燥重量で求めた。

飼育開始後、微生物が増殖してろ床の圧力損失が増加し、Fig. 1 に示すろ床から水がオーバーフローし始めた時点(ヘッド差6.5cm)で、玉砂利を取り出して他の容器に移した。この容器に水道水を加えて機械攪拌して砂利に付着した生物膜を剝離除去し、洗浄水をメスシリンダーに移す。この操作を4~5回繰り返して、生物膜を完全に剝離した後、砂



Filter bed (1.8 dm³)

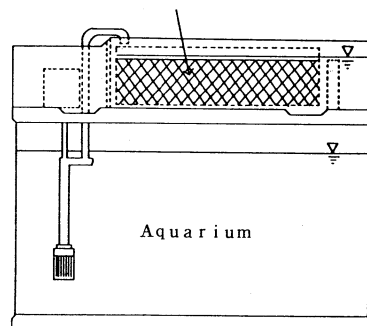


Fig. 1 Experimental fish aquaculture.

利をろ床に再充填した。

砂利の洗浄液は合計して総容積を求めた。養殖系内の生物量、窒素およびリンについて物質収支を求めるため、剝離した生物膜の乾燥重量ならびに、窒素およびリンの含有量を分析した。生物膜の乾燥重量は、洗浄液中のSS濃度を測定し、これに洗浄液の容積を乗じて求めた⁹⁾。窒素およびリンの含有量は洗浄液の一部をろ過して、スラッジを110℃で乾燥・粉末化して、ケルダール窒素および総リンを測定して求めた⁹⁾。

養魚水槽は空気ポンプおよび散気球を用いて曝気し、溶存酸素濃度を7~8mg/dm³に保った。この水槽の温度は25±0.5℃に保った。

2.4 藍藻

養殖系の水処理に用いる微細藻類に要求される特性として、次のような項目が挙げられる。

- (1) 魚に対して無害であること。
- (2) 魚の飼育量、餌の投与量や温度などの変動に対して安定であること。
- (3) 培養法が容易であること。
- (4) 固液分離性に優れていること。
- (5) 増殖率が高く、光の利用率が高いこと。
- (6) 藻類が魚の飼料の添加物あるいは有用物質を含むなど、利用可能なこと。

以上のような特性を持つ微細藻類を検討したところ、淡水用としては球形の細胞が群体を形成する藍藻 *Chroococcus* sp.¹⁰⁾ が適していることが分かった。この藍藻は上記(1)~(6)の全ての条件をほぼ満たしている。

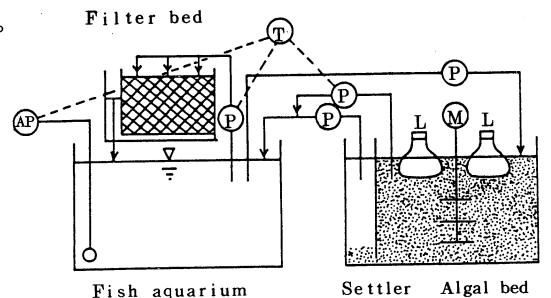
本実験で用いた藍藻は、宇部市内の農業用溜池の底泥を植種源として得られたもので、沈降分離槽を有する連続培養装置を用いて連続光照射下で、単藻培養されたものである¹⁰⁾。電子顕微鏡による所見では、この藍藻の細胞直径は2μmであり、群体の大きさ約100μmである。この藍藻は沈降分離性が極めて良好であり、この沈降・濃縮特性SVIは40程度で、標準活性汚泥のSVI(運転条件により異なるが、100以下が良好¹¹⁾)よりもはるかに優れている。

2.5 藍藻を導入したシステム

浸漬ろ床に藍藻床を加えたシステムの概要をFig. 2に示す。養魚水槽および浸漬ろ床は2.3で述べたものと同じものである。藍藻床は、養魚水槽と同じサイズのガラス製水槽内に2.4で述べた藍藻を植種して、光を連続照射して培養したものである。光照射は200W白色ランプ(東芝RF110V 180WHC)3個を培養槽に2/3ほど浸漬して行った。この藍藻床は、藍藻のフロックが微細に破壊されないように、12.5×15cmの板状の翼を用いて1rpmの速度で攪拌した。藍藻床の水温は投込式冷却器をオン・オフ制御して、この藍藻の最適増殖温度28℃¹⁰⁾に保った。

