

内部にひも状担体接触酸化部を有する透過性礫堤体の浄化特性

福 永 和 久* ・ 伊 藤 彰** ・ 石 谷 邦 治***
坂 田 守 生**** ・ 尾 島 啓 介*****

1. 緒 言

近年、閉鎖性水域の水質汚濁は水質汚濁防止法の整備によりかなり改善されてきているが、昨今のウォータフロント開発の進展や水質改善を求める社会的要請の高まりにより、更に閉鎖性水域の浄化ニーズが高まっている。

この閉鎖性海域の水質改善策の1つとして、礫間接触酸化法が注目されている。この礫間接触酸化法は、礫表面の微生物の浄化作用によって、汚水中の有機物を除去する方法で、最近では、河川水の浄化方法として、長内(1990)、木下(1989)らが実施例を報告している。

しかし、低汚濁海水への適用については、最近になりようやく研究が開始された状況である。小田ら(1992)は、大阪港の実海水を用いた室内水槽実験により、礫間生物膜の基本的な浄化特性を明らかにしている。又、田澤ら(1991)も実海水を利用した連続通水実験により、礫間接触酸化法の基本浄化特性・圧力損失等を調査している。又、赤井ら(1990)は、潮位変化のある水域に、礫や捨石で築堤した透過性の堤体を設置し、潮位差により出入りする往復流を利用した海域の直接浄化についても研究している。

このように、閉鎖性水域の大量・低濃度の汚濁海水を浄化する方法として、礫間接触酸化法や透過性礫堤の様な礫を利用した浄化方法は、非常に有効と考えられる。

一方、筆者らは、従来から、実海水を用いた連続通水テストによる接触担体の機能評価を行ってきた。その結果として、ひも状担体が浄化効率の良いことを報告している(伊藤ら, 1991)。そこで、今回、大型付着生物・微生物の浄化機能を利用したフィルター効果を有する透過性礫堤の特性を評価しつつ、この透過性礫堤の浄化効率を更に高めるために、礫堤の内部にひも状担体を組み込んだ浄化装置を考案した。

本論文は、この新しい透過性礫堤体の浄化能力をパイロットテストで確認するとともに、浄化シミュレーション

を行い、実規模スケールアップの検討を行ったので報告するものである。

2. 透過性礫堤体

図-1に、透過性礫堤体の断面図を示す。

透過性礫堤体は、割栗石・礫・天然石等で築堤した石積堤体の内部に、ひも状担体を吊り下げた接触酸化部を設けたもので、この組み合わせをパッケージとして、単独あるいは何段にも連続して設置し、一方向に汚濁海水を流し浄化を図るものである。汚濁海水の流し方には、潮汐差による往復流、堰操作による断続流等も考えられる。ひも状担体接触酸化部の下部には、礫部で消費したDOを補給するための散気管を設置し、エアレーションを行う。又、上部は遊歩道等の活用も考えられる。

ひも状担体は、塩化ビニリデン製・モール状外径25mmφ、比重1.7のものである。この担体は、従来より、し尿浄化槽や下水処理の分野で高濃度微生物保持担体として利用され、樫村ら(1981)や栗山ら(1992)により、優れた浄化特性が報告されている。

今回の透過性礫堤体のポイントは、このひも状担体接触酸化部を内部に有した点である。すなわち、ひも状担体に付着する高濃度微生物と、礫部に生息するゴカイ・フジツボ等の大型付着生物及び微生物により、海洋生態系の食物連鎖を堤体内に形成し、効率的に浄化を図ろうとするものである。尚、今回の報告は、一過式流れについて行ったものである。

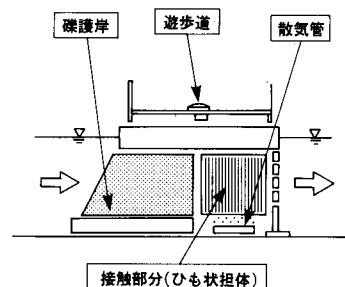


図-1 透過性礫堤体の断面

* 正会員 工修 新日本製鐵㈱ 技術開発本部
** 工修 新日本製鐵㈱ 君津製鐵所
*** 正会員 新日本製鐵㈱ 技術開発本部
**** 工修 新日本製鐵㈱ 技術開発本部
***** 正会員 工修 新日本製鐵㈱ 堺製鐵所

