

閉鎖性水域の浄化技術の現状

Approach to Purification Techniques of Enclosed Water Regions

技術本部 縄田 秀夫*¹ 中村 宏*²

下関造船所 酒井 能具*³

高砂製作所 南部 和幸*⁴

長菱エンジニアリング株式会社 葛西 宏直*⁵

閉鎖性水域の汚濁の根本原因は水底への過剰な有機物負荷の沈積及び水底の溶存酸素の低下にある。本報では有機物負荷の水底への沈積軽減が可能な強制的流動促進による水質浄化に着目した。水流発生装置による流動促進、シミュレーション計算による浄化効果の予測技術に底生生物による浄化技術を加えた新しい水域浄化方法について述べる。さらにこれらの技術を適用した具体例として、内湾での養殖漁場水域の浄化プロジェクト及び汚濁河川の浄化対策工事例を紹介する。

The fundamental cause of water pollution in enclosed water regions is the accumulation of organic matter and the lack of dissolved oxygen near the bottom. We recognized that artificial flow generation would prevent organic matter from accumulating at the bottom and make water purification possible. This report describes the new water purification method which consists of a flow generation technique using a flow generator, purification by the benthic animal and a technique for predicting the effects of water purification using a computer simulation. Two examples of actual water purification are shown, finally. One is an introduction to a water purification project of nursery in the bay, and the other describes the purification of a polluted river.

1. ま え が き

閉鎖性水域あるいは半閉鎖水域と呼ばれるのは、湖沼、堀・池、ダム湖、よどんだ都市河川の陸水域、海域では港湾のある内湾などである。湖沼、堀・池など陸上の閉鎖性水域は、いずれも市民生活に密接な関係を持ち市民の関心の深い環境である。そのためこれら環境の保全や改善が急務の課題となっている。また、近年特に注目を浴びているのは、養殖漁場である。海面養殖に利用される海域は波の静かな内海に片寄りがちで、このような海域は逆に波通しが悪く海水交換の少ない場所でもある。こうした漁場環境の持つ特性に、過密給餌(きゅうじ)や過剰飼育が重なって赤潮の発生、養殖魚の大量斃死などによって現れる漁場の疲弊が問題

になっている。このような海面養殖環境の悪化、海底へのへどろのたい積といった現象は全国至る所に見られ、国外においてもほとんどすべての海面養殖場に現れる深刻な問題となっている。

2. 閉鎖性水域の問題点

2.1 閉鎖性水域の汚濁原因

水域における物質循環と汚濁現象を模式的に図1に示した。閉鎖水域の汚濁をもたらすのは、水域の自浄化能力を上回る有機物負荷にあり、その原因は水域の自浄化能力の低下と有機物負荷の増大にあると考えられている。