この浄化システムでは、養魚槽内水を浸漬ろ床内に通水して、魚の排泄物を好気性微生物により酸化分解して無機塩類に変換する。なお、魚の糞は、排泄直後には水槽の底に沈降するが、魚の探餌行為や遊泳行為により微細化され、浸漬ろ床の循環ポンプに吸引されて、ろ床内の生物膜に付着質化される。

次に、マイクロチューブポンプを用いて養魚槽の水を藍藻培養槽に注入して無機塩類を藍藻に摂取させる。培養槽の一部をPVCの板で仕切った沈降分離槽で藍藻を分離した後、上澄液を養魚槽に返送した。この循環量は、養魚槽と藍藻床の水が3日で1



AP: Air pump, P: Pump, T: Timer, L: Lamp

Fig. 2 Fish aquaculture system with biofilter and algal bed.

回交換する流量に設定した。藍藻床内の藻濃度は、毎日測定した。

金魚の餌として藍藻培養混合液を、1日1回タイマーに接続したチューブポンプを用い30分間で500cm³ほど養魚水槽に注入し、金魚に藍藻をほぼ完全に摂取させた。この培養液注入中およびその後の30分間は、タイマーを用いて空気曝気および浸漬ろ床の循環ポンプを停止した。これは、注入した藍藻が空気曝気により水槽内に拡散するのを防止するとともに、通水により浸漬ろ床に藍藻が捕捉されるのを防ぐためである。

2.6 水質分析

各水槽の分析項目は、溶存酸素、炭酸水素イオン、ケルダール窒素、アンモニア、亜硝酸イオン、硝酸イオン、リン酸イオンおよび総リンである¹²⁾。溶存酸素は隔膜型電極DOメーターを用いて測定した。炭酸水素イオンは滴定法によった。亜硝酸イオンおよび硝酸イオンは吸光光度法およびカドミウム還元法により分析した。他の項目は衛生試験法によった。

3. 実験結果

3.1 藍藻床

藍藻を他の連続培養装置より植種した後、藍藻床を養魚槽に接続してクロズドシステムを稼働した。システム稼働中の藍藻濃度の経日変化をFig. 3に示す。稼働開始後20日経過してから、増殖した藍藻を週に2~3回の割合で抜き取ったところ、

藍藻濃度が400~500 mg/dm³の範囲で維持された。藍藻の抜き取りは、次のようにして行った。培養混合液を1回に2.5 dm³採取、約30分間静置して藍藻を完全に沈降濃縮させる。上澄液をチューブポンプを用いて培養槽に戻し、沈降濃縮した藍藻は捨てる。藍藻床の藍藻濃度および混合液の抜き取り容量から、藍藻の抜き取り量を乾燥重量で求めた。

Fig. 3に抜き取りの累計量を示す。なお、この図の累計量には毎日餌として養魚槽に投与した藍藻も含まれる。

3.2 浸漬ろ床処理のみの水質

浸漬ろ床のみの処理による養魚槽内の水質の経日変化を、実験期間中の餌の積算投与量とともに、Fig. 4に示す。なお、実験期間中、水の交換は行っていない。ただし、蒸発による水分の減少量は水道水で補給した。

システムを稼働して、20日を経過するとpHが低下し始め、30日経過後はpHが5以下となっている。また、餌の投与量にはほぼ比例して硝酸イオンやリン酸イオンが増加している。

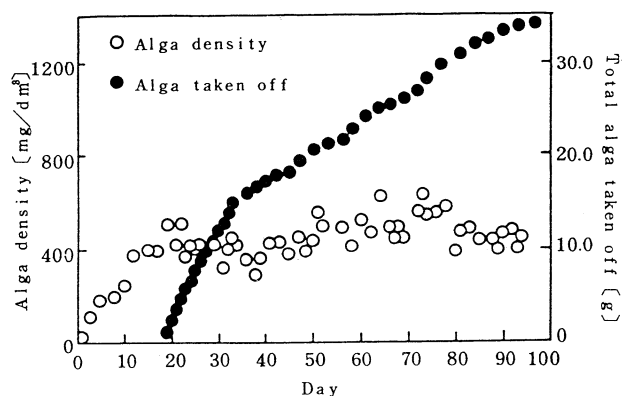


Fig. 3 Alga density in the bed and alga taken off from the bed.

