

総 説

養魚排水の現状と水域への負荷—クローズド化への展望—

丸山俊朗, 鈴木祥広

(1997年7月22日受付)

The present state of effluent control in Japan and
pollutant load from fish culture to environment
—Possibility of intensive recirculating fish culture systems—Toshiroh Maruyama*¹ and Yoshihiro Suzuki*¹

平成5年11月, 昭和42年に公布された公害対策基本法を廃止して, 環境基本法が制定された。環境基本法の基本理念は, 環境への負荷の少ない健全な経済の発展を図りながら, 持続的に発展することのできる社会を構築し, 地球環境問題についてはわが国がその能力に応じて国際協調のもとに積極的に推進することである。¹⁾

環境基本法が制定された大きな理由の一つは, 過去の一時期のような環境水の汚濁の進行がみられなくなったものの, 生活排水による水域の富栄養化などの生活型環境問題および農薬やハイテク関連化学物質のように日常生活や産業活動の基本的要素に起因する部分が多くなってきたためである。なかでも水道水源, 特に湖沼の水質が改善されず, 健康への影響が心配されるに至っている。海域, 河川, 湖沼の環境基準達成率(環境基準達成水域数/環境基準当てはめ水域数)は, 過去約10年間ほとんど改善されておらず, 平成5年度では, それぞれ79.5%, 77.3% および46.1%であった。特定事業場(後述)は排水基準を遵守し, 下水道普及率54%(平成9年3月)を越えたにもかかわらずである。

一方, 最近の環境の保全に係わる考え方が著しい変革期に入った。平成8年10月, 国際標準化機構(ISO)は環境管理に関する一連の国際規格(ISO-14000シリーズ)の根幹である「環境管理システム規格」と「環境監査規格」を制定し, これを「JIS14000シリーズ」として日本工業規格に仲間入りしたからである。環境ISOとは, 企業に環境管理システムを導入させ, 規格に適合していれば, 環境を配慮した認定企業として「認証」を与えるというものである。企業の目標は, (1)流出物および放出物を削減し, (2)材料および製品のリサイクルならびにリサイクル製品の使用を増加し, (3)不測の放

出物を削減し, (4)エネルギー消費を削減し, (5)水の消費量を削減することである。²⁾ 環境ISOの積極的利用が生き残れる企業の条件と言われている。

現行の養殖形態は網生け養殖や溜池養殖を含む流水型の「開放型養殖」と飼育水を処理しつつ循環し, 一部換水を伴う「循環型養殖」に大別される。いずれの養殖方式においても環境に配慮した負荷削減対策の程度は低いといわざるを得ない。一方で養殖排水が公共用水域への栄養塩の少なからぬ供給源になっているのではないかとみられ始めてきた。³⁾ 高密度循環型養殖(以下, 循環型養殖)は負荷削減対策の有力な選択肢の一つである。循環型養殖システムの研究は, 主に北西ヨーロッパと北アメリカで過去10年ほどの間に急速に進められてきた。⁴⁾ 多くの国で高濃度の硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)を含む排水が環境上および健康上の理由で規制されている。養殖排水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度基準は, 国によって異なるものの, ヨーロッパ共同体指令では11.6 mg $\text{NO}_3\text{-N/l}$ の低さである。⁵⁾ このような内外の動向からも, わが国においても養殖排水について早急に調査を進め, 対策をたてる必要があると考えられる。

そこで, 平成8年10月8日, 日本水産学会水産環境保全委員会主催の平成8年度第1回研究会「環境保全のための養殖場のクローズド化」において報告した「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—」の内容に加筆して, (1)排水基準からみた養殖排水, (2)養殖排水の実態と負荷, (3)循環型養殖の国際情勢, について整理しておくこととしたい。

しかしながら, 特に海産魚類養殖に関する資料が極めて少ないのが実状である。実用レベルの循環型養殖は淡水魚にかなり限られるが, 将来展望として海産魚の養殖

*1 宮崎大学工学部 (Department of Civil and Environmental Engineering, Miyazaki University, Miyazaki 889-2192, Japan).

にも循環型養殖の視点が大切であり、そのシステムの考え方は淡水魚の循環型養殖技術から得ることが多いと考えられる。

1. 排水基準からみた養殖排水

1.1 最近の水道水に係わる状況

養殖排水による負荷がそれぞれの水系に対してどの程度の寄与度なのか定かでないが、問題になる負荷物質は富栄養化の原因物質である窒素とリンであろう。なかでも水道水源は河川や湖沼である場合が多く、植物プランクトンの異常増殖による水道被害には濾過閉塞、異臭味、着色、生物の混入、トリハロメタン生成の前駆物質の生成などがある。処理費用の増大もさることながら、健康被害が心配されていて、とりわけ異臭味とトリハロメタンの被害は深刻である。異臭味の被害は平成2年には2,000万人を越え、発ガン物質と疑われている総トリハロメタン濃度（基準値0.1 mg/l）の最大値の高い水道事業数は、平成6年度で約1,200事業のうち94に達した。⁶⁾ 総トリハロメタン濃度とはクロロホルム（CHCl₃）など、避けられない塩素消毒によって生成される4種類の化合物濃度の総和である。

養殖に関連すると考えられる水質規制関連の法令には、環境基準（平成5年制定）、改訂水質汚濁防止法に基づく排水基準（平成5年改訂）、湖沼水質保全特別措置法（平成6年制定）、琵琶湖の富栄養化防止に関する条例（昭54年）、河川法（昭和39年、近く改訂予定）、水道法（昭和32年）、水道水源保護条例（昭和63年頃より多くの地方公共団体が制定）、水道原水水質保全事業の実施の促進に関する法律（平成6年）、特定水道利水障害の防止のための水道水源水域の水質の保全に関する特別措置法（平成6年）などがあり、⁶⁾ 環境基本法の制定に基づく改訂と水道水源の水質悪化防止と改善を目的としたものが多い。

1.2 養殖排水の規制の可能性

排水規制の対象は、特定事業場から公共用水域に排出される水および地下に浸透する水（特定地下浸透水）である。特定事業場とは、水質汚濁防止法の規制対象となる事業場であり、特定の施設を設置する工場または事業場のことである。特定施設とはある程度以上の有害性物質やBOD₅（以下、BOD）やCOD_{Mn}（以下、COD）発現物質を含む汚水または廃液を排出して、生活環境の被害を生じるおそれのある政府の定める施設のことである。排水基準は1日排水量が50 m³以上の特定事業場に適用されている。

現在、養魚場は特定事業場に指定されていない。しかし、指定された場合に規制の対象になる水質項目とその濃度は、BOD（最大濃度、160 mg/l、日平均濃度 120

mg/l、以下、同じ）、COD（160, 120）、SS（200, 150）、全窒素（TN）（120, 60）、全リン（TP）（16, 8）であろう。この基準値は暫定基準値である。