2.2 水域の汚濁現象

静止した水塊は、特に夏場上昇した気温に暖められた上層部と、

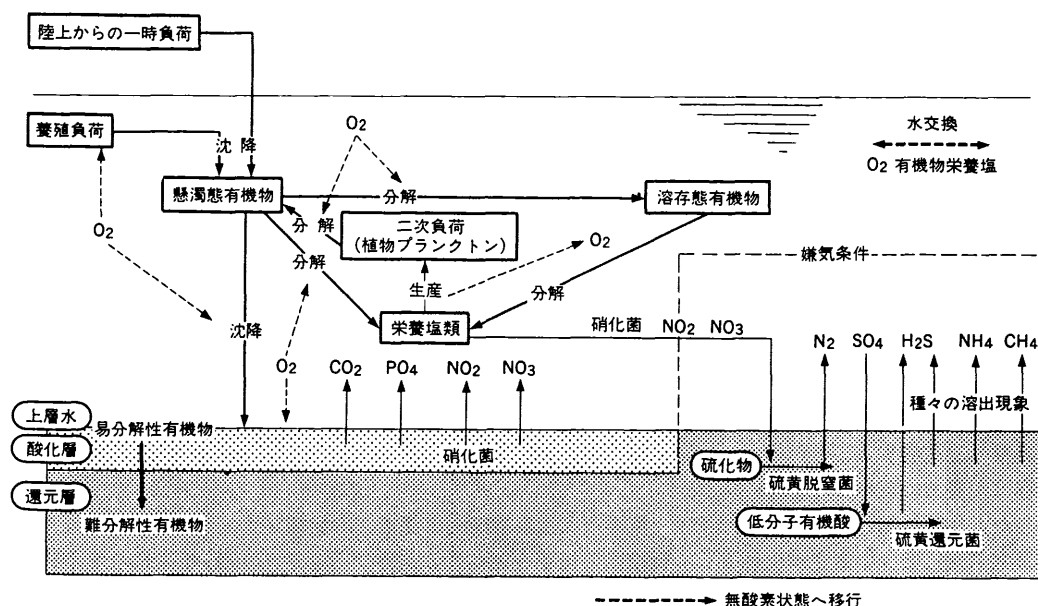


図1 水域における物質循環と汚濁現象 閉鎖性水域内での栄養塩類、プランクトンなどの物質循環と汚濁現象の説明図。
Material circulation and water pollution phenomena in basin

*¹ 高砂研究所流体研究室主務 *⁴ 水車・ポンプ部ポンププラント設計課長
*² 高砂研究所化学研究室 理博 *⁵ 技術開発室技師長
*³ 船舶・海洋部主務

冷えた水底に接する底層の間に温度躍層と呼ばれる境界面を形成し、水面と水底では20℃以上の温度差が生じる場合もある。温度躍層が形成されると、上層では活発な光合成反応で酸素が十分に存在するが、上層と底層では全く水の交換・循環が生じなくなるため、この酸素は底層にもたらされることはない。一方水底には大量の有機物が沈積し、これを底層に残存する酸素を使って分解する反応が生じる。しかし、沈積する有機物量が多いため酸素は早晩消費され、その後、無酸素状態に移行し、嫌気性反応が生じる。これが腐敗である(図1右側)。この腐敗反応によって底泥から発生するメタンや硫化水素などは、水生生物にとって著しく毒性の高い物質である。この発生分は水域の生態系を構成する生物に大きなダメージを与え、ますます水域の自浄化能力を低下させることになる。

このような温度躍層は、夏が終わり外気温が低下するに従って解消される。しかし、温度躍層が形成されている間に台風など急激な攪拌で底層の無酸素水が上層に持ち上げられると、上層の生物にも深刻な影響を与えることになる(東京湾の青潮現象)。水底の有機物は分解され、栄養塩となるが温度躍層の解消によって光が届く上層に運ばれ、植物プランクトンの増殖を促し、更に水の透明度を低下させることとなる。

2.3 水域浄化の基本的な考え方

水域の汚濁現象の根本原因は(1)水底への過剰な有機物負荷の沈積、(2)溶存酸素の低下、にあるが、閉鎖的な地形の影響による水流の停滞は汚濁をさらに悪化させている。水域の浄化のためには、基本的な有機物負荷の削減を求めていく必要があるが、特に我々は水域の流動促進を図ることにより、有機物負荷の水底への沈積を軽減させることが有効な浄化対策の一つであると考えている。

3. 水域浄化技術

3.1 従来技術と問題点

閉鎖性水域の浄化は、流入負荷の削減が根本的対策となるが、現実には下水処理施設の普及などによる窒素・リン等の栄養塩類の除去等の課題があり、抜本的な流入負荷の削減は当面困難と思われる。したがって、水域側でも積極的な浄化対策が必要となるゆえんである。

表1 水質浄化の従来技術
Conventional techniques for water purification

浄化対策	狙い
水路掘削、導流堤	水交換促進
底泥しゅんせつ、底泥覆砂	栄養塩の底泥からの溶出防止
礫(れき)間接触	生物膜による浄化
粘土、石灰石散布等	浮遊物の吸着、凝集沈殿
ばっ気	成層破壊、藻類の抑制

従来実施されてきた浄化技術を表1に示すが、いずれの技術も単独では対症療法的効果しか発揮していないようである。このような現状を改善するため、当社では汚濁の因果関係の解析を初めとして、物理化学的対策や生物浄化法などの諸対策を総合的に用いる浄化手法により対処している。中でも水流発生装置による流動促進と底生生物による底泥浄化法が新技術として有効と考えられ以下に紹介する。