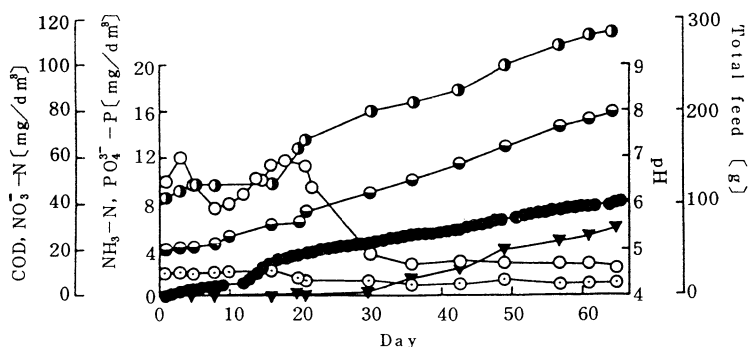


Fig. 4 Chemical change in the water of culture system with only biofilter.
●: NO₃⁻-N, ○: PO₄³⁻-P, ●: feed, ○: pH, ○: COD, ▼: NH₃-N

しかし、COD については、 6 mg/dm^3 前後ではほぼ一定に維持されている。また、pH が 5 以下に低下した 30 日以後では、アンモニアが少しずつ蓄積している。これは、pH の低下により硝化反応が抑制されたものと思われる。なお、pH の低下およびアンモニアの蓄積にもかかわらず、死魚の発現は認められなかった。

3.3 浸漬ろ床と藍藻床併用システム

浸漬ろ床および藍藻床処理を併用した養魚槽内の水質の経日変化を Fig. 5 に示す。このシステムでは、餌の投与量が約 3 倍であるにも関わらず、実験期間中 pH は中性に保たれている。また、COD やリン酸イオンの蓄積も認められない。さらに、pH が中性付近に維持されているため、硝化反応も良好に行われ、アンモニアの濃度は 0.1 mg/dm^3 以下に保たれている。

硝酸イオンについては、実験開始後少しずつ蓄積しているが、40 日を経過後蓄積の増加率が低下して 55 日以後は濃度がほぼ一定となり蓄積は停止している。

なお、システム稼働直後に、硝酸イオン 26.4 mg/dm^3 、リン酸イオン 1.54 mg/dm^3 存在し、さらに pH が 8.5 である。これは好気性微生物および藍藻の植種に由来するものとシステム稼働直前に藍藻床に栄養塩として

NaHCO_3 、 NaNO_3 および KH_2PO_4 を若干量添加したためである。

3.4 浸漬ろ床と藍藻床を併用したシステム内の物質収支

クローズドシステムの設計や評価に必要な養殖系内の物質収支について検討した。

Table 1 に物質収支の計算に必要な餌、魚、浸漬ろ床内の生物膜（バクテリア）、藍藻の分析値を示す。ベンチスケール（ウグイ、オイカワ）および屋外（コイ）における浸漬ろ床のみの養殖実験⁹⁾および藍藻の連続培養実験¹⁰⁾と同様な手法により、飼育開始後 60 日間における餌の積算投与量、飼育魚の総体重増加量、生物膜（バクテリア）の増殖量、藍藻の増殖量、養魚水槽・藍藻床内の無機イオンの蓄積量を求めた。これらの値と各分析値より窒素およびリンについての物質収支を求めた結果を Table 2 に示す。餌、魚の総体重増加量、バクテリア増殖量および藍藻増殖量の各生物量は乾燥重量換算で示す。金魚については、生きのまま各体重を測定し、3 尾の試験魚の水分含有量の平均値を用いて乾燥重量に換算した。