3. 実験装置と実験方法

実験は、下記3つのテストプラントにより行った。

1) 接触酸化槽テストプラント

水槽は、1m×1m×1m高の亚克力水槽にひも状担体を充填したものを用いた。実験は、図-2に示す様に、実海域の汚濁海水をポンプアップし、連続通水することにより行った。水中ポンプは、浮きに固定し、海域水位が変動しても、常に水面以下0.5mの位置から取水できる様にしている。又、接触酸化槽の下部には、散気管を設置し、エアーを供給した。

2) 透過性礫堤体テストプラント

水槽は、1m巾×3m長×1.2m高の鋼板製のものを3系列用いた。No.1水槽には、粒径50～150mmの礫のみを内部に築堤した。No.2水槽とNo.3水槽には、この礫に加え、ひも状担体を組み合わせた。No.2水槽は、ひも状担体接触酸化部を前段に設け、後段に礫部分を設けた。逆に、No.3水槽は、前段を礫部、後段をひも状担体接触酸化部とした。各水槽内のひも状担体接触酸化部下部には散気管を設け、エアーを供給した。

尚、実験は、接触酸化槽テストプラント同様、実海域の汚濁海水をポンプアップし、連続通水することにより行った。

3) 海域柱状カラム

カラムは、1m×1m×5m高のSUS製金鋼を張った鋼製枠に礫を充填したものを用いた。このカラムを礫の上部がHWLになる様に、実海域内に吊り下げた。このカラム内の礫に付着した生物相の観察、サンプリングは、大型レッカーでカラムを吊り上げることににより行った。

COD, SS, DO, DO消費速度等の分析は、全て下水試験方法(日本下水道協会, 1985)にもとづく。又、陸上プラントは、光合成による藻類の増殖を抑制するため、暗条件にした。1)～3)のテストは、平成3年9月から約1年間に渡り実施した。

4. 実験結果と考察

1) COD 浄化速度係数, DO 消費速度係数

ひも状担体接触酸化部と透過性礫堤体礫部のCOD浄化速度係数及びDO消費速度係数の比較を行った。ひも状担体については、接触酸化槽テストプラントを、礫部については、透過性礫堤体テストプラントを用いた。

実験は、水槽内HRT(水理学的滞留時間)を変化させ、連続通水後の処理水質を測定した。ひも状担体の結果を図-3に、礫部の結果を図-4に示す。

COD浄化速度係数 μ_{COD} は、下記(1)式により算出した。

$$\mu_{\text{COD}} = \frac{1}{t_1} \ln \left(\frac{C_{01}}{C_{t1}} \right) (1/\text{hr}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 t_1 はHRT(hr)、 C_{01} は入側COD濃度(mg/l)、 C_{t1} は出側COD濃度(mg/l)である。

ひも状担体は、HRT 2hrで、処理水COD 2.2mg/lとすると、COD浄化速度係数0.467(1/hr)となる。又、礫部は、HRT 1hrで、処理水COD 1.8mg/lとすると、COD浄化速度係数は、1.135(1/hr)となり、ひも状担体に比べ、高い浄化効率を示した。

接触酸化部では、酸素供給を行うが、礫部では、逆に酸素が消費されるため、礫部のDO消費速度係数を測定した。DO消費速度係数 μ_{DO} についても、COD浄化速度係数同様、初期DO濃度 C_{02} (mg/l)、最終DO濃度 C_{t2} (mg/l)、経過時間 t_2 (hr)から算出した。

$$\mu_{\text{DO}} = \frac{1}{t_2} \ln \left(\frac{C_{02}}{C_{t2}} \right) (1/\text{hr}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