平成5年8月、環境庁長官は排水基準に係る窒素またはリンが植物プランクトンの著しい増殖をもたらすおそれのある湖沼および海域を定めた。窒素に係る湖沼はベケレット湖など77湖沼、リンに係るそれは全国のはとんどの湖沼である。窒素とリンの両者の係る閉鎖性海域は函館湾など88海域に達する。

国はこれらの湖沼と海域のうち、河川を含めて、環境基準の水域の類型を指定している。河川では北上川など32水系がBODで6類型の指定が行われている。湖沼では霞ヶ浦など48湖沼がCOD、TNおよびTPで類型指定され、各湖沼ごとに1類型指定である。CODでは4類型、TNとTPは5類型をとっている。海域では東京湾など9海域が指定され、指定水質項目は従来からのCODのみの3類型に加えてTNとTPの類型が指定された。さらに、英虞湾や浜名湖など18の湾や海域について県がTNとTPの類型を指定している。

例えば、霞ヶ浦のCODは<3 mg/l、TNは<0.4 mg/l、TPは<0.05 mg/lであるが、達成困難のため暫定目標値が定められている。

国はこのような指定水域の水質をもとに、年12回の測定値から達成率（前述）を求めて公表している。海域、河川、湖沼の平成5年度の達成率は、前述のとおりで、過去10年前と比較すると、海域ではほとんど改善されておらず、河川では14%改善され、湖沼ではわずかに改善されたにすぎない。

このように、特定事業場からの排水の濃度規制のみでは環境水の水質改善が進まないところから、水質規制制度が導入された（昭和53年）。この制度は、水質環境基準の達成が困難な閉鎖性水域の水質汚濁に係のある地域の汚濁負荷量の総量の削減を目的としている。都道府県知事が総量削減計画を定め、特定事業場以外の排出源についても必要な指導をすることができることになっている。この対象として、未規制業種・小規模工場排水（50 m³/日未満）、小規模生活排水（501人槽未満のし尿浄化槽）、養殖漁場、畜産排水、その他となっている。¹⁾ したがって、養殖場からの負荷がそれぞれの水系における寄与度が高い場合には、総量規制制度によって、知事の指導・助言・勧告を受けることになろう。

1.3 水産行政サイドの対応

水産サイドでは既に終了した事業も含めて次のような事業が進められている。内水面養殖における排水対策事業⁷⁾として2事業があり、(1)「内水面漁業関係の施設整備事業」では給排水処理施設、廃棄物処理施設および用水再利用施設などを対象に漁業関係の環境問題等に対処

している。しかし、整備実施例は少ない。この理由は受益者負担金が多いことや事業体の構成人数に制限があるためである。(2)「養魚堆積物適正処理技術開発事業」では、養魚池から排出される残餌や糞等の堆積物の処理法について平成6年度から3年計画で事業を進めている。この事業では、養殖業者が経済的に採用できる、すなわち施設費と運転維持管理費の低い施設の確立を目指している。想定されることとして次のことがらが考えられる。①できるだけ池に堆積物が出ない方法として、餌の改良、給餌方式の改善が、②堆積物を処理する方法として、機械的処理、池の構造の改善、生物学的または物理・化学的な窒素とリンの処理が、また③副産物の処理法として堆積物の肥料への活用や水の再利用が考えられている。

海面養殖における環境対策事業⁸⁾として、既に完了した事業も含めて4事業が行われている。(1)「養殖ガイドライン作成検討調査(平成4~6年)」では、主として適正収容密度に重点をおいた指導を行うための検討を行い、(2)「給餌養殖緊急対策調査(平成5~6年)」では、養殖漁場の水質データを解析し、データベース化して共用できるようにし、(3)「養殖漁場適正配置モデル実証事業(平成5~10年)」では、養殖漁場の環境の変動・改善等を予測するシュミレーションモデルを活用して養殖施設の配置と有効性を実証し、(4)「養殖堆積物処理技術開発事業(平成6~8年)」では、養殖漁家が経済的に対処し得る適切な処理技術を開発するため、既存資料の収集および養魚堆積物の実態調査に基づいて技術開発を行っているが有望な方法は見いだされていない、とされている。

2. 養殖排水の実態と負荷量

ここでは、コイとニジマスなどの開放型養殖とウナギの循環型養殖について試算した負荷量と海面養殖の負荷量の例を示す。

2.1 窒素とリンの負荷量、負荷原単位とその人口当量

コイを供試魚として人工飼料を与えた場合の全窒素(TN)と全リン(TP)の負荷量の例を図-1⁹⁾と図-2⁹⁾に示す。1kgの飼料の粗蛋白質含有量を40%とすると、TN含有量は64.0gである。体外への排泄量は64%(41.0g TN)である。損失飼料を含めた溶出TN量は60%(38.4g TN)に達する。糞と損失飼料を速やかに回収して溶出成分がないものとすれば、排泄される総窒素と損失飼料の合計が65%で、このうち32.2%が回収され、67.7%が環境水に排出される。糞からの溶出を許せば9.1%しか回収できず、90.9%が排出されることになる。

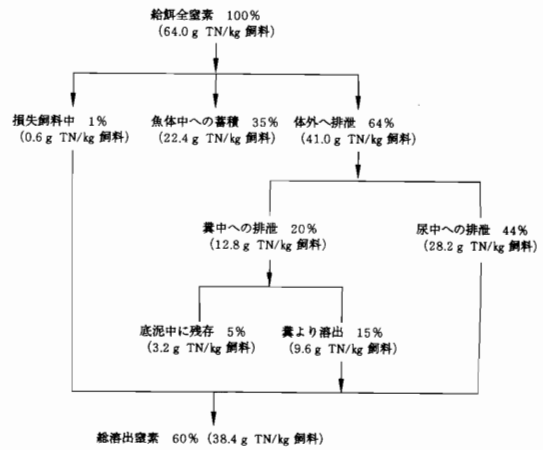


図1 人工飼料を用いたコイにおける窒素の収支⁹⁾

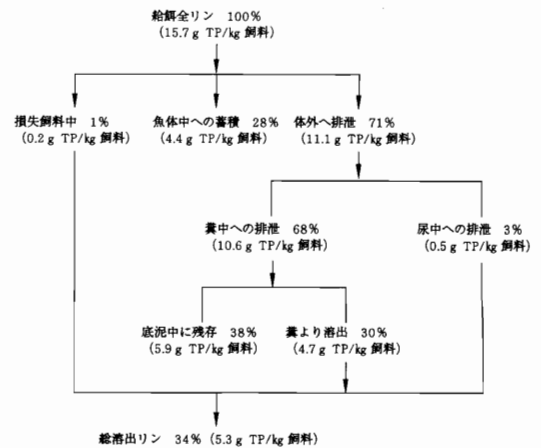


図2 人工飼料を用いたコイにおけるリンの収支⁹⁾

TPの負荷量は、TNの場合と同様に試算すると、体外への総排泄量は給餌TPの71%で、このうち68%は糞として排泄され、68%のうち30%が溶出する。溶出しないうちに回収すれば、排泄される総TPの95.8%が回収され、わずか4.2%しか環境水に排出されない。糞からの溶出を許したとしても55.0%を回収できる。