3.2 水流発生装置

3.2.1 方式と基本構成

停滞水域の流動を促進する機械的手法としては、プロペラによる方法、ポンプの吐出流を用いる方法等各種の方式が考えられる。

ここでは実用性を考慮し、水中に可動部がなく、長期間メンテナンスフリーであって任意方向の水流発生が可能な形式として、高酸素濃度の表層水を駆動水として用いる噴流ポンプ型の流動促進方式を採用する。これは吸引・吐出流によって大量の連行流を誘起する流動促進効果を持つとともに、水塊に対して直接の效果的ばっ気作用を持つものであり、当社での実用例では停滞水域の貧酸素水塊の解消にすでに実効が出始めている。

この方式の基本構成を図2に示す。図中①は噴流ポンプの原理に基づく水流発生部、②は整流外筒、③は駆動水ポンプ、④は駆動水供給ホース、⑤は係留又は固定装置である。また同図には海域に設置中の水流発生装置も示している。

人工的に流動を起こす場合、海生物系に対しては激烈な流れは避ける必要があるが、本方式による水流発生方法は十分目的に沿ったものとなっている。

3.2.2 仕様

現在実用している水流発生装置の仕様の一例を表2に示す。

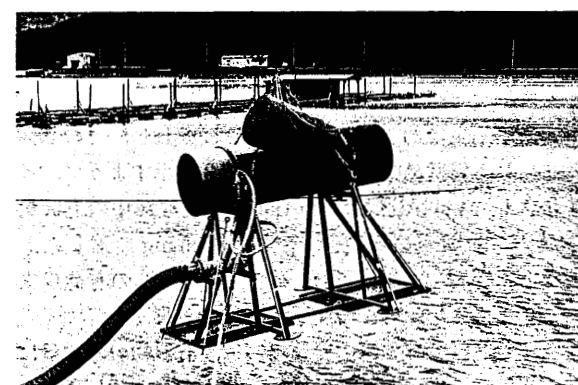
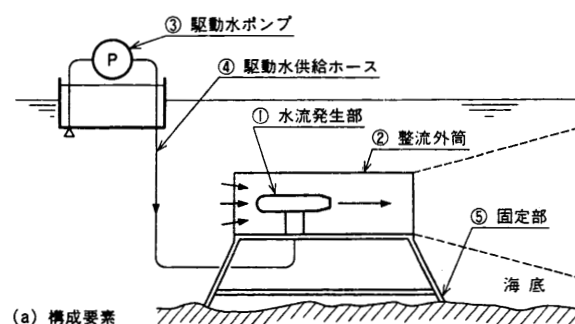


図2 水流発生装置(噴流ポンプ方式) 水流発生装置の構成(a)と実海域へ設置中の水流発生装置(b)を示している。
Flow generator (Eductor)

表2 水流発生装置の仕様例
Specification of eductor

項目	仕様
整流外筒 全長	2 000 mm
整流外筒 内径	600 mm
噴流ポンプ 口径	100 mm
吐出水量	0.4 m ³ /s
駆動ポンプ動力	3.7 kW
連行水量(推定値)	4.6 m ³ /s

3. 3 生物浄化技術

3. 3. 1 底生生物による汚泥浄化方法

最近生物の作用を用い、水域の自浄化作用を強化し環境改善を目指す提案が行われるようになってきた⁽¹⁾。筆者らは、汚濁が進みへどろ化した海底に生息するイトゴカイ (*Capitella* sp.) に着目し、香川大・熊本女子大との基礎研究を通してイトゴカイの機能を利用した海域の汚濁底泥浄化について検討してきた⁽²⁾。その結果、イトゴカイをへどろ化した海底に大量投与することで、給餌や発生植物プランクトンなど継続的に降り注ぐ有機物負荷を迅速に分解処理し、たい積させることもなく持続的浄化効果を上げることが可能であるとの結果を得た。

3. 3. 2 実験成果の紹介

実験室の水槽に、約 1.4×10^4 個体/m² に相当するイトゴカイ幼生を散布、対照としてイトゴカイを投入しない水槽も用意した。両水槽に毎日ハマチ養殖用の餌(えさ)を添加して養殖漁場環境を模擬し、十分な酸素を供給した。図3に、約2か月間の実験における底泥中の有機炭素量(有機物濃度を表す)の経過を示した。