DO消費速度係数は、COD濃度により、大きく変化するため、プラント流入部・中間部・流出部の3箇所での測定を行い、その結果から、COD濃度に対するDO消費速度の減衰式を導いた。表-1と2に、測定結果を示す。減衰式を、 $\mu_{\text{DO}} = aC_{\text{COD}}^b$ と仮定し、指数回帰により、算定した結果が(3)式である。

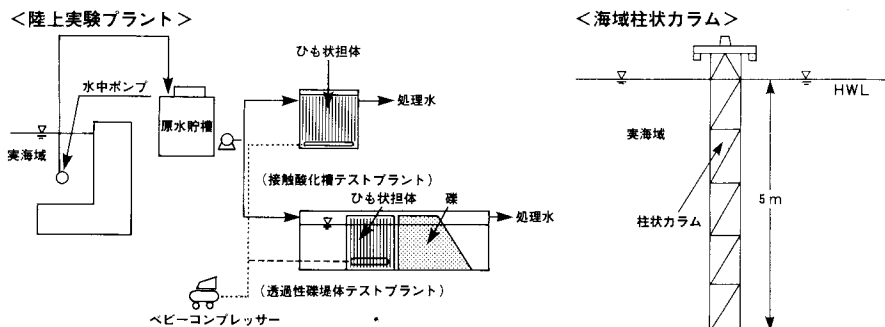


図-2 実験プラントフロー

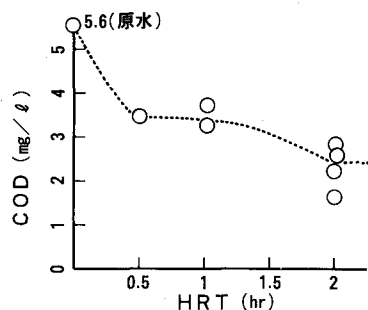


図-3 HRTと処理水質の関係
(ひも状担体接触酸化部)

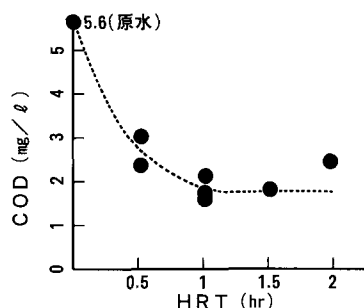


図-4 HRTと処理水質の関係
(透過性膜堤体膜部)

表-1 呼吸速度測定結果

	初期濃度 (mg/l)	最終濃度 (mg/l)	経過時間 (s)
流入部	6.0	3.5	170
中央部	6.0	3.0	442
流出部	6.0	4.6	663

表-2 DO消費速度係数測定結果

	COD濃度(mg/l)	μ (1/hr)
流入部	5.6	11.414
流出部	1.8	1.511

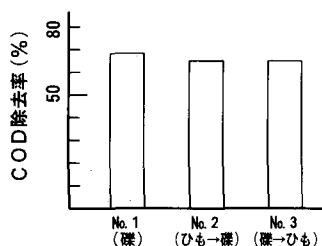


図-5 COD除去率の比較

$$\mu_{DO} = 0.53 C_{COD}^{1.782} (1/hr) \quad \dots\dots\dots (3)$$

2) ひも状担体と膜の組合せテスト結果

図-5に、透過性膜堤体の3つの水槽のCOD除去率を示す。膜のみを築堤したNo. 1水槽は若干、COD除去率が高くなっているが、大きな差はみられなかった。一方、生物相についてみると、膜部には、ゴカイ・フジツボ、定在目等の大型付着生物が多く、ひも状担体には、微生物が多く出現した。

COD浄化速度係数だけをみると、前述した様に膜部の方が浄化効率が高い。これは、SSの補足効果によるものと考えられる。しかし、テストプラントでみられる様に、ひも状担体には、浄化に寄与する微生物が多く付着しているため、今後も継続してテストを行い、膜部とひも状担体の浄化特性を比較していく必要がある。

