

沿岸運河水浄化のための水路型礫間接触酸化施設の設計条件

細川 恭史*・大槻 忠**丹羽 千明***

1. はじめに

富栄養化した内湾域のうちでも沿岸運河部は、特に水が動き難く水質悪化が懸念される水域である。また、周辺の整備により市民的なアクセスが図られやすく、水質の浄化が望まれる水域でもある。比較的限られた細長い水面の浄化に対し、礫間接触化施設の適応を想定した。個体表面に微生物を膜状に付着させ、これと汚濁水とを接触させることで浄化をはかる方法を生物膜法と呼ぶ。礫間接触酸化法は生物膜法の一つで、付着基盤に礫を用いる方法である。ここでは、水路内に礫を積み上げ、礫層内の空隙を汚濁水が流れる水路型の施設を対象にした。河川水浄化のための実規模施設は幾つか見られる(中村ら, 1987)が、沿岸海水に対する検討事例は少ない(小田ら, 1993)。沿岸海水は、下水処理や河川水に比較して有機物濃度が希薄で塩分濃度が高い。こうした水質に対する設計条件の検討例は殆ど見あたらない。生物作用が介在する施設であるので、実際の内湾運河水を用い実規模の大型水路実験を行った。実験は1990年10月から翌年10月までの13ヶ月にわたるものである。著者等の研究グループは、1991年以降の土木学会年次学術講演会で運転経過や個々の諸作用について紹介してきた。また、礫層内部での閉塞に関し別途報告を行った。(毛利ら, 1993)。本論文では、現在までの実験成果の整理をして、数時間以下程度の滞留時間を有する水路型浄化施設の設計上の条件を検討した。

2. 水路実験の方法

東京湾湾奥の砂町北運河に面した陸上に実験水路を設置した。運河より水中ポンプで採取した海水を実験に使用した。水路は図-1に示す様に、コンクリート製長さ30m幅1m高さ1.3mのものを6本並列に並べた。水路底より1.2mまで礫を積み上げ、上流端より自然流下により一方向に海水を流した。水位は下流端の堰で調整し概ね1.0~1.1mで通水している。流入ピットで十分な曝

気を行った。各水路の流下方向に、海水用に3ヶ所と礫用に2ヶ所の採取ピットを設けた。水路はシートで遮光した。

表-1に示す様に条件を変えて運転し、充填礫の大きさ、流下流速、水路内曝気の効果を比較した。礫径は3種類(50%径で11.3, 4.2, 2.5 cm)、通水量は最小と最大で4倍ほど変化させている。水路#6は水路底に敷設した管路より全長にわたって曝気(0.02~0.03 m³/m²/min)を施した。流量は1991年2月に調整しなおしたほか、同年4月には水路の目詰まりが著しいため#1, 6を除き逆洗洗浄を行い、6月には#4, 5の流入端部の一部は新しい礫に入れ換えた。表中のHRTは、水路内空隙容積を流量で除して得られる水理的滞留時間である。

連続運転開始前に礫層の間隙率や水理特性の測定を実施した。連続運転は1990年10月1日より開始し、流量の他、水温、塩分、SS、COD、TOC、透視度等の水質を測定した。測定はほぼ週3日、1日につき2水路を対象に実施した。測定日には、朝の定時流入水採取に始まり採取ピット毎に流達時間を考慮した採取を行った。付着生物の観察、動水勾配の測定を随時実施したほか、10月終了時に見かけ沈降距離を測定した。

3. 主要な実験結果

3.1 原水水質

塩分は14~16‰とやや甘く、淡水の影響を受けている。SSは日変動が大きく降雨等の影響を受けていると思われるが、秋冬に減少し春に増加する傾向があった。

表-1 各水路の実験条件

水路	#1	#2	#3	#4	#5	#6
礫径(mm)	100-150	100-150	100-150	40-80	20-30	100-150
空隙率	.487	.487	.487	.466	.458	.487
比表面積(m ² /m ³)	31.7	31.7	31.7	53.8	216.	31.7
曝気	なし	なし	なし	なし	なし	あり
流量(m ³ /h)	3.0	6.1	11.0	5.6	5.8	3.0
	3.8	7.6	15.5	7.0	6.9	3.8
HRT(h)	5.0	2.5	1.4	2.6	2.4	5.0
	4.0	2.0	1.0	2.0	2.0	4.0