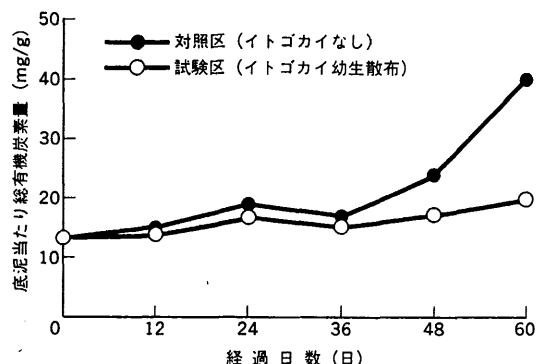


図3 底泥表層(0~1cm)の総有機炭素量の変化
イトゴカイによる海底浄化の効果を表す実験データ。
イトゴカイを散布した区域では日数が経過しても炭素量が変化しない、すなわち海底が汚れない。
Total organic carbon change in bottom surface layer (0~1cm)

イトゴカイ幼生は約1か月後には生体に成長し、この個体が次の世代を生じる繁殖活動を開始した。図3に示すように、イトゴカイを投入しない対照区では40日前後から底泥中の有機炭素が増加し始め、60日目には底泥1g当たり40mgに達した。一方イトゴカイを散布した水槽では、底泥1g当たりの有機炭素量は15~17mgを推移し顕著な増加は認められなかった。

これは、対照区では実際の養殖場同様、有機物の添加量に比べ分解量が下回り、底泥に一部が未分解のままたい積していくのに対し、試験区ではイトゴカイによる底泥の摂食や、耕うん効果(次項参照)などによる底泥微生物の活性促進の結果、有機物の分解が促進されるためであると考えられる。このほか、対照区の底泥表面は黒色を呈し硫化水素臭を発生しへどろ化するのに対し、イトゴカイ幼生散布試験区では、そのような様子もなく底泥の嫌気化が抑制されることが認められた。

3. 3. 3 今後の見通し

イトゴカイは、生息海水の溶存酸素が2ppm程度でも生存に問題はないと考えられており⁽³⁾、かなり汚濁して溶存酸素の低下した海域でも汚泥中の有機物を削減できると期待される。さらに、イトゴカイは全く酸素のない底泥中にも盛んに潜り、穴をうがつ。このため、従来の機械的な酸素供給方法では到底酸素の及ばな

かった底泥中にも、酸素を含む海水を導き酸化層を広げる耕うん効果が期待できるのである。

しかしこのイトゴカイも、全く酸素のない状態が長く続きさらに硫化水素が発生すると生存できない⁽⁴⁾。イトゴカイを用いて汚濁海底を浄化しようとするれば、機械的手法などで無酸素状態や高硫化水素発生期をなくす、あるいはできるだけ短くしてやる必要がある。

イトゴカイを用いた浄化技術は、あくまで自然の持つ浄化力を基本に、これに流動促進等の人為的な手法を用いた環境改善策を組合せることにより、従来の手法では実効の乏しかった底泥環境改善の課題を克服しようとするものである。

4. 浄化効果の予測技術

4. 1 シミュレーション計算

停滞水域の流動促進により水質浄化を図る場合には、水流の発生・制御技術と合わせて、流れによる浄化効果を予測する技術が重要である。浄化効果の予測方法を以下に示す。

4. 1. 1 流動シミュレーション計算

水域内で水流発生装置等により発生する流れの計算は次のように行う。通常水流発生装置は対象水域内に複数台設置されるので、まず(1)水流発生装置近傍の流れを三次元乱流解析コード(K-εモデル)を用いて計算し、次に(2)その結果を境界条件として水域全体の流れの計算を実施する。この計算の特徴は広域流れに適したマルチレベルモデルを使用し、(1)(2)の計算が連続して実施できるように二つの解析コードを一体化している点にある。

