



| | |
|------------------|---|
| Title | 泡沫分離法による海水性濁水の処理 |
| Author(s) | 丸山, 俊朗; 奥積, 昌世; 佐藤, 順幸 |
| Description | 第2回衛生工学シンポジウム (平成6年11月10日 (木) -11日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 5 水処理 . 5-8 |
| Citation | 衛生工学シンポジウム論文集, 2, 215-220 |
| Issue Date | 1994-11-01 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/7615 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 2-5-8_p215-220.pdf |



5 - 8

泡沫分離法による海水性濁水の処理

丸山俊朗(宮崎大学), 奥積昌世(元東京水産大学), 佐藤順幸(西原衛生研究所)

1. はじめに

近年, 沿岸域の環境修復が注目されるようになった。

従来, 魚類の海面養殖や魚介類の蓄養起源の汚濁が指摘されてきたが, 特に最近になって海面養殖からの負荷削減法の開発が模索されはじめた。海面養殖や蓄養(無給餌)は陸上における循環型養殖や蓄養に転換する研究が必要である。陸上での循環型養殖技術の開発は小規模であるが行われている^{1), 2)}。しかし, 現状の養殖に変わり得るにはさらなる研究が必要である。欧米ではタコやイカを医学分野の実験動物とするための養殖システムが開発されきたが, そのシステムはかなり複雑である。わが国では循環型蓄養法として砂濾過法が古くから採用されてきたが, 維持管理は容易でない³⁾。筆者らは循環式泡沫分離法がマダイの2日間の輸送-蓄養において, 極めて有効な水質維持能をもつことを明かにした⁴⁾。

香川県漁業協同組合連合会(以下, 香川県漁連)は1991年3月, 海産魚介類の蓄養を目的として, 「泡沫分離-生物酸化(pH調整)-水温調整」システムを神奈川県横須賀市久里浜に建設した。香川県漁連はこのシステムをヒラメを主とし, タコを従とした収容(入荷)-出荷の繰り返しに用いてきた。運転開始4年目に入った今日(1994年6月)もなお, 1年に1度の蓄養水槽壁面の藻類掃除のときの海水交換のみで稼働中である。この間死亡魚はなく, 発病も観られず, 維持管理のための作業はほとんど行っていない。水質は極めて良好に維持されている⁵⁾。「泡沫分離-生物酸化」なる単純なシステムで, しかもメンテナンスフリーで飼育水水質が良好に維持される例は見あたらない。

一方, 運河, 沿岸域, 漁港およびカキ養殖場の環境修復技術の開発が望まれてきた。従来, この種の環境改善には専ら浚渫が採用されてきたが, 海洋投棄の中止時期(1995.1)も迫ってきた。運河水の浄化にはアルミニウム塩による凝集-濾過(直接濾過)法, 礫間酸化法などが検討されてきた。しかし, 酸素供給の概念は低い。運河などの汚濁あるいは汚濁感の原因は過負荷のほかに塩分躍層あるいは水温躍層以深の溶存酸素濃度の低下による底泥の嫌気化である。これら改善(修復)法の第一は負荷の削減であるが容易でないと思われる。運河などの浄化法の第1は溶存酸素濃度の増加による好気性微生物の回復とこれによる底泥と底層水の修復であり, 第2は用いる方法による懸濁物質などの除去ができることであり, 第3に小規模装置であり, しかも第4は発泡や使用薬剤による2次的問題を起こさない方法でなければならない。

そこで, 本研究では溶存酸素濃度の増加と懸濁物質などの除去を同時にしかも短時間に可能な泡沫分離法について, (1)稼働中のヒラメ蓄養における循環型「泡沫分離-生物酸化」システムの浄化機構に関する知見と, (2)(1)の知見に基づいて, 海水中懸濁質のカゼイン添加による泡沫分離法による除去能に関する知見を得ることを目的とした。

2. ヒラメ蓄養における循環型「泡沫分離-生物膜酸化」システムの浄化⁵⁾

2-1. 調査方法

(1)システムの構成と諸元

構成 本システムは図1に示すように蓄養水槽, 循環ポンプ, 気液接触槽, 空気自吸式エアレーター, pH調整を兼ねた生物酸化槽および水温調整設備から成る。本システムの中で最も重要な役割を果たしているのは空気自吸式エアレーターである。このエアレーターはモーター直結