Table 1 Contents of nitrogen and phosphorus

	N(%)	P(%)
Feed	5.46	1.18
Goldfish	6.44	0.97
Biofilter sludge	5.48	4.29
Alga	6.64	0.72

Table 2 Mass balances

	Biomass(g)	N(g)	P(g)
Total feed	227.1	12.40	2.68
Fish growth	62.1	4.00	0.60
Sludge growth	37.9	2.08	1.63
Algal growth	37.8	2.51	0.27
Accumulation *	—	3.56	0.08
Unknown	89.3	0.25	0.10

* Accumulation in the culture water

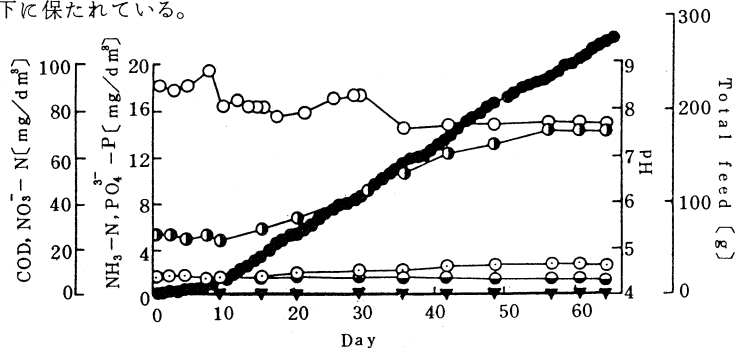


Fig. 5 Chemical change in the water of culture system with biofilter and algal bed.

●: $\text{NO}_3^- - \text{N}$, ○: $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$, ●: feed, ○: pH, ○: COD, ▼: $\text{NH}_3 - \text{N}$

Fig. 6 は飼育開始後60日間の物質収支を図式化したものである。

生物量については、次のようになっている。

2.2で述べたように固形の浮餌を食べ残しがないように与えた。

また、餌の溶解量を極力抑えるため少しずつ与えた。したがって、餌は一旦魚に100%摂取されるものと仮定すると、この内の27.3%が魚の体重増加分となり、残りは排泄物として放出される。排泄物の内、バクテリアの増殖分として16.7%移行し、藍藻の増殖分として16.7%取り込まれる。不明分が39.3%と多くあるが、この主な原因は魚および微生物（藍藻も含む）の呼吸反応により生じた炭酸ガスが全て藍藻の光合成反応に利用されなかったものと思われる。

次に、餌中の窒素については、魚の体重増加分として32.3%であるが、排泄されたものの内

16.8%がバクテリア、20.2%が藍藻の増殖分となっている。28.7%が水槽に残留しているが、これは藍藻がこのシステムに馴致する前までに蓄積した硝酸イオンである。

リンについては、魚の体重増加分として22.4%であり、排泄されたものの内、バクテリアに60.8%、藍藻に10.1%取り込まれ、水槽に3.0%残留している。これらの数値を見ると、リンのバクテリアへ移行が多いのは次の理由によるものと思われる。Table 1に示すように、生物膜（バクテリア）のリン含有量が他の項目と比較して極めて多い。生物膜の分析はろ床の砂利に付着したスラッジを機械攪拌剥離したものについて行ったが、このスラッジの中にはリン酸イオンが、鉄やマグネシウムなどと難溶解性塩を形成した固形分として、バクテリアのフロックとともに混在している。したがって、生物膜のリンの分析値は、バクテリアに含まれるリンと難溶解性塩を形成したリンの合計量である。浸漬ろ床によるリンの水中からの除去は、バクテリアに摂取されるものと難溶解性塩として生物膜に付着されるものの2つによるものと思われる。

3.5 魚の成長率

飼育開始時から130日後の魚の平均体重増加量（水分を含む）、1尾あたりの餌の平均積算摂取量および餌の魚への変換率について、浸漬ろ床のみと藍藻床併用の場合について比較した（Fig. 7）。平均積算摂取量Fは次の式より求めた。