海産魚の場合も生餌を用いた場合、投餌したTNのうち溶出TN量は $(55 + \alpha)\%$ (α は糞と残餌からの溶出量)とされ、¹⁰⁾損失飼料が少ないとすれば、TNとTPの溶出量は、淡水魚の場合と同程度と推測される。しかしながら、坂本¹¹⁾の尾鷲湾における1976年11月の養殖ハマチ量(1,890トン)に対する給餌(屍魚)量(145.6トン)から推算したTNとTPの負荷量を基に、単位養魚当たりの負荷量を求めると、それぞれ1,440 g-TN/トン-魚と290 g-TP/トン-魚と試算され、表-1

表1 養魚の負荷原単位

魚種	COD (g/kg-魚・日)	BOD (g/kg-魚・日)	TN (g/kg-魚・日)	TP (g/kg-魚・日)
ニジマス	0.5	1.0	0.2~1.0	—
ウナギ	0.2~0.7	1.0	0.4~1.0	—
アユ	1.3	1.6	1.8	—
コイ	1.0~1.5	—	0.3~0.5	0.06~0.13
コイ (網イケス)	180~260 (g/kg-生産量)		60~90 (g/kg-生産量) ↓ 0.3~0.45 (g TN/kg-魚・日)	10~20 (g/kg-生産量) 0.05~0.1 (g TP/kg-魚・日)
平均 (淡水魚の負荷原単位)	—	1.2	0.77	0.11

のそれぞれ1.9倍と2.6倍になる。坂本の試算値が過大であるとしても海面養殖の負荷量は淡水魚養殖の場合よりもかなり大きいようである。

養殖の負荷原単位(単位重量の養魚が1日に排出する物質質量)と人口当量(養魚の排出負荷量を人口に置き換えた値)を求めてみよう。表-1は、淡水養魚の2,3の例から得られた負荷原単位⁹⁾に筆者が一部加筆したものである。淡水魚の平均的なBOD, TNおよびTPの原単位は、それぞれ1.2 g/kg-魚・日、0.77 g-TN/kg-魚・日および0.11 g-TP/kg-魚・日と試算される。これを図-1と図-2の値と比較する。1 kgの魚に1日当たり体重の2%の給餌をすると、TNの排泄量は図-1から0.81 g/日となり、表-1の原単位0.77 g-TN/kg 魚・日に近い。同様に、TPでは0.11 g-TP/日が得られ、表-1と全く同じになる。

一般に、工場排水や畜産排水などの負荷量は人口に置き換えて比較される。人の原単位をTNでは12 g-TN/人・日、TPでは1.8 g-TP/人・日、BOD₅では50 g/人・日¹⁰⁾とすると、淡水養魚1トンの人口当量は、表-1からTN負荷量が770 g-TN/トン-魚・日であるから、64人/トン-魚となる。同様にリンでは61人/トン-魚、BOD₅では24人/トン-魚と試算される。すなわち、1トンの養魚は、TNでは、ひと64人の1日のし尿と雑排水(台所や風呂などからの排水)に含まれるTNの排出量に相当する。1,000トンの養魚は実に64,000人分の負荷量に相当する。

2.2 養魚排水の負荷量の例

表-2は、コイ、ニジマスおよびウナギ養殖場からの排水の平均的水質であるが、水産庁の調査結果¹³⁾を基に筆者がまとめたものである。調査例が少ないので、一例としてみて頂きたい。このような水質の実態調査例は初めてのものであり、対策を考える場合に非常に貴重な

ので、今後のデータの蓄積が期待される。

ニジマス養殖排水の水質はいずれの項目においても最も低い。排水量が多い。これに対して、ウナギ養殖における換水時の排水の水質はいずれの項目においても最も高く、特にTNとTP濃度は一律排水基準(TN日最大120 mg/l, TP 16 mg/l)を越えている。

排水の負荷量を考える場合、濃度のみでは負荷量を把握できない。表-3は、濃度と水量から負荷量を養魚1トン当たりの負荷量に換算し、さらにこれを人口当量の換算したものである。SS負荷は、人口当量でみると、コイとニジマスで高いが、ウナギでは極めて低い。ウナギ排水のSS濃度は高いが、排水量が少ないためである。コイとニジマスのBODの人口当量はTNやTPの場合よりも低いことがわかった。3魚種のTNとTPの養魚1トン当たりの負荷量(人口当量)は、養殖形態が異なるにもかかわらず、ウナギのTN負荷量が1/2強であることを除くと、ほぼ同じ人口当量で約80人とみられる。表-1から得られた養魚1トン当たりTNの人口当量64人、TPの人口当量61人より約20%高い。この理由は明らかでないが、表-3の負荷量の範囲から養殖場によってかなり異なることから、給餌率や管理に相当の違いがあるためと考えられる。ウナギのTN負荷の人口当量がコイやニジマスの場合の1/2強であるのは、水温が高いことも寄与して、脱窒が活発なためではないかと思われる。いずれにしても、魚種と養魚形態に関係なく、養魚1トンのTP負荷量が0.13-0.17 kg/日であり、人口当量で74-95人のほぼ一定であることが明らかになった。さらにデータを蓄積すればもっと代表性の高い数値が得られよう。より正確な単位養魚当たりの負荷量が得られれば、養魚の現存量から管理の適正さが判断でき、負荷量も容易に推定できる。

表2 コイ(溜池), ニジマス(流水), ウナギ(循環) 養魚場排水の平均水質

	池面積 or 流量 (ha) (m ³ /d)	収容密度 (t/ha) or (%)	SS (mg/l)	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	TN (mg/l)	TP (mg/l)
コイ (n=2 池)							
平均±偏差	15.3±1.5 (ha)	7.6±3.3 (t/ha)	18.5±8.8	4.5±1.2	8.1±3.8	3.69±0.6	0.208±0.112
平均値の範囲	(13.8-16.7)	(9.7-27.2)	9.7-27.2	3.3-5.6	4.3-11.8	3.09-4.28	0.096-0.320
測定値の範囲			8.2-37.5	2.6-6.8	3.2-13.1	2.52-4.84	0.072-0.582
ニジマス (n=5 池)							
同上	36,100±38,700 (m ³ /d)	0.069±0.036%	3.5±1.3	2.9±0.6	—	2.59±1.26	0.11±0.05
	(9,500-111,000)	(0.015-0.111)	1.2-5.1	2.2-4.1		1.84-4.89	0.05-0.19
			0.7-8.0	0.9-4.9		1.14-4.99	0.04-0.23
ウナギ (n=2 池)							
同上	370±120 m ³	1.09±0.36%	55±30	—	16±4	135±15	29±3
	(250-490)	(0.73-1.44)					
			25-85		12-20	120-150	26-32