で特殊な羽根を回転させることによってその背部に負圧を生じさせ、空気を自吸して水とのせん断で微細気泡を供給できる。微細気泡は液中に突出したあと激しい気液混合が起こる構造である。気泡として供給された空気と形成された安定泡沫(消泡しにくい泡)は一ヶ所のダクトから自動的に排除される。

生物酸化槽は硝化菌などの担体が充填され、同時にpH調整材の役割を担っていて脱窒機能も期待されるが、懸濁物質の物理的抑留や溶解性有機物の生物による分解を期待していない。

従って、本システムは広く用いられている循環型砂濾過システムとは基本的に異なる。

諸元 蓄養水槽 10m³(2×3×水深1.8m)、気液接触槽 0.41m³、生物酸化槽(充填材の径はいずれも約30mmの多孔質セラミックス、珊瑚 およびカキ殻)3.1m³、循環水量 0.48m³/min、回転時間 25min、送気量1.0m³/min、気液比 2.1、気液接触時間 17sec、生物酸化槽滞留時間 6.7min。

(2)水質調査時までの魚介類収容(入荷)-出荷の経緯

1991年5月24日、久里浜港から揚水してシステムの運転を開始した。最初の試みとして水温を18℃に調整し、生け簀で衰弱して横転した体重約3kgのハマチ30尾を収容した。数分後ハマチは円を描いて遊泳し全尾が回復した。収容直後から著しい安定泡沫が発生し続けた。次いで15℃に水温を低下させたところハマチの運動は完全に止まり、泡沫の発生も止まった。この時点で再度水温を18℃に昇温したところ、再度遊泳を開始し、泡沫の発生が始まった。

以後、ヒラメの試験的収容を重ね、1991年8月13日から本格的な収容-出荷を繰り返してきた。ヒラメの収容は8月13-29日の間に5回収容-出荷を繰り返し総量1.07tonであった。9月1-29日の間に11回収容し総量3.19ton、10月1-30日の間に13回収容して総量7.2tonに達した。収容-出荷の仕方は、例えば10月では1~7日に1度の頻度で10m³水槽1槽当たり500~1000尾(0.6~1kg/尾)のヒラメを収容し、収容後数時間~2,3日後までに全量を出荷することを繰り返してきた。更に、ヒラメ出荷後次の入荷までの間にタゴの収容-出荷を繰り返した。タゴは8月19-29日の間に6回収容して総量0.37ton、9月1-30日の間に18回収容して総量2.95ton、10月1-30日の間に21回収容して総量1.8tonであった。

(3)実験

1991年10月30日までの収容分は10月2日には全量を出荷し、調査時11月4日16時の収容までの約2日間空運転を継続した。調査時までの約5ヶ月間、海水交換も注水もせず、また生物酸化槽の洗浄も交換も行っていない。16時から30分間に869kg(1000尾、収容率8.7wt%)のヒラメを10尾ずつプラスチック容器に移して収容した。翌日10時30分まで所定の時間間隔で蓄養水の水質、泡沫分離水発生量および泡沫分離水の水質を調べた。

2-2. 結果と考察

ヒラメ収容前後の飼育水の水質変化の範囲を表1にし示した。

(1)飼育水の水質

pH 放魚前のpHは7.84、放魚直後に7.41まで低下後緩やかに回復して7.6に漸近している。収容直後のpHの低下は活魚車飼育水のpHが6.16~6.46(4槽)であったことと、収容時の運動によ