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{N_i}$$

F_i : 飼育*i*日における摂取量

N_i : 飼育*i*日における魚の飼育数

また、餌の変換率（総体重増加量/餌の積算摂取量；乾燥重量換算）を、2つの養殖系について比較した。浸漬ろ床に藍藻床を併用した系では、浸漬ろ床のみの系よりも魚の体重増加量は約2倍である。一方、餌の

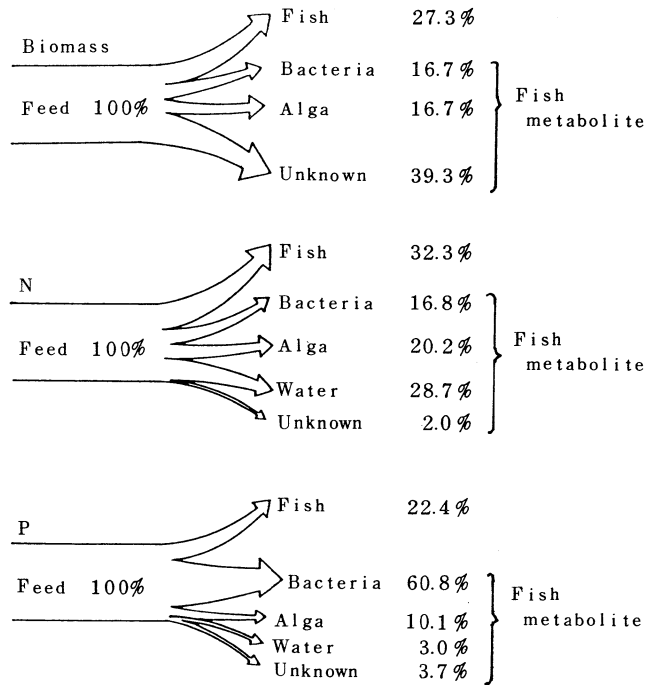


Fig. 6 Mass transformations in the culture system with biofilter and algal bed.

摂取量も約2倍多いが、餌の変換率はほぼ同じである。

このことから、藍藻床併用の系では生育環境が快適であり、食欲が増進されて成長率が高くなることを示している。また、金魚の体表の色艶は、浸漬ろ床のみでは薄いのに対して、藍藻床併用では濃く光沢が極めて良好であった。

4. 考 察

4.1 浸漬ろ床を用いた循環池法の問題点

3.2で述べたように、浸漬ろ床を用いた循環池においては、水の交換をしないで魚を養殖すると、ろ床内の好気性微生物による酸化分解生成物である硝酸イオンやリン酸イオンなどが蓄積するとともに、pHが低下する。また、pHの低下に伴い硝化反応が阻害されて、魚に極めて有害なアンモニアの蓄積が起こる。硝化反応速度の最大値はpH8付近にあり、一般にpH6以下では硝化は殆ど進行しない^{13,14}（本実験では、pH5以下でも硝化反応は進行したが、アンモニアの蓄積が認められた）。このため、一定の流量で連続的に、あるいは定期的に水の交換が必要である。この時放流される排水には多量の無機塩類が含まれている。

さらに、水交換をしないで連続運転を行うと、魚や微生物の排泄物に由来する生物学的に酸化分解できない中・高分子物質も、微量ではあるが少しずつ蓄積して水が褐色に着色してくる^{15,16}。これらの各蓄積物質の影響の程度は、魚種や魚の生育段階によって異なるが¹⁷、酸化分解生成物の蓄積やpHの低下は魚の成長を阻害し、さらに蓄積が進行すると魚の生存が不可能となる^{8,18}。また、今回の養殖系では1か月以上連続運転すると、藍藻の増殖速度が低下した。