3) 海域柱状カラムテスト結果

図-6のDO消費係数(酸素利用速度)は、柱状カラム1m間隔に代表汚泥をサンプリングし、下水試験法にもとずき、測定した結果である。

DO消費速度係数を水深をパラメータにして、 $\mu_{DO}(h) = ah^b$ と仮定し、指数回帰による求めた水深補正式が(4)式である。

$$\mu_{DO}(h) = 1.123 h^{-0.411} (1/hr) \quad \dots\dots\dots (4)$$

但し、 $h \geq 1m$ である。 $0 \leq h < 1m$ の時は、 $\mu_{DO} = 1.0$ である。

この(4)式に(3)式を乗じると(5)式になる。

$$\begin{aligned} \mu_{DO}(C_{COD}, h) &= \mu_{DO} \cdot \mu_{DO}(h) \\ &= 0.595 C_{COD}^{1.782} h^{-0.411} (h \geq 1m) (1/hr) \\ &\dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

又、COD浄化係数についても、同様の水深補正を行なうと(6)式になる。

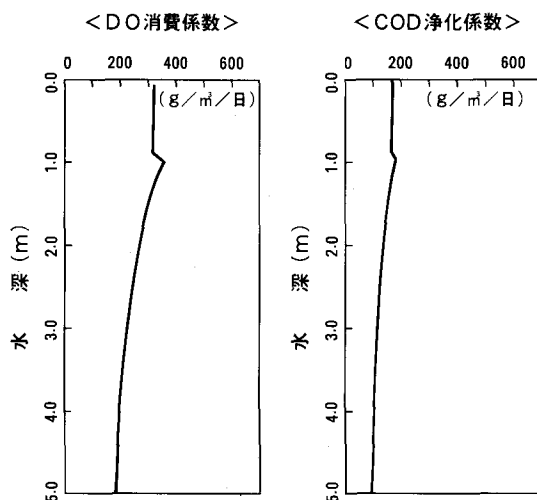


図-6 柱状カラムのDO消費係数とCOD浄化係数

$$\mu_{\text{cod}}(h)=1.26h^{-0.411} \text{ (1/hr)} \dots\dots\dots (6)$$

5. 数値シミュレーションによる実規模予測

透過性礫堤体内の流れは、多孔質媒体内の浸透流に近い流れと仮定し、ダルシー流れとして、浸透流方程式を解いた。又、多孔質媒体内の物質移動は、分散により行なわれることから、フィックの拡散方程式を用い、礫表面の生物膜による減衰を浄化係数を用いた浄化項として考えた。下記にモデル式を示す。尚、流れは、*xy* 方向の2次元とした。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

$$u = -K \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = -K \frac{\partial h}{\partial y} \dots\dots\dots (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial c}{\partial y} \right) \\ & - u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} - \mu c \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

- ここに、*u, v*; *x, y* 方向の流速成分 (m/s)
K; 透水係数 (m/s), *D*; 分散係数 (cm²/s)
h; 基準面から自由水面までの高さ (m)
c; COD 濃度あるいは DO 濃度 (mg/l)
μ; COD 浄化速度係数あるいは DO 消費速度係数 (1/hr)

堤体は、図-7 に示す様に直方体とし、下流側の水深 (CD 長) を 3 m とした。境界条件を、拡散方程式を例にとり、下記に示す。

- ① AB 面: 上流側静水域境界
上流側 COD 濃度・DO 濃度
- ② BC 面: 自由水面境界

$$\frac{\partial c}{\partial n} = 0 \quad n: \text{自由水面に対する方線方向}$$

- ③ CD 面: 下流側静水域境界

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0 \quad \text{濃度勾配一定}$$

- ④ AD 面: 不透水境界

$$\frac{\partial c}{\partial n} = \frac{\partial c}{\partial y} = 0$$

堤体は、礫部とひも状担体接触酸化部の組み合わせをパッケージとし、連続してつなぎあわせ、接触酸化部は曝気による酸素供給・完全混合とした。尚、礫部で DO が 0.5 mg/l になる位置に、接触酸化部を設置した。