(): 範囲

コイ溜池採水日: H7.7.11, 7.24, 9.26, 11.28-29, 採水回数: 各1回

ニジマス養魚場排水採水日と回数: H6.12.12, H7.1.15, 1.11, 1.19, 2.1, 採水回数: 各5回

ウナギ養魚場排水採水日と回数: H7.9.12, H7.9.25, 2池について各1回

表3 コイ(溜池), ニジマス(流水) ウナギ(循環) 養魚場からの負荷量とその人口当量

	SS	BOD	COD	TN	TP
コイ (n=2 池)					
平均単位養魚あたり負荷 (kg/魚-トン)	8.9±8.0	1.8±1.5	3.38±2.60	0.93±2.60	0.13±0.12
範囲	0.89-16.9	0.26-3.27	0.78-5.97	0.176-1.68	0.00589-0.260
平均単位養魚当たり人口等量 (人/魚-トン)	234±211	35±30	125±96	78±63	74±71
範囲	23-445	5-65	29-221	15-140	3-144
ニジマス (n=5 池)					
平均単位養魚あたり負荷 (kg/魚-トン)	4.6±1.8	2.9±1.8	—	0.92±0.59	0.17±0.12
範囲	1.8-6.3	1.3-6.3		0.39-1.71	0.065-0.161
平均単位養魚当たり人口等量 (人/魚-トン)	121±48	58±36	—	77±49	95±66
範囲	47-166	26-126		32-143	36-222
ウナギ (N=2 池)					
平均単位養魚あたり負荷 (kg/魚-トン)	0.068±0.25	—	0.072±0.028	0.57±0.03	0.14±0.02
範囲	0.043-0.092		0.044-0.10	0.54-0.60	0.12-0.16
平均単位養魚当たり人口等量 (人/魚-トン)	1±1	—	3±1	47±3	77±12
範囲	1-2		2-4	44-50	65-89

人の原単位 (g/人・日)¹¹⁾: SS 38, BOD 50, COD 27, T-N 12, T-P 1.8.

コイ溜池採水日: H7.11.29, H7.11.29, 採水回数: 各1回

ニジマス養魚場採水日: H6.12.12, H7.1.5, H7.1.11, H7.1.19, H7.2.1 の8時から16時間の間の各5回

ウナギ養魚場採水日: H7.9.12, H7.9.25, 採水回数: 各1回

3. 循環型養殖の国際情勢

循環型養殖システムの研究は北西ヨーロッパ（デンマーク、オランダ、ドイツ、ノルウェー）、北アメリカ、イスラエル、および日本で進められてきた。

循環型養殖システム開発のニーズは、西欧では①天然水の汚染と工業用水需要の増加による用水不足、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⁴⁾である。また、開放型養殖システムの場合に比較して、次のような利点が考えられるためでもある。①揚水エネルギーの節約、②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、⑤高齢者労働力の活用など。本格的に実用化されている例は多くはない。その理由は最近までは開放型養殖システム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るためであった。しかし、現時点ではシステムが著しく改善された。¹⁶⁾

循環型養殖システムの主プロセスは物理的固形物除去とNH₄-Nの硝化のための生物学的処理であるが、それぞれに幾つかの方法があるためにシステムは多様である。Rijin はよりニーズに合ったシステムを構築するため、循環型養殖に関する研究論文130編を整理して、問題点を指摘し、今後の研究課題を提案した。⁴⁾ここでは代表的なシステムを紹介して利点と問題点を整理することとした。

3.1 人工池による水処理法^{4,15)}

養魚排水の処理を目的とした人工池を組み込んだ伝統的な循環型養殖法は、東南アジアで増加している。この方法を改良した高密度循環型養殖法は、台湾、イスラエル、シンガポールで採用されている。しかし、詳細な水質の研究例は極めて少ない。管理の要点は、①高密度養殖と処理用の人工池の滞留時間の最適化、②処理用人工池の適切な混合、③水抜きによる底質の定期的曝気であるが、欠点は植物プランクトン密度の変動による浄化の不安定さにある。

Ngらの調査したシステムは、養殖池（44,500 m³）、砂利ろ過槽（100 m³）、および植物プランクトン培養池（2,160 m³）から成り、一日換水率8%、収容密度0.13 kg/m³（コイなど5魚種の混養）で運転され、水質はNH₄-N 0.31 mg/l、NO₂-N 0.045 mg/l、DO 6.15 mg/lとされている。このような条件における大腸菌添加試験では、添加密度11,000 MPN/100 ml（MPNは最確数）が600 MPN/100 mlに減少している。

循環型養殖では病気の問題がほとんど取り上げられていない。この理由は、上述の大腸菌添加試験における添

加した大腸菌の急速な減少は、安定した生態系に特定の細菌類が加えられても、共存・増殖できず、換水率が低いために外部からの侵入の頻度が低いためと考えられる。

このような方法は熱帯地域では、最も経済的で、有用であるとされている⁴⁾が、わが国のウナギ養殖排水の処理にも適用できると考えられる。その際、酸化池による下水処理技術の導入は処理能を高めると思われる。

3.2 「固形物除去・硝化・酸素供給」システム

このシステムは最も広く研究され、実用化されている。諸外国では、ウナギ(European eel, *Anguilla*)^{14,16)} コイ(Common carp)^{5,17)} ナマズ(African catfish, *Clarias gariepinus*)¹⁸⁾ わが国でのニジマス(Rainbow trout, *Salmo gairdneri*)¹⁹⁾ テラピア(Tilapia, *Sarotherodon niloticus*)²⁰⁾ ヒラメ(Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*)²¹⁾の例がある。実用化されている魚種はウナギとニジマスのものである。

システムの基本構成プロセスは、固形物除去、硝化および酸素供給(oxygenation)から成る。典型的な例としてウナギ稚魚の養殖システムを図-3¹⁶⁾に示す。このシステムは、飼育水総容量36.7 m³、トライアングルフィルターTF24(商品名)1基(孔径80 μm)、散水ろ床(回転式散水機付)、酸素供給槽1槽(直径0.6 m、高さ4 m、シャワー方式)から成る。飼育水容量に対する処理システムの容量は約50%である。注水量は5.8 m³/日(換水率15.8%/日)。最大収容量(1,436 kg、収容率3.9%)の時期の10日間の平均給餌量は23.5 kg/日、したがって散水ろ床への給餌負荷量は平均6.67 g-餌/m²・日で、硝化速度0.4 g-N/m²・日に相当する。養殖期間1年3カ月間のNH₄-NとNO₂-Nのレベルはそれぞれ0.5~1.0 mg/l、2.4 mg/lであったが、NH₄-Nは最高5 mg/l、NO₂-Nは9 mg/lに達した。NO₃-N濃度