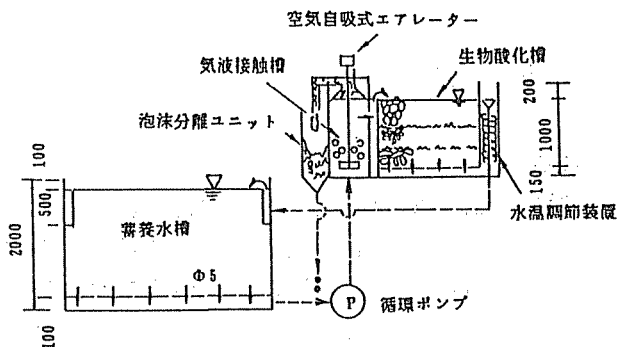


図1 泡沫分離-生物酸化システムの概略

表1 ヒラメ収容前後の飼育水と泡沫分離水の水質

| | 養水 | | 泡沫分離水** |
|--------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------------|
| | [収容前] | [収容後]* | |
| WT(°C) | 15.5 | 15.2-15.6 | - |
| DO(%) | 102.7 | 99.3-101.8 | - |
| pH | 7.84 | 7.41-7.57 | - |
| Turb.(TU) | 0.17-0.20 | 0.19-0.25 | 200-350 |
| DOC(mg/l) | 2.35-2.8 | 2.65-3.70 | 290-460 |
| NH ₄ -N(mg/l) | 0.0 | 0.15-1.49 | 50-85 |
| NO ₂ -N(mg/l) | 0.0 | 0.1-0.82 | - |
| NO ₃ -N(mg/l) | 46.7 | 44.0-49.8 | 5-14 |
| 全生菌数(CFU/ml) | 10 ³ | 5×10 ⁴ | 10 ⁶ |
| ピブリオ菌数(CFU/ml) | 10 ² | 10 ³ | 10 ⁵ ~5×10 ⁶ |

* ヒラメ収容量: 869kg(1000尾)/10m³

** 泡沫分離水発生速度: 0.3 v%/day(10m³飼育水)

る炭酸ガスの増加によると考えられる。実験終了後のpH7.6は、珊瑚とカキ殻の海水との平衡pH7.84までは上昇すると予想される。

水温 実験中の水温は15.2~15.6°Cは外気温に左右されたが、ほぼ目標水温に維持された。

溶存酸素濃度 溶存酸素飽和度は放魚前は102.7%で、放魚直後に99.6%に低下したが、実験中99.6~101.8%に維持された。

収容直後のDO飽和度の低下は活魚輸送水のDOが14.6~98.3%(4槽)であったことと収容時の摂取量の増加による。収容時もお高いDO濃度を保ち得た理由は回転時間が25分、気液比が2.1で、微細気泡を供給し、激しく混合しているためと考えられる。

濁度 放魚前の濁度は0.17TU、放魚直後もなお0.2TUで、実験期間中0.10~0.25TUに維持された。この濁質除去はほぼ完全に泡沫分離によって達成された。その理由は後続の生物酸化槽の充填材の寸法が約30mmで、網袋に収容しており、物理的な懸濁物質物の除去効果はなく、汚れは観察されないからである。

溶存態有機炭素(DOC) 収容前のDOCは約2mg/lで収容後3.7mg/lまで上昇するものの、2.7~3.5mg/lの緩やかな変動を示した。全量出荷後は収容前の2mg/l程度まで低下すると予想される。汚濁物質は発生と同時に泡沫分離によって極めてスムーズにしかも完全なまでに除去された。海水のDOCは多くの外洋水を集計して水面近傍(<100m)では0.6~2.0 mg/l⁶⁾、東京湾の環境基準点35(水質が都内湾では比較的良い)の年間のDOCの平成2年度(1990)の平均とその範囲は表層水では2.3(1.6~3.6)mg/l、下層水1.4(0.8~3.1)mg/l⁷⁾、また札幌豊平川水と都市下水生物処理水のDOCは、それぞれ1.2, 8.6 mg/l程度とされている⁸⁾。

NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N ヒラメ収容前のNH₄-N濃度は検出されず、収容後漸増して1.49mg/lまで上昇後減少傾向を示した。収容前のNO₂-Nは不検出であったが、収容後漸増し続けて0.82 mg/lに達してなお上昇傾向にある。収容前のNO₃-Nは46.7mg/lでかなり高い。脱窒作用が完全には追いつかないための蓄積である。しかし、過去約5ヶ月の収容量から考えると、大部分のNH₄-Nが消化され脱窒されたと試算される。すなわち、平均的アンモニアの排泄量をマガイの例を参考に10mg/kg/hr⁹⁾とすると、今回収容した869kgでは12時間収容したとして、その全量が残存すると、NH₄-Nの濃度は10.5mg/lと試算されるが、収容12時間後もNH₄-N濃度は1mg/l程度しかない。この差約9mg/lが硝化されたとすると、今回の収容だけで、NO₃-Nの濃度が9mg/lも上昇するはずであるが、NO₃-N濃度は今回の収容前後で僅かしか上昇していない。したがって、相当量が脱窒されたと考えられる。過去約5ヶ月間ではNH₄-Nの大部分が脱窒されたと考えられる。