上部は遮光するため、堤体内の内部生産は考慮せず、潮位変動の影響も無視できるものとした。

図-8 に計算フローを示す。計算は、浸透流及び拡散方程式を差分法により解き、目標水質を満足できる堤体長 *l* になるまで、繰り返し計算を行った。

表-3 に、計算の前提条件を、表-4 に計算に用いたパラメータを示す。

COD 浄化速度係数及び DO 消費速度係数は、実験結果を用いた。分散係数 *D* は、毛利ら (1991) の水路実験結果で得られたレイノルズ数と分散係数の関係より、下記回帰式を求めることにより設定した。

$$D = \nu 10^{(1.1809 \log Re - 0.1809)} \text{ (cm}^2\text{/s)}, \quad Re = ud/\nu \dots\dots (10)$$

今、*d* を礫径 150 mm とし、*ν* を 0.01 cm²/s, *u* を平均流下速度 1.0 cm/s とし、*D* を計算すると、37 cm²/s と

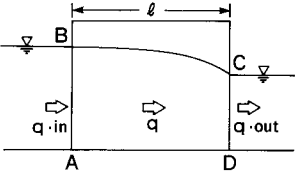


図-7 モデル堤体

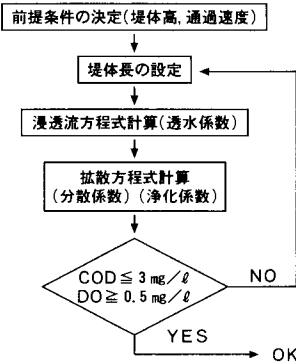


図-8 計算フロー

表-3 前提条件

入側水質	COD	6.0mg/l
	DO	6.0mg/l
処理水質	COD	3.0mg/l
	DO	0.5mg/l 以上

表-4 計算に用いたパラメーター

パラメーター		
1. COD 浄化速度係数 μ_{cod} (1/hr)	礫部	$\mu = 1.26h^{-0.411} (h \geq 1\text{m}), \mu = 1.135 (h < 1\text{m})$
	ひも状担体	0.467 (1/hr)
2. DO 消費速度係数 μ_{do} (1/hr)	礫部	$\mu = 0.595C^{1.782}h^{-0.411} (h \geq 1\text{m})$ $\mu = 0.53C^{1.782} (h < 1\text{m})$
3. 透水係数 <i>K</i> (m/s)		1.54 (m/sec)
4. 分散係数 <i>D</i> (cm ² /s)		37.0 (cm ² /sec)
5. 酸素溶存速度係数 (1/hr)		10.9 (1/hr)

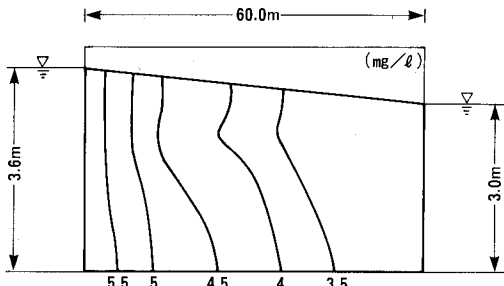


図-9 計算結果 (COD 分布)

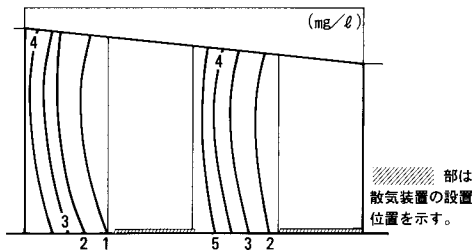


図-10 計算結果 (DO 分布)

なる。

酸素溶存速度係数は、下記 King の算定式を用いた。

$$KL_a = 0.1026 H^{0.71} D^{0.9-1} G^x d_b^{-0.64} (1.024)^T \quad (1/\text{hr}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに H : 散気板までの水深 (m)

D : 溶存酸素不足濃度 (mg/l)

G : 曝気層 1,000 m³ 当たりの吹き込み空気量 (m³/min)

d_b : 気泡の平均径 (cm), T : 水温 (°C)

今、 $H=3$ m, $D=6.0$ mg/l, $d_b=0.5$ cm, $T=24^\circ\text{C}$, $G=6.4$ m³ として計算すると、 $KL_a=10.9$ (1/hr) となる。透水係数については、Fair-Hatch 式、細川ら (1991) の実験結果が報告されているが、両者の中間的な値として、1.54 (m/s) とした。