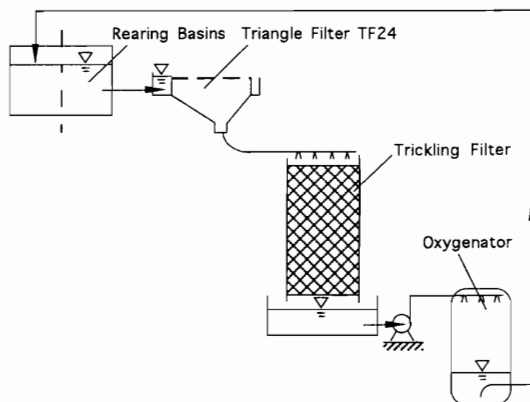


図3 循環型ウナギ稚魚飼育システム¹⁶⁾

は一定の増加傾向を示さず、250 mg/l のレベルで変動し、最高 400 mg/l に達している。pH は 7.0~7.3 であった。NH₄-N と NO₂-N 濃度の変動は散水ろ床の不安定さに起因するが、その原因として汚泥の沈殿除去をコントロールできなかったこと、酸化還元電位が低いこと、CO₂ 濃度が高いこと、および pH が変動したことなどが考えられる、としている。

pH が低下せずにはば一定に保たれ、NO₃-N が経時的に増加しておらず、NO₂-N が 2.4 mg/l であるところから、脱窒が相当活発に起こっていて DO 飽和度は相当低下しているのではないかと考えられる。

固形物除去法として多様な方法が提案されている。(1) フィルター：ヨーロッパで採用され始めた機械的ろ過法である。単純な物理的抑留のみの機能をもつマイクロストレーナー様のフィルターで、孔径は 40~100 μm が用いられるが、孔径が小さければ加圧が必要となり、加圧の必要のない 70 μm 以上のが適当とされている。しかし、この種のフィルターは逆噴射による連続的洗浄が必要であり、一般の懸濁物質のサイズは 95% 以上が 20 μm 以下⁴⁾であるとすればさほど除去効果は期待できず、後続する生物処理に負担をかけることになる。(2) 沈殿：単純な重力式沈殿池のほか渦巻き型固液分離法がある。(3) ろ過：砂などをろ材とした重力式ろ過や流動床型ろ過がある。濾材は重力式ろ過には砂利や砂が、上向流式流動床型ろ過には砂のほか水より幾分比重の小さいビーズ²²⁾などが用いられる。上向流式流動床式ろ過は原水を上向きに流し、濾材は流出しないように工夫されていて上部に集積して層を形成することによってろ過機能を発揮する。逆流洗浄が容易とされている。しかし、構造がかなり複雑であることが欠点と思われる。これらはいずれも懸濁物質の物理的抑留のほか NH₄-N の硝化と溶解性有機物の生物学的酸化分解が期待されている。

硝化法には散水ろ床法、浸漬ろ過法（重力式ろ過や上向流式ろ過を含む）、回転円板法、回転ドラム法があるが、いずれも生物膜法である。NH₄-N の硝化量は生物膜の面積に支配される。砂の比表面積は約 2,300 m²/m³ であり、砂以外の接触材の比表面積は 150~350 m²/m³ とされ、単位表面積当たりの最大硝化速度はろ材や接触材による差は小さく、ビーズ、砂、回転円板を用いた場合では、0.23~0.55 g NH₄-N/m²・日とみられる。^{4,22)} NH₄-N の硝化速度は NH₄-N の濃度と DO 濃度に支配され、NH₄-N 濃度が高く、DO 濃度が高いほど速くなる²³⁾ので DO 濃度維持に十分な配慮が必要である。

砂ろ過も含めて生物膜法の欠点は、運転開始時から数

週~数カ月の生物膜厚の増加期間は良好な水質が得られるが、膜厚が厚くなって嫌気部位が成されて剥離が起こる段階には水質が不安定になることである。²⁴⁾ 膜厚が厚くなるのは有機物負荷が大きいため他栄養細菌の増殖が促進されるため、硝化も阻害される。したがって、生物膜処理の前処理として有機物負荷を少なくすると、硝化は順調に進む。²⁸⁾ しかし、図-3 のようなシステムでは生物膜処理前に溶解性有機物濃度を著しく低下させることは困難であろう。

硝化速度は、「g NH₄-N/m²・日」あるいは「g-餌/m²・日」の単位で表される。硝化槽の設計と運転維持管理上からは後者が便利である。最大給餌負荷は、3.75~12 g-餌/m²・日とされ、ウナギ養殖では一般に 5~7 g-餌/m²・日である。¹⁶⁾

このようなシステムで、最も重要なことは養魚への酸素供給と NH₄ の硝化のために DO 濃度を高く維持することである。その結果、① NO₃-N が蓄積し、② pH が低下し、③ 難分解性の腐植（色物質）が蓄積して、黄褐色に着色する。NO₃-N 濃度の低下には脱窒装置（後述）が必要となる。pH 調整は炭酸水素ナトリムによって容易に調整でき、²¹⁾ サンゴやカキ殻の利用も考えられるが、懸濁物質による被覆によって効果が低下する。難分解性の着色物質はオゾンによる酸化分解²⁵⁾ が提案されているが、特に海水では毒性の強い臭素酸 (BrO₃⁻) が生成される。²⁶⁾ 腐植の毒性は低く、徐々に蓄積されるので適当な時期に短期間の適切な活性炭による吸着を行えば十分である（未発表）。

3.3 「固形物除去・硝化法・酸素処理」システムの改良

「固形物除去・硝化法・酸素処理」システムが最も広く採用されているが、これを改善するためのいろいろの方法が提案されている。

3.3.1 「泡沫分離・硝化」システム^{27,28)}

この研究は、マダイ²⁷⁾あるいはヒラメ²⁸⁾の畜養に関する研究であるが、全く換水なしに養殖も可能である。^{*2} システムを図-4 に示す。この方法は、懸濁物質除去と酸素供給を同時に行う方法で、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。その機構を簡単に述べる。モーター直結で単純な羽根を水中で回転させると空気を自吸して微細気泡を供給できるエアレーターを排気口を設けた密閉槽（気液接触槽）に装着し、これに飼育水を揚水する。養魚は常時体表面粘質物を分泌しており、これが懸濁物質に吸着する。懸濁物質を吸着した体表面粘質物が気泡の気液界面に強く吸着し、自動的に水面に集積して膜を形成する。次々に供給される

*2 本研究の概要は平成9年度日本水産学会秋季大会で発表した。

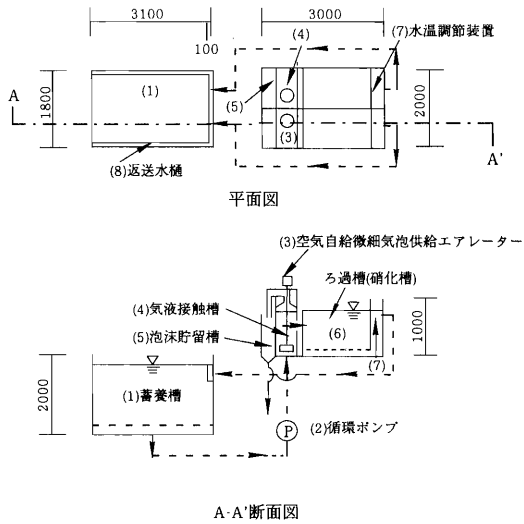


図4 循環型ヒラメ養食用泡沫分離ろ過システム²⁸⁾単位 (mm)