細菌密度 養水の全生菌数(全生菌を含む)はヒラメ収容前の10³CFU/mlから5×10⁴CFU/mlオーダーに急増後ほぼ変化がない。ピブリオ菌数は10²CFU/mlから10³CFU/mlに増加したままであった。

(2)泡沫分離水の発生量と水質

発生速度 泡沫は収容直後から発生し始め、泡沫水分離水発生速度は収容直後の最大3.7

1/hから漸減して11/hに漸近した。累積泡沫分離水の発生速度は直線部では1.51/hである。収容1日後の泡沫分離水量は約301/dと推定され、1日の飼育水のロスは0.3vol%である。この量は維持された良好な水質を勘案すれば極めて少ない。

水質 濁度は200~300TU間で、DOC濃度は290~460mg/l間で、NH₄-N濃度は70~90mg/l間で変動した。いずれも極めて高い濃縮である。NH₄-Nはそれ自体が泡沫によって濃縮されたのか、泡沫分離水になってから変化したのか不明である。

細菌密度 泡沫分離水の一般生菌数は10³CFU/mlのオーダーであり、ビブリオ菌群数は10⁵~5×10⁶CFU/mlで極めて高い濃縮を示した。

泡沫分離による濁度、DOC及びNH₄-Nの除去速度 これまで各水質を濃度で表現したが、濃度と泡沫分離水量が変わり、濃度のみでは情報量が乏しい。除去速度で評価すべきであるが、ここでは割愛する。

(3)泡沫分離の汚濁物質除去機構

以上のように泡沫分離法は海水性魚介類飼育水の高い水質維持能をもつことが明らかになった。その浄化機構は次のように考えられる。

飼育水浄化の主な物質は魚介類が常時分泌している体表面粘液である。その分泌量は運動量が大いほど多く、しかも体表面粘液は多くの物質を吸着し、安定泡沫を形成する。この現象は前述の「水質調査時までの魚介類の収容経緯」で述べたハマチの挙動と泡の発生状態とその色調と、既に欧米の蓄養システムにプロテインスキマーなる浄化プロセスが既存であるところから理解された。

体表面粘液は分子量約80万の蛋白質であり、アミノ酸で構成されていて、疎水性部分、疎水基、および正と負の親水基を局所的に有する¹⁰⁾。多様な物質を吸着し、疎水性部位は強く気液界面に吸着する。一方、疎水性部分を持つ溶解性有機物は容易に気液界面に濃縮すると考えられる。蛋白質一般に高塩分下でその分子が糸状に分散し、疎水部、疎水基および親水基が水と接している^{10,11)}ので、多くの物質を吸着する。

微細気泡の供給と水との激しい混合によって蛋白質自体、多様な懸濁物質を吸着した蛋白質および溶解性有機物はまず気泡の気液界面に衝突・集積し、これが浮上によって水面に輸送される。次々に供給される気泡によって水面に膜状に集積した蛋白質は大きな壊れにくい安定な泡を生成する。この泡は次々に供給される空気によって外部に自動的に押し出される。

本システムが極めて高い水質浄化能を有する主たる作用は、①体表面粘液(蛋白質)の利用、②塩分による蛋白質の汚濁物質除去作用の促進、③空気自吸式微細気泡供給機の利用、④気液接触槽における微細気泡の激しい混合、及び⑤自動的泡沫分離、などといえる。

2-3. まとめ

(1)蓄養水の水質 ①10wt%のヒラメ収容前後でほとんど変化しない。pHは7.4~7.8、DOは飽和、濁度は0.18~0.25TU、DOCは2.2~3.5mg/l、NH₄-Nは0~1.5mg/l、NO₂-Nは0~0.9mg/l、NO₃-Nは45~50mg/lに保たれた。②脱窒作用も活発と推定された。③蓄養水の全生菌数は10⁴CFU/ml、ビブリオ菌群数は10³CFU/mlに維持された。④泡沫分離のみによって、汚濁物質と細菌類が極めて効果的に除去された。⑤飼育水の浄化は蛋白質である体表面粘液の汚濁物質の吸着とその気液界面への吸着、ならびに形成される安定泡沫の分離による。