得られた計算結果を図-9、図-10 に示す。図-9 は堤体内の COD 分布、図-10 は、堤体内の DO 分布である。

結果として、水量 360,000 m³/日、COD 6 mg/l の汚濁海水を COD 3 mg/l まで処理するには、60 m 規模の堤体が必要であり、この 60 m 流下の中に圧力損失が 62 cm つくことがわかった。尚、この 60 m 堤体内、30 m が礫部、30 m がひも状担体部である。

6. 結 論

し尿浄化槽・下水処理の分野で高濃度微生物保持担体として実績のあるひも状担体を用いた透過性礫堤体の浄

化特性について調査した。以下に、得られた知見を要約する。

- 1) 礫を単独で築堤した透過堤の COD 浄化速度係数は、1,135 (1/hr) で、ひも状担体接触酸化部の COD 浄化係数 0.467 (1/hr) よりも高い浄化効率を示した。
- 2) 礫部の DO 消費速度係数は、COD 値により変化し、 $\mu_{DO}=0.53 C_{COD}^{1.782}$ で表わされる。
- 3) 礫単独で築堤した透過堤と、ひも状担体を組み合わせた透過堤の間で、COD 除去率に大きな差は見られなかった。又、出現した生物では、礫部には、大型付着生物が多く付着し、ひも状担体には微生物が多く出現した。
- 4) 柱状カラム各水深の代表サンプルから実測した DO 消費係数より、水深をパラメータとする DO 消費速度係数算定式を導いた。同様に、COD 浄化速度係数についても水深補正式を算定した。
- 5) 透過性礫堤体内の浄化をシミュレーションできるモデルを構築し、実験値を用い、実規模堤体予測を行った。その結果、360,000 m³/日・COD 6 mg/l の汚濁海水を COD 3 mg/l まで浄化するには、60 m 長の堤体が必要である。

参 考 文 献

- 赤井一昭・上田伸三・和田彦彦・上嶋英機 (1990): 人工環礁 (海洋の空) の機能について: 海洋開発論文集, Vol. 6, pp. 71-75.
- 伊藤 彰・福永和久・尾島啓介 (1991): 接触酸化法の海水浄化への適用実験, 第 26 回日本水環境学会講演集, pp. 118-119.
- 長内武逸 (1990): 礫間接触酸化法による河川水の直接浄化, 用水と廃水, Vol. 32, No. 8, pp. 16-25.
- 小田一紀・貫上佳則・重松孝昌・大屋博史・網潔之・倉田克彦 (1992): 礫間生物膜の海水浄化効果と現地へのその応用に関する研究, 海岸工学論文集, Vol. 39, pp. 991-995.
- 樫村 勉・土屋史郎 (1981): ひも状接触材の性質と応用, 用水と廃水, Vol. 23, No. 4, pp. 18-21.
- 木下英俊 (1989): 河川の浄化-多摩川における水質浄化対策, 水質汚濁研究, Vol. 12, No. 7, pp. 19-22.
- 栗山光央・柿井一男・小林 実・熊 岳平・植場久昭・大橋一晃・佐藤等 (1992): 微生物支持体「バイオループ」を用いた下水処理, 水環境学会誌, Vol. 15, No. 6, pp. 31-38.
- 田澤竜三・浅見 勝・佐藤 弘・樫内孝信 (1991): 生物濾過能を利用した低汚濁海水の水質浄化: 第 26 回日本水環境学会講演集, pp. 120-121.
- 日本下水道協会編 (1985), 下水試験方法, 643 p.
- 細川恭史・伊藤辰也・田中 修・石崎晃司 (1991): 沿岸域水質改善のためのレキ接触工法水路実験, 日本沿岸域会議研究討論会講演集, No. 4, pp. 16-17.
- 毛利光男・須田有輔・窪田博公・山崎信男・山口 忍・細川恭史 (1991): 礫間接触水路の縦分散係数について, 土木学会第 46 回年次学術講演会, pp. 1120-1121.