気泡によって水面に蛋白質特有の消え難い安定な泡(安定泡沫)が形成され、排気口から自動的に排除される。懸濁物質除去と酸素供給を十分に満たすだけでなく、ピプリオを含む細菌類や溶解性有機物も除去される。NH₄⁺は除去できないので硝化プロセスを後続させている。

3~4日に1度の割合で10m³の飼育水に約1トンのヒラメを収容し、順次出荷することを繰り返す養食の実用化例²⁸⁾について述べる。システムの運転開始約6ヵ月後に、1トンのヒラメを収容した場合の18時間の飼育水の平均水質(N=6)は、DO飽和度101%、濁度0.22 TU、DOC 0.32 mg-C/l、NH₄-N 0.80 mg/l、NO₃-N 47.2 mg/l、全生菌数2.1×10⁴ CFU/ml、ピプリオ1.2×10³ CFU/mlで、極めて良好に維持された。泡沫分離水発生量はわずか30 l/日(飼育水量の0.3%)であった。硝化のための微生物担体は約30mmの多孔のセラミックであるが、溶解性有機物濃度が低いため生物膜は発達せず、硝化菌が優占していたと考えられる。なお、運転開始後6年を経過した今日も年に1度しか清掃のための海水交換しかしていない。

体表面粘質物を懸濁物質の物理化学的除去に効果的に利用し、同時に酸素供給ができる泡沫分離法は、フィルターなどを用いた懸濁物除去法よりはるかに優れている。本法は飼育水が海水の場合には極めて有効であり、淡水の場合にも有効であるか否かが今後の課題である。

3.3.2 「散ろ床・活性汚泥」システム¹⁶⁾

本システムはNH₄-N濃度の安定化、硝化速度の高速化および脱窒能の向上を目的に開発された。ウナギ養成

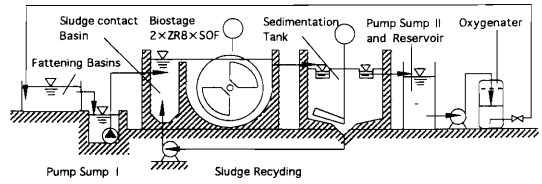


図5 循環型ウナギ養成用システム¹⁶⁾

に使われているシステムで、実用規模で生産計画を満足している数少ない例とされている。生物膜法と活性汚泥法を同時に用いると、それぞれを単独で用いるよりも水質が安定するという考え方²³⁾に基づいている。

このシステム(図5)は、総飼育水量408m³、汚水マス(1槽、200m³/hポンプ2台、汚泥接触槽1槽85m³)、浸漬型回転円板(2基、容量250m³、生物膜面積5,520m²)、沈殿槽(1槽、容量640m³、汚泥かき寄せ機)、処理水貯留槽(1槽、200m³/hポンプ2台)、酸素供給槽(1槽、直径1.2m、高さ4m)、および沈殿汚泥貯留槽(1槽、150m³/hポンプ1台)から成る。飼育水容量に対する処理システムの容量は約2.4倍と試算される。消費水量は35m³/日(連続供給)であるが、一時的増加を加えて45m³/日で、全容量の3.1%/日。このシステムの最も大きな特徴は回転円板法と活性汚泥法を組み合わせたことと懸濁物除去装置を設けておらず、回転円板から脱落したバイオマスが活性汚泥として働き、糞などの懸濁物質は活性汚泥とともに沈殿除去されることにある。したがって、余剰汚泥の引き抜きは避けられない。

調査期間は1年3ヵ月、後半6ヵ月の収容量は32トン(収容率7.8%)、給餌量は370kg/日(給餌率1.2%)。32トンは計画生産量100トンに達する過程の収容量で、計算上順調に成長している。活性汚泥濃度は3.5g MLSS/l(沈殿汚泥量295mg/l、MLSSとは混合液浮遊物質のこと)。給餌370kg/日に基づくTN負荷量は24kg-N/日。飼育水のNH₄-NとNO₂-N濃度はともに全期間を通して0.5mg/l以下、NO₃-N濃度は初期の3ヵ月に400mg/lに達し、以後400~500mg/lの一定である。硝化速度は浸漬型回転円板では1.4g-N/m²・日でシステム全体として7.7kg-N/日であり、活性汚泥法では14g-N/kg-MLSS・日で、システム全体として16.3kg-N/日となる。このような硝化速度の大きい理由は、回転円板と活性汚泥の微生物間の効果的補完関係ではないかとしている。

硝化が十分に進行して400mg/l程度で安定しているのは、換水によるNO₃-Nの排除と脱窒による除去が平衡状態に達したためであろう。処理システムの容量が、

飼育水容量の2.4倍で著しく大きい、最終収容量100トン(収容率25%)に対して設計されているためであろう。このような驚くべき超高密度養殖は可能なのであろうか。わが国の循環型ウナギ養殖の収容率はわずか1%程度(表-2)である。このような超高密度養殖が可能なら、経済合理性が高まろう。

脱窒量を試算すると、全量が硝化されているので24 kg-N/日が負荷され、3.6 kg-N/日が換水で排出され、魚体に給餌窒素の35%⁹⁾が蓄積(吸収同化)されるとすると、飼育水への蓄積量が8.4 kg-N/日であるから、脱窒量は12 kg-N/日で、脱窒率は50%となる。pH調整をしていないにもかかわらずpHが安定していることから、脱窒が相当活発に起こっていることは間違いない。一方、換水によるTNの排出量は給餌によるTNの15%に達している。

3.3.3 植物による栄養塩の摂取⁴⁾

このシステムは、上記「固形物除去・硝化・酸素処理」システムに栄養塩の蓄積抑制を目的として、循環水に陸上植物、水生植物あるいは大型藻類を培養する装置を加えたものである。この方法はよりエコロジカルであるところから好ましく、野菜の水耕栽培が期待されている。イスラエルの国立研究所では、エコロジカルシステムの構築を目的として「溜池一カキ養殖(有機物除去)一大型藻類(アオサ)の培養」システムの実用性を研究している。

しかしながら、次に挙げるような研究課題は多い。①養殖と植物生産の全体の把握、②植物の栄養学的・生理学的安定性、③塩濃度の上昇、④植物と養魚の病気と害虫のコントロール、⑤システム全体からの排出物の処理、など。

3.3.4 脱窒法^{4,5,17)}

これまで述べてきたシステムでは飼育水におけるNO₃-Nの蓄積があり、負荷削減の観点から、脱窒素が必要である。図-6⁴⁾は飼育水槽(容量50 m³, エアレーター0.35 kw 2台, スクリーン付), 散水ろ床(容量2 m³, 濾材表面積400 m²), 循環ポンプ(15 m³/h, 1回転時間18分), 沈殿池(容量3 m³, 水理学的滞留時間5h, 沈殿物深さ30~70 cm, 脱窒塔への揚水ポンプ0.6 m³/h, 空塔速度34.2 cm/min), および脱窒塔(パイプ長4.8 m, パイプ径19.3 cm, 容量131.5 l, 濾材と径: 砂径0.3~0.9 mm, 膨張量: 静置砂高さの50%以内, 攪拌用羽根付)から成る。蒸発と漏水のための補給水量は3 m³/日(全水量の3.6%)である。したがって、ほぼ完全循環型に近い。