生物学的に酸化分解できない有機物質は、オゾン処理によって微生物により代謝可能な物質に分解される¹⁹ことが知られている。今回は定量的な検討は行わなかったが、15Wの殺菌用紫外線ランプ（低圧水銀ランプTOSHIBA GRW-1512、主波長253.7nm）を用いて処理²⁰したところ、着色物質や難分解性の有機物の蓄積を防ぐことが可能であった。さらに、この処理により藍藻の増殖速度の低下も防ぐことができた。

4.2 微細藻類の導入とクローズドシステム化

自然界の水域においては、光合成プランクトンを第1次生産者として、食物連鎖が形成されている。この連鎖における高次生物の排泄物や死骸は、好気性バクテリアにより酸化分解され、その分解生成物である無機塩類を栄養源として光合成プランクトンが増殖する。この原理を導入したシステムが養殖のクローズトシステム化である。今回の研究の目的はこの食物連鎖の原理を利用した用水に関するクローズト化である。本プロセスでは餌を外部から養殖系内に投入し、系内で増殖する好気性微生物群（難溶解性塩類を含む）および藍藻は抜き取っているため物質に関してはクローズト系ではない。なお、好気性微生物群や藍藻を他の小動物に摂取させ、この小動物を餌として魚に投与する養殖系については、現在実験検討中である。

魚の排泄物が浸漬ろ床内の好気性微生物により酸化分解されて生成した栄養塩類を微細藻類に摂取させる。好気性微生物により窒素化合物が硝酸イオンに酸化分解される際に水素イオンが生じるが^{21,22}、硝酸イオンが藻類に摂取されて窒素化合物に同化される際に水素イオンを固定する²³。このような理由により、水の浄化法として、浸漬ろ床法に微細藻類による処理を加えることにより、無機塩類の蓄積やpHの低下を防ぐことができるので、水の交換が不要あるいは交換量を極力減少できる水管理に関するクローズトシステム

□ Body weight increase
▨ Feed taken up
▤ Feed efficiency

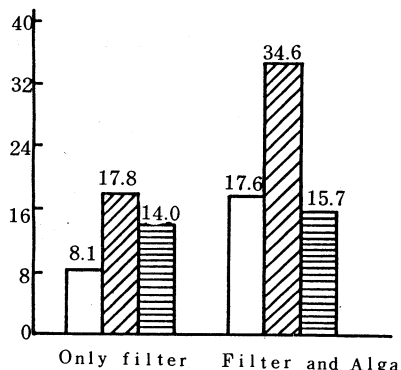


Fig. 7 Comparison of data for two culture system.

が原理的に可能となる。

4.3 藍藻の安定性

本システムを長期間連続運転しても *Chroococcus sp.* が安定して増殖し、他の種類の混入は認められなかった。これは、Fig. 2 に示すように藍藻床の混合培養液は沈降分離により固液分離を行うため、浮遊性の藻類は、養魚槽に送られて雑食性の金魚に補食されたり、浸漬ろ床の生物膜に付着資化されるため、このシステム内で増殖することが困難と思われる。一方、藍藻床のガラス壁等への付着性の藻類は、懸濁培養される *Chroococcus sp.* により光が吸収されるため、増殖することができない。また、大型の藻類は攪拌により機械的に分断破砕される。以上のような理由により沈降分離特性の優れている *Chroococcus sp.* のみが安定して増殖するものとする。

次に、本実験では試験魚として金魚を用いたが、この魚のエラはプランクトンのような微細な生物をろ過して食べるので、本システム内では原生動物はほとんど見られなかった。したがって、原生動物の捕食による *Chroococcus sp.* の減少は無視できるものと思われる。本システムより金魚を除き、スキムミルクを投与して長期間このシステムを稼働すると、ワムン類や糸ミズのような原生動物が多数発生することからも理解される。

4.4 藍藻床を併用したシステムの特徴と今後の課題

浸漬ろ床に藍藻床を導入したシステムでは、硝酸イオンやリン酸イオンなどの蓄積が抑制され、pH の低下もないことが分かった。また、pH も中性に保たれることから、浸漬ろ床内の硝化反応も正常に機能しアンモニアの蓄積も認められなかった。このシステムでは、魚の生育環境が良好に維持されるため、浸漬ろ床のみと比較して、金魚の成長率は2倍程度高い結果が得られた。