(2)泡沫分離水 ①泡沫分離水発生速度はヒラメ収容直後に最大となり、漸減して一定値に漸近した。②泡沫水の発生量は極めて少なく301/d(0.3v%/d)であった。③収容直後の泡沫水の濁度は350TU、DOCは数100mg/l、NH₄-Nは約90mg/lの高濃度であった。④全生菌数とビブリオ菌群数

はそれぞれ 10^8 と 10^6 CFU/mlで泡沫によく濃縮除去された。

3. 海水中懸濁質のカゼイン添加による泡沫分離の可能性¹²⁾

3-1 実験方法

実験装置 装置は試水を満たした内径30mm, 長さ1mの亚克力パイプの底部に設けたガラスボールフィルター(木下式, G4, 孔径5~10 μ m)を通じて送気し, 水面に生成された安定泡沫を吸引によって回収できる回分式装置を試作した。

実験の種類

(1)カオリン懸濁液 実験条件はカオリン懸濁液の濃度と量をそれぞれ50mg/l, 850ml, 送気量を0.5l/min(気液比2.9), 処理時間を5分, 泡沫分離水量を30ml(約3%)(以下同じ), 塩分を0~35%, カゼイン添加量を0~0.05mg/lとした。処理能は濁度除去能で評価した。カオリンに対するカゼインの吸着量はカオリン溶液にカゼインを1.18mg/l添加し, スターラーで攪拌, 遠心分離後, 上清の液中残留蛋白質濃度を蛍光光度法(EX:395nm, EM:495nm)で求めた。

(2)運河底泥懸濁液 カゼイン添加によって, カオリン除去が可能であることがわかった。この方法を浚渫余水処理をも想定して運河底泥懸濁液(50mgカオリン/l 相当)に適用した。東京高浜運河の底泥を人工海水に懸濁させた懸濁液を用いた。実験方法は(1)と同様とした。

(3)カゼイン自体の除去能 塩分は0~35%とし, (1)と同様に泡沫分離処理した。処理能は試水, 処理水, 泡沫分離水のカゼイン濃度で評価した。

3-2. 結果と考察

(1)カオリン除去能 カオリン除去率は各々の塩分においてカゼイン濃度の増加に伴って, また塩分の増加に伴って増加した(図2)。塩分20%以上, カゼイン濃度0.05mg/lでカオリン除去率は約90%であった。カオリンに対するカゼイン吸着は攪拌するだけで短時間に起こり, Freundlichの吸着等温式で良く表された。吸着等温式は $(X/M)=KC^{1/n}=17.0C^{2.02}$ ($r=0.990$)であり, $1/n$ の値からカゼインはカオリンに対して難吸着性に近いと判断された。

(2)運河底泥懸濁質の除去能 運河底泥懸濁液の濁度除去率はカゼイン添加量の増加に伴って増加し, 添加量5mg/lで90%に達した(図3)。光学的に同程度の濁度の底泥とカオリン懸濁液を泡沫分離処理するとき, カゼイン所要量は底泥の方が約100倍も多い。この現象は, ①底泥粒子は既に凝集してカオリンより粒子径が大きく, ②この大きな粒子を気泡に吸着