初期コイ収容量は1トン(収容率2%)である。人工飼料(蛋白質含量30%)の給餌量は魚体重の2.5%/日。約80日間の飼育水の水質は、水温22~27°C, pH

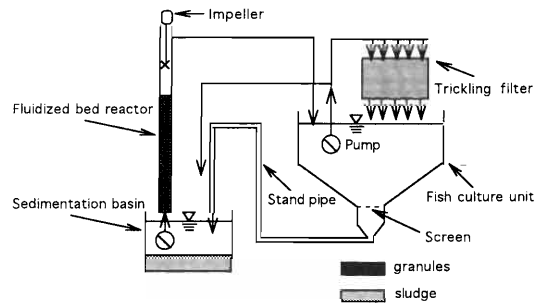


図6 好気および嫌気生物ろ過による循環型養殖システム⁴⁾

7~7.8, DO 6~7 mg/l。NH₄-Nは一時的に2 mg/lまで上昇したが0.5 mg/l以下, NO₂-Nは時に0.1~0.4 mg/lまで上昇したがほとんどは0 mg/lに近く, NO₃-Nは運転開始約15日間は40 mg/lまで上昇したが0~15 mg/lで推移している。

本システムの特徴は、全沈殿物の回収と脱窒をほぼ完全に行い、脱窒に必要な炭素源として沈殿物の可溶化した溶解性有機物を用い、沈殿物量の減少を図っていて、非常に合理的なことである。脱窒の程度はポンプアップ流量の調整のみで対応でき、沈殿池の泥抜き程度で維持・管理は容易と思われる。一般に、脱窒にはバイパスを設け、炭素源としてメタノールやグルコース²¹⁾などの有機物が用いられるからである。脱リンはなされていないが、リン酸の蓄積度合いとその影響によっては、アルミニウム塩や鉄塩による凝析処理で対応できよう。

COD_{Cr}は200~800 mg/lの間で変動した。COD_{Cr}からみて、飼育水は腐植によるかなりの汚濁と着色があると推測される。一方、無酸素の脱窒処理水0.6 m³/分の飼育槽への返送は、飼育水-散水ろ床の循環水量の4%であるから、飼育水の酸素欠乏にはほとんど影響しないはずである。

3.4 特殊処理

イカ養殖における水質管理は非常に難しいとされているが、イカ(*Loliginid squid*, *Loligo opalescens* and *Septotenuthis lessonia*)の種苗生産と養成用の循環型システム²⁹⁾が完成している。このシステムは医学分野における研究用の成魚を供給するために開発されたもので、経済性から一般の養殖に採用され得ないと思われる。しかし、近年の種苗段階での病原菌の保菌を避けるために参考にならう。養成用の処理システムは次の2つの処理系統から成る。飼育(10.1 m³), ①ポンプ(3/4 hp), ろ過槽(35 μmメッシュ)と活性炭のモジュール, UV殺菌設備, ②ポンプ(1/12 hp, 30 l/min, 2台), ろ過槽(35 μmメッシュ)と活性炭のモジュール,

プロテインスキマー、大型藻類（アオノリ *Enteromorpha* spp., オゴノリ *Gracilaria tikvahiae*）培養槽、空気供給設備、生物膜ろ過槽（粉碎カキ殻層 7 cm 厚, 7.59 m²）、水温調整設備、および UV 殺菌設備である。

収容密度 0.8 kg/m³ のときの水質は、NH₄-N 0.1 mg/l, NO₂-N 0.03 mg/l, NO₃-N 50 mg/l, pH は 8.0 以上とされている。処理システムはこれまで紹介したものの中で最もシステムチックに組み立てられていて、飼育槽容量は全体の 68%、処理システムの容積は 32% である。

3.5 実用化の可能性

わが国において循環型養殖が採用されるには、少なくとも①高密度循環型養殖の可能性、②負荷削減の可能性、および③経済合理性、を満たさねばならない。

高密度循環型養殖の可能性は、図-5 に示したように、収容率 7.8% のウナギ養殖が行われており、Heinsbroek¹⁴⁾ はすでにオランダの実用化されている 5 ウナギ養殖場の運転状況を詳細に報告しているところから、すでに実用段階にあると言えよう。ウナギは高密度養殖に適した魚種であろうが、基本的に「(懸濁物除去)・生物処理・酸素供給」システムで可能である。わが国でもニジマスの種苗生産と養成が実用規模で行われ、研究段階であるがヒラメの養殖も可能である。

循環型養殖システムの多くは換水しており、その負荷量は少なくない。図-6 に示したようにコイ養殖（初期収容率 2%）において、ほとんど換水しない、しかも非常に高い脱窒プロセスを組み込まれた完全循環型養殖システムが実証されており、脱リンなど必要なプロセスを加えることはかなり容易と考えられる。したがって、負荷削減は相当のレベルまで可能であろう。

経済合理性の問題の一つは病気、もう一つは高い設備費と運転費の問題であろう。この 2 点についての報告はみあたらない。病気の問題は発病しないから研究例がないのか、研究が進んでいないのか不明である。

高密度循環養殖では一度発病すれば短時間に大量死を招く可能性はあろう。罹病しない可能性について述べてみたい。下水処理に用いられる活性汚泥法や回転円板法などのいずれにおいても、流入水の細菌類は既に生息している微生物に捕食されるために、全生菌密度も大腸菌群密度も著しく低下する。循環型養殖システムにおいても、病原菌が侵入した場合に同様のことが起こると考えられる。前述の「人工池による水処理法」で述べたことを勘案しても、循環型養殖では病原菌の除去、あるいは増殖抑制が相当効果的に行われると推測される。しかしながら、種苗自体がすでに病原菌を保菌している場合には、システム内の水温を含めた水質悪化で養魚が衰弱して、発病する可能性はあろう。種苗の健全性と水質が維

持されれば、流水型の養殖の場合よりも罹病の可能性は低くなると思われる。今後の重要課題である。

経済合理性を考えるには、施設の建設費、維持管理費、飼育密度、生残率などと、上述の負荷削減効果、および前述の利点などを総合的に考えなければならない。したがって、実用規模での実験研究による経済合理性の追求が必要である。

3.6 今後の研究^{4,14)}

給餌、排泄速度および硝化速度などを連係させるという設計思想¹⁸⁾によって循環型高密度養殖システムの設計と維持管理が著しく改善され、実用化が可能になった。しかし、研究すべき課題は多く、指摘されている項目を列挙する。

(1) 飼育水の水質について

①養魚の摂餌に対する水質と管理の影響、②懸濁物質、炭酸ガス、硝酸態窒素、リン酸および芳香族物質の蓄積、影響、およびそれらの除去、③病原細菌類やウイルスの挙動の明確化、など