しかし、窒素とリンの摂取量にアンバランスが生じて、システム稼働後40日間は硝酸イオンの蓄積が起こった。この藍藻の連続培養における窒素およびリンの摂取速度の比率は約10:1¹⁰⁾であった。また、同じ組成の飼料を用いた淡水魚ウグイ、オイカワについての前回の浸漬ろ床のみの養殖実験⁹⁾ および金魚を用いた今回の浸漬ろ床のみシステムにおける窒素およびリンの水槽内蓄積量の比率も約10:1であった。藍藻床で増殖した藍藻中の窒素とリンの含有率の比率は約9:1である。これらの数値を比較すると、窒素およびリンについての藍藻の塩類摂取比率と系内の塩類比率はほとんど同じである。このことから考えると、リンは蓄積しないのに硝酸イオンが蓄積することは一見理解できない。しかし、藍藻の摂取量と系内の窒素およびリンのバランスが僅かでも不適切であると閉鎖系での蓄積量は積分値として現われるので、窒素とリンの挙動に大きな差が見られるものとする。しかし、50日を経過してからは硝酸イオンの蓄積も停止しており、藍藻の摂取量と系内の窒素とリンのバランスが適切に保たれている。藍藻の栄養塩類の摂取比率は前培養の履歴や増殖期などに依存することから²⁴⁾、長期間の運転により養殖系の塩類組成に馴致したものと考えられる。

次に、本実験では照射光源として200Wの白色ランプを3本固定して用いたが、魚の飼育量(餌の投与量)と必要光量の関係を調べ、物質収支のみでなく、光エネルギーを含めたエネルギー収支の観点からも藍藻床導入によるクローズドシステムを評価する必要がある。

実用的な観点からは、太陽光を用いたシステムの検討が必要である。また、本実験では養魚水槽および浸漬ろ床は25℃、藍藻床は28℃にそれぞれ水温を保った。太陽光を利用した屋外での系では、冬期には水温が低下し、浸漬ろ床内のバクテリアの活性や藍藻の増殖速度が低下する。屋外での浸漬ろ床のみのコイの養殖池では、冬期はエサを殆ど食べないので水質は安定に保たれている⁹⁾。しかし、藍藻床を導入した場合、日照時間が短く水温の低下する冬期間に藍藻を安定に維持できるかどうかについては検討が必要である。

さらに、本システムでは副産物として藍藻が大量に生産される。この藍藻の利用方法や藍藻に代わる有用植物の水耕栽培に関する検討も必要である。

5. 結 論

養殖による湖沼や内湾の富栄養化を防止するために、用水のクローズド化に関する基礎的研究を行った。本養殖システムでは、浸漬ろ床および藍藻床の併用により水処理を行う。この処理法は次のようなプロセスより構成される。