4. 1. 2 生物拡散シミュレーション計算

水域内の流れが求まると、数理生態モデルを用いた生物拡散シミュレーション計算を実施し、水質の指標となる溶存酸素、COD、栄養塩(窒素、リン)の変化を計算する。

4. 2 計算例

(1) 表2の水流発生装置2台を海底に設置したときの設置水深面上の速度ベクトルの計算例を図4に示す。計算領域は120m×200mの範囲で、水流発生装置間の距離は50mである。図では右から左の方向へ3cm/s程度のゆっくりした海域の流れに垂直方向に放水した場合を示している。

(2) 港湾内のコンクリートで囲まれた閉鎖水域内の流動促進を図

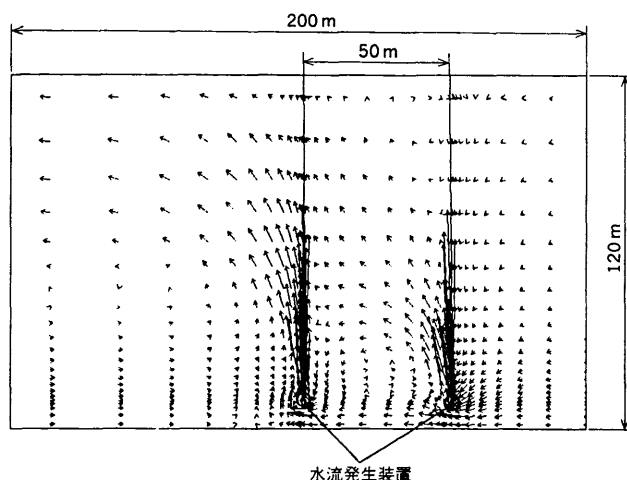


図4 水流発生装置による流れの計算例(速度ベクトル) 海底に設置された2台の水流発生装置による流れを、三次元乱流解析コードにより計算したもの。速度ベクトルを示す。
Example of flow calculation by flow generator (Velocity vector)

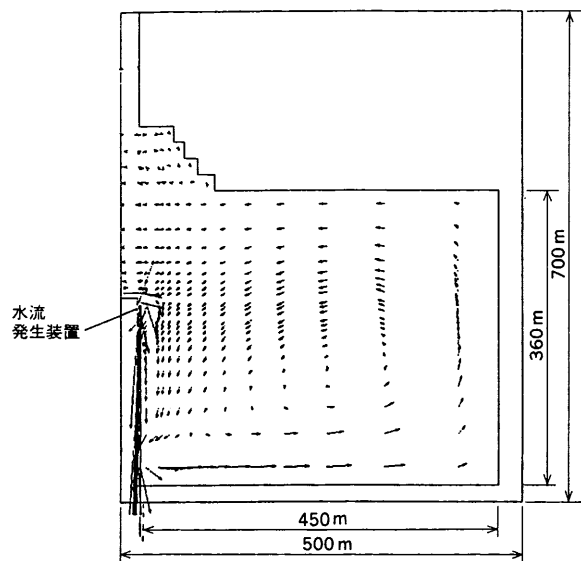


図5 閉鎖水域内の流れの計算例(速度ベクトル) コンクリートで囲まれた港湾内の閉鎖水域を水流発生装置により流動を発生させ水交換を行う例。
Example of flow calculation in closed area (Velocity vector)

るため、水流発生装置を湾に面した開口部近くに設置して水域内の停滞水を循環させ、水域外へ放出する例である。図5は水流発生装置の設置水深面上の速度ベクトルを示す。

5. 水域浄化の事例

5.1 海域浄化

水産庁の関連団体である(社)マリノフォーラム21(MF-21と略称)では水産庁(開発課)の補助事業として養殖漁場海域の浄化をとりあげ、専門家、大分県水産試験場、企業グループの参画を得て、平成3年から研究を開始した。当社は船舶・海洋事業本部が窓口となり、下関造船所が企業グループの幹事会社としてMF-21に参画している。当社は水流発生装置、底生生物浄化法、流動・水質シミュレーション計算などについて担当しており、平成5年度からは大分県入津湾において実証試験が開始された。