(2) システムについて

①養殖槽における循環水の通過速度、バイオフィルターの表面積と通過速度、およびシステム容量の 3 つを合わせたものの最適化、②餌成分と給餌法、③酸素供給と循環装置、④懸濁物除去法と処分法、⑤自動モニタリングシステム、⑥感受性の高い魚種用のシステム開発、⑦建設、維持管理費、生産性、および環境負荷削減のバランスを考慮した経済性の検討、⑧排水の環境規制をクリアできるシステム開発、⑨溜池での浄化機構の研究と応用技術の開発、⑩注水のない完全循環型養殖システムの開発、など。

環境基本法が施行され、ISO 14,000 シリーズが JIS に加わった今日の状況では、負荷削減を目的とし、経済合理性をもった養殖システムの研究開発が急務と考える。最初に、「将来展望として海産魚類養殖でも循環型養殖の視点が大切」と述べた。しかし現状では、循環型養殖は淡水魚養殖では可能であっても、海産魚では不可能、ないしは極めて困難、と考えられているのではないかと感じられる。⁸⁾ そのように考えてしまうには、研究開発があまりにも少ない。

筆者の研究に関わることで恐縮であるが、海産魚の循環型養殖の可能性を示唆する例を述べたい。約 4 カ月前、宮崎県の北部で 30 年以上も海産魚養殖を続けてきた業者が、泡沫分離技術を既存の流水型トラフグ養成施設に導入した。DO 濃度は上昇し、揚水量は 1/3~1/5 に激減（更なる減少が可能）し、自動的不純物除去によって水質浄化がされ、寄生虫などによる障害が減少し、結果として成長速度が増加している、という。揚水量の

減少は循環型養殖に近づいていることを意味し、泡沫分離水と糞の処理によって著しい負荷削減が可能になると思われる。「経験上、ほとんどの海産魚の陸上養殖に好結果を与えるであろう」という氏の言に勇気づけられる。

一部の野菜や鶏肉のように、魚も工場生産される時代がきても不思議ではないのではあるまいか。

文 献

- 1) 通商産業省環境立地局監修：公害防止の技術と法規，丸善㈱，東京，1995，pp. 419-423, pp. 491-498.
- 2) ㈱日本規格協会：ISO 14000ガイド—新しい国際環境マネジメント規格一，㈱日本規格協会，東京，1997，pp. 126.
- 3) 中村玄正，高橋幸彦，成田大介，松本順一郎：阿武隈川の富栄養化に及ぼす養魚池の影響に関する研究．環境工学研究論文集（土木学会環境工学委員会），Vol. 32, 263-272 (1995).
- 4) J. van Rijn: The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture—A review. *Aquaculture*, **139**, 181-201 (1996).
- 5) J. van Rijn and G. Rivera: Aerobic and Anaerobic Biofiltration in an Aquaculture Unit—Nitrite Accumulation as a Result of Nitrification and Denitrification. *Aquacultural Engineering*, **9**, 217-234 (1990).
- 6) 真柄泰基監修：水道水質ハンドブック．日本水道新聞，東京，1994，pp. 398, pp. 365-367.
- 7) 橋本啓芳：内水面における排水対策事業．養殖（臨時増刊）環境対策マニュアル，41-42 (1996).
- 8) 井上清和：海面養殖における環境対策事業．養殖（臨時増刊）環境対策マニュアル，43-44 (1996).
- 9) 水産庁：内水面養殖指針作成に関する事業報告書．1985，pp. 14-16.
- 10) 伊藤克彦：海面養殖における漁場環境とその問題点．養殖（臨時増刊）環境対策マニュアル，pp. 35 (1996).
- 11) 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，水産学シリーズ62，恒社厚生閣，東京，1986，pp. 129-132.
- 12) 半谷高久，小倉紀雄共著：改訂2版水質調査法，丸善㈱，東京，1992，pp. 45.
- 13) 水産庁：平成8年度魚類養殖対策調査報告書—養魚堆積物適正処理技術開発事業一，1997.
- 14) L. T. H. Heinsbroek and A. Kamsta: Design and performance of water recirculation systems for eel culture. *Aquacultural Engineering*, **9**, 187-207 (1990).
- 15) W. J. Ng, Kevin Kho, L. M. Ho, S. L. Ong, T. S. Sim, S. H. Tay, C. C. Goh, and Lesilie Cheong: Water quality within a recirculating system for tropical ornamental fish culture. *Aquaculture*, **103**, 123-134 (1992).
- 16) R. Knösche: An effective biofilter type for eel culture in recirculating system. *Aquacultural Engineering*, **13**, 71-82 (1994).
- 17) R. Arbiv and J. van Rijn: Performance of treatment system for inorganic nitrogen removal in intensive aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, **14**, 189-203 (1995).
- 18) E. H. Eding, S. S. Desmares and J. H. van Weerd: Intensive culture of *Clarias gariepinus* in recirculation systems. World aquaculture '96 (Books of abstracts) in the 1996 annual meeting of the world aquaculture society, pp. 116 (1966).
- 19) 日本水産学会環境保全委員会主催，平成8年度第1回研究会「環境保全のための養殖場のクローズド化」において報告された．古川賢男「クローズドシステムの技術開発」
- 20) K. Hirayama, H. Mizuma, and Y. Mizue: The accumulation of dissolved organic substances in closed recirculation systems. *Aquacultural Engineering*, **7**, 73-87 (1988).
- 21) H. Honda, Y. Watanabe, K. Kikuchi, N. Iwata, S. Takeda, H. Uemoto, T. Furata, and M. Kiyono: High density rearing of Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*, with a closed seawater recirculation systems equipped with a denitrification unit.
- 22) R. F. Malone and D. E. Coffin: Biofiltration and Solids Capture with Low Density Filters. Design of High-Density Recirculating Aquaculture systems, A workshop Proceeding, pp. 29-35 (1991).
- 23) J. Bovendeur, E. H. Eding, and A. M. Henken: Design and performance of a water recirculation system for high-density culture of the african catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell 1822). *Aquaculture*, **63**, 329-53 (1987).
- 24) 武田重信，本田晴朗，菊池弘太郎，岩田仲弘，清野通康：高効率魚類生産のための水質浄化技術開発．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，1990，pp. 1-24.
- 25) 武田重信，菊池弘太郎：高効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，1994，pp. 1-23.
- 26) 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．日本誌，**59**, 1527-1533 (1993).
- 27) 丸山俊朗，奥積昌世，佐伯昭和，嶋村 茂：活魚輸送・蓄養における泡沫分離法の飼育海水浄化能．日本誌，**57**, 219-225 (1991).
- 28) 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．日本誌，**62**, 578-585 (1996).
- 29) W. T. Yang, R. T. Hanlon, G. P. Lee, and P. E. Turk: Design and function of closed seawater systems for culturing loliginid squids. *Aquacultural Engineering*, **8**, 47-65 (1989).