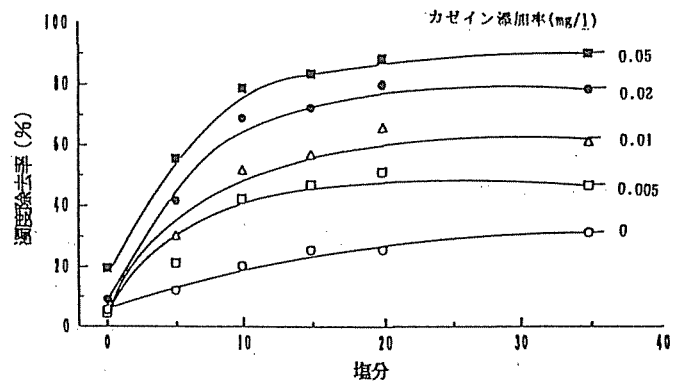


図2 回分式泡沫分離法による異なるカゼイン濃度における塩分と濁度(カオリン)除去率の関係

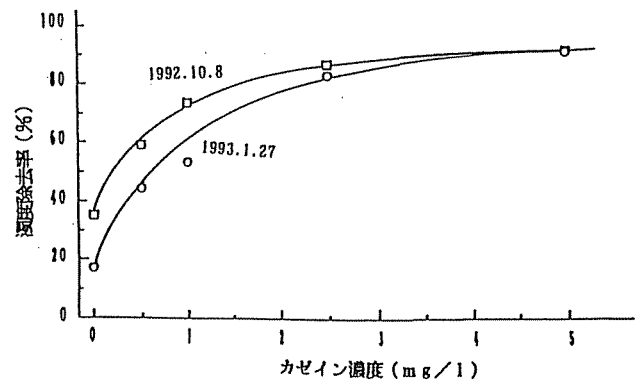


図3 回分式泡沫分離法による高浜運河(東京)底泥懸濁液のカゼイン添加率と濁度除去率の関係

させるためのカゼイン所要量が多くなるためであり、③カオリンよりも底泥粒子の方がカゼイン吸着能力が高いためと考えられる。

これらの結果から浚渫余水の懸濁質除去が可能と考えられる。

(3)カゼイン自体の除去能 カゼイン除去率は塩分の増加に伴って急増し、塩分20%以上でほぼ一定となる。カゼインは塩分20%以上でほぼ100%除去され、カゼイン添加率が約1mg/lのとき、処理水のカゼイン濃度は17 μ g/lとなった。二次汚染の可能性は極めて低いと考えられる。

(4)濁質の除去機構 懸濁質の除去機構はカゼインが懸濁質に吸着し、吸着したカゼインが気泡の気液界面に吸着・濃縮し水面に輸送され、次々に供給される気泡によって水面に形成される安定泡沫を分離することで水中から除去されることが考えられる。カゼインの吸着作用は塩分によって著しく異なるが、カゼインの塩分に基づく構造変化によると考えられる。

3-3 まとめ

①カオリン(50mg/l)は、カゼイン0.05 mg/l、塩分20%以上、処理時間5分で約90%除去される。

②カゼインはカオリンに吸着し、その吸着はFreundlichの吸着等温式で良くで表される。

③運河底泥懸濁質は、カゼイン添加率2.5~5mg/l約90%除去できる。

④カゼインはほぼ100%除去される。

⑤懸濁質の除去機構はカゼインが濁質と気泡を結合させることに基づく。

以上の結果から、泡沫分離法による海産性魚介類の陸上における循環式蓄養(水族館を含む)と養殖、浚渫余水の処理、あるいは運河水などの浄化の可能性が高くなったと思われる。

参考文献 1)D.L.Gilbert, W.J.Adelman, Jr. and J.M.Arnold(1991) Squid as experimental animals, Prenum Press, 42-50. 2)武田重信ほか(1990) 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 研究報告U90042, 1-25. 3)K.Hirayama, et al.(1988) The accumulation of dissolved organic substances in closed recirculation systems, Aquacultural Engineering, Vol.7, 73-87. 4)丸山俊朗ほか(1991) 活魚輸送・蓄養における泡沫分離法の飼育海水浄化能, 57(2), 219-225. 5)丸山俊朗ほか(1992) 循環式泡沫分離-生物酸化蓄養システムのヒラメ繰り返し収容における水質維持能, 平成4年度日本水産学会春期大会講演要旨集, p184. 6)T.R.Parsons, et al.(1989) Biological oceanographic processes(3rd Edition), Pergamon press, p 59. 7)東京都環境保全局(1991) 平成2年度 公共用水域の水質測定結果(資料編), 10-11, 392-394. 8)亀井 翼ほか(1994) 三成分並列逐次反応モデルによる全有機炭素化合物, トリハロメタンの生成予測, 水道協会雑誌, 21-32. 9)山崎隆義(1982) III.輸送方法と問題点, 7.陸上輸送 活魚輸送(水産学シリーズ38)(日本水産学会編), 恒星社厚生閣, 東京, 98-99. 10)浅川牧夫(1990) 魚類の体表面粘質物と生体防御 -ウナギシアル酸含有タンパク質の機能-, 化学と生物, Vol.30, No.4, 267-269. 11)柳田充弘(1992) DNA学のすすめ, 講談社, ブルーバックス B582. 12)丸山俊朗ほか(1991) 泡沫分離法による運河水の処理性に関する実験, '91日本沿岸域会議研究討論会講演概要集 No.4, 11-12.