(1) 魚の排泄物を浸漬ろ床内の好気性微生物群により酸化分解して無機塩類に変換する。

(2) 無機塩類および酸化分解の際に生じる水素イオンを藍藻に摂取させる。

室内での実験結果より、次のような結論が得られた。

(1) 固液分離が容易で安定に増殖する淡水藻類として、藍藻 *Chroococcus sp.* が適している。

(2) 藍藻床の導入により魚に有害な無機塩類の蓄積と pH の低下が防止されるので、水の交換が不要あるいは交換量を極力減少させることが可能である。

(3) 浸漬ろ床のみの系と比較すると、藍藻床併用の系での魚の体重増加率は前者の約 2 倍であった。

本実験では藍藻床の光源として白色ランプを用いたが、今後太陽光を用いた屋外での実験とシステムの季節変動に関する検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) 日本水産学会編：“水産学シリーズ” 21 浅海養殖と自家汚染，恒星社厚生閣（1986）。
- 2) 農林統計協会編：“漁業白書”，p. 146，農林統計協会（1987）。
- 3) 岡市友利編：“赤潮の科学”，pp. 16-36，恒星社厚生閣（1987）。
- 4) 河本信之編：“養殖学総論”，p. 521，恒星社厚生閣（1967）。
- 5) K. Hirayama: Studies on Water Control by Filtration through Sand Bed in a Marine Aquarium with Closed Circulating System-VI. Acidification of Aquarium Water, *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, **36**, 26-34 (1970).
- 6) 河合 章，吉田陽一：循環ろ過式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，日本水産学会誌，**30**，55-62 (1964)。
- 7) A. Saeki: The Composition and Some Chemical Control of the Sea Water of the Closed Circulating Aquarium, *Bull. Mar. Biol. St. Sasanuchi, Tohoku Univ.*, **11**, 99-104 (1962)。
- 8) M. G. Poxton and S. B. Allouse: Water Quality Criteria for Marine Fisheries, *Aquacultural Engineering*, **1**, 153-191 (1982)。
- 9) 竹内正美，深川勝之，中西 弘，村上定瞭：養殖・蓄養水槽の浄化装置用微生物担体に関する研究—多孔質セラミックス担体について，水処理技術，**29**，555-560 (1988)。
- 10) 村上定瞭，深川勝之，中西 弘：藍藻の連続培養と栄養塩類の代謝速度に関する研究，衛生工学研究論文集，**24**，13-23 (1988)。
- 11) 井出哲夫：“水処理工学—理論と応用”，pp. 224-228，技報堂（1976）。
- 12) 石川宗孝，中西 弘：好気性脱窒に関する基礎的研究，環境技術，**8**，1059 (1979)。
- 13) J. L. M. Enrique, M. Asce and W. K. Shieh: Diffusion and Reaction in Biological Nitrification, *J. Environ. Eng. Div.*, **EE4**, 655-673 (1979)。
- 14) F. S. Richard and A. Baggaley: Kinetic Response of Perturbed Marine Nitrification System, *J. Wat. Poll. Cont. Fed.*, **47**, 472-486 (1975)。
- 15) K. Hirayama, H. Mizuma and Y. Mizue: The Accumulation of Dissolved Organic Substances in Closed Recirculation Culture Systems, *Aquacultural Engineering*, **7**, 73-87 (1988)。

- 16) 男成妥夫, 山形陽一: 養殖池の有機性汚濁指標としての紫外吸収スペクトルの応用, 水処理技術, **21**, 215-220 (1980).
- 17) K. Hirayama: Water Control by Filtration in Closed Culture Systems, *Aquaculture*, **4**, 369-385 (1974).
- 18) J. Colt and G. Tchobanoglous: Evaluation of the Short-term Toxicity of Nitrogenous Compounds to Channel Catfish, *Ictalurus Punctatus*, *Aquaculture*, **8**, 209-224 (1976).
- 19) H. Rozenthal, G. Kruner and G. Otte: Effect of Ozone Treatment on Recirculating Water in a Closed Fish Culture System, *ICES, Mariculture Committee*, **CM 1978F**, pp. 9-16.
- 20) 竹内正美, 深川勝之, 村上定瞭, 中西 弘: 海産魚介類の備蓄水槽と浄化装置の設計と維持管理: 水処理技術, **30**, 221-232 (1989).
- 21) 村上定瞭, 石川宗孝, 中西 弘: 生物学的脱窒素反応の高効率化に関する研究 (I) - 生化学反応のモデル化と動力学的取り扱い, 環境技術, **13**, 274-279, 413-417 (1984).
- 22) J. F. Wickins: Organic and Inorganic Carbon Levels in Recycled Seawater During the Culture of Tropical Prawns *Penaeus* sp., *Aquacultural Engineering*, **4**, 59-84 (1985).
- 23) 西澤一俊, 千原光雄編: “藻類研究法”, pp. 549-563, 共立出版 (1979).
- 24) S. W. Chisholm. and R. G. Stross: Phosphate Uptake Kinetics in *Euglena Gracilis* (Z) (Euglenophyceae) Grown on Light/Dark Cycle - I. Synchronized Batch Cultures, *J. Phycol.*, **12**, 210-217 (1976).