5.1.1 入津湾の汚濁現象

入津湾は図6に示すように面積580ha、最大水深30m、水量約1億tであり、湾口部は幅200m、水深約5m(一部8m)と浅くて狭いため、外部の豊後水道との海水交換が極めて少ない、典型的な閉鎖性海域である。この湾にはし尿、下水、河川水などの積年の流入負荷があり、また養殖漁場に伴う負荷も加わり、現状では、海域が富栄養化し、海底には有機物汚泥が大量にたまり積している。このため夏期は温度躍層が形成され、底層への酸素供給が少なくなり、無酸素水塊や赤潮等が発生する。

5.1.2 実証実験の概要

実験海域を図6に示す。当社担当の実験海域は支湾の一つである楠本湾(水量約700万 m^3)で、水流発生装置及び底生生物による浄化実験を実施中である。水流発生装置は水深約18mの海底に設置し、約350m離れた対岸に向け水中放水している。平成5年9月の計測例を流動シミュレーション計算により解析した結果、表2に示す仕様の水流発生装置で1日約40万 m^3 の流動促進能力があると推定された。また躍層攪拌効果もあり、底層への溶存酸素の供給手段として期待される。

底生生物についても現地底泥を用いた水槽実験(水底面積2 m^2)で底泥有機物の削減や水質透明度上昇など顕著な浄化効果

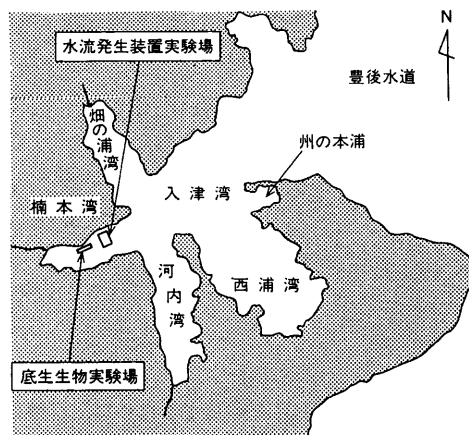


図6 実験海域(大分県入津湾) MF-21プロジェクトとして大分県入津湾にて実施中の試験区域を示す。当社は水流発生装置の試験とイトゴカイによる浄化試験を担当。
Test area at Nyuzu Bay in Oita Prefecture

が確認された。さらに、平成5年12月から養殖いけす直下に試験区を設け、イトゴカイを散布する試験を実施している。

5.2 河川の水質浄化

尼崎市の中央を流れる庄下川は付近の家庭排水や工場排水が流れ込み、汚濁負荷が極めて多い河川である。また一方で海に近い河川であることにより、川の流れが潮の干満の影響を受け、河川水の流下時間が極めて長い河川であり、河川自身の水の交換による浄化作用はほとんど期待できず、水質浄化としては閉鎖性水域と同等の手法が必要となった。

そこで、水質浄化用ポンプ場を設置し、庄下川の水を強制的に近くの中島川へ放流し、庄下川に流動を発生させ、水の交換を行うこととした。この際に、水質浄化用ポンプ場の設置位置や設備容量の決定については海の潮汐を考慮したコンピュータによる流動解析や大型水槽による流動試験を実施し最適化を図るとともに、水質予測シミュレーションプログラムによって溶存酸素やCODの改善についても予測を行い水質浄化用ポンプ場としての事前検証を行った。

6. む す び

水流発生装置による流動促進、底生生物による生物浄化、シミュレーション計算による浄化効果予測技術から成る新しい水域浄化技術について実施例の紹介をした。今後は対象水域に最適な浄化システムの構築はもちろんのこと、浄化の過程で発生する回収物(あおこ、底泥等)の処理、自然エネルギー等を利用した浄化用動力電源の確保等を含めた総合的な水域浄化システムの開発を目指す。

参 考 文 献

- (1) 細川恭史, 浅海域での生物による水質浄化作用, 沿岸海洋研究ノート 29 (1991) p.28~36
- (2) 門谷 茂ほか, 魚類養殖場直下に堆積したヘドロの生物による浄化の試み, 第12回海洋工学シンポジウム報告 (1994) p.501~505
- (3) 上野信平ほか, *Capitella capitata*ならびに *Paraprionospio pinnata*の生理的耐忍性について, ベントス研会誌 23 (1982) p.60~68
- (4) 堤 裕昭, イトゴカイ (*Capitella capitata*)の有機物汚染域への適応, 海洋科学 19-2 (1987) p.106~111