(上段: '90.10~'91.2 下段: '91.2~'91.10)

* 正会員 運輸省港湾技術研究所海水浄化研究室
 ** 農博 シーブルー工法研究会 (元 東亜建設)
 *** シーブルー工法研究会 (清水建設技術研究所)

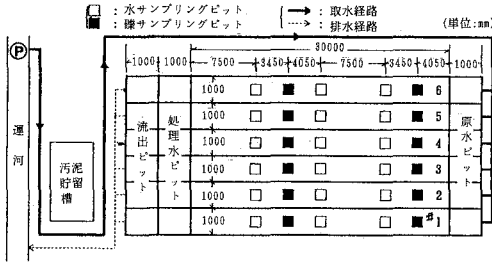


図-1 実験水路概要 (水路 #1~6, 単位: mm)

CODは夏に高く4~7 mg/lの範囲を変動している。クロロフィルa濃度は春から夏にかけて7~34 μg/lと上昇し、富栄養化の状態を示している。

3.2 初期の礫の動水勾配

生物膜付着前の礫の状態を測定した。実験条件での礫空隙での流速は1 cm/s以下程度であり、礫径を代表長さにした採ったレイノルズ数(Re)は10²~10³と遷移領域に近い。塩分トレーサー実験によれば、縦分散係数(D_L/ν, ここでD_Lは水平拡散係数, νは水の動粘性係数)は10³程度であった。Re 30~1600程度の範囲で動水勾配を測定し、動水勾配を与えるいくつかの既往式と比較した。礫径によってもやや異なるが、砂ろ過の損出水頭算定に用いられているFair-Hatchの式で概ね見積もれることがわかった(上原ら, 1991)。与えた実験条件下では、大礫では動水勾配が0.001以下程度となる。30 mの水路でも数cmの水位差で水理的滞留時間(HRT)1時間の流量(15.5 m³/h)を確保できることがわかった。

3.3 処理水質の経時変化

水路#1を例に、月平均した流入水質と処理水質を図-2に示す。流入SS濃度の大きな変化に対し、処理水では概ね2 mg/l以下と安定し、清澄な流出水となっている。透視度は2 mを超え透明感のある水質であった。CODで表される有機物濃度は、運転開始後3ヶ月目頃から徐々に除去されるようになってきているが、除去の割合はSSに比べ低い。流入ピットの曝気により水路流入水DOは高められているものの、流出水はDO 2 mg/l以下と不足している。水路内の生物膜による酸素消費に起因している。1991年夏期は、比較的降雨の多い天候であった。生物膜の発達する初期(1月まで)、海水温20℃以下の中低温期(5月まで)、それ以降の高温期の3期に分けて整理するのが妥当のようである。

3.4 生物相の発達

a) 礫付着生物相

初期(通水後31日目)、中低温期(184日後)、高温期(337日後)にそれぞれ生物膜を礫表面から採取した。膜はいずれも褐色を呈し、付着力は弱かった。採取試料は有機成分と無機物成分とから成り立っている。粒状物

(SS)の内、強熱減量(VSS)として計量される有機成分を生物量の指標とし、礫単位体積あたりのVSS, VSS/SS比、酸素消費速度等を計測した。VSS量は流入端に近いピットでまず増加し、初期には0.1~0.4 kg/m³であったものが1~3 kg/m³へと発達した。VSS/SS比は通水日数に応じて高くなり、初期に10~20%であったが30~60%と河川水付着膜(海老瀬ら, 1979)と良く似た有機物構成となった。初期の膜発達時期には酸素消費速度も大きく、非常に高い生物活性を窺わせた。通水6ヶ月以降は安定し、10~20 g/l/h/g程度の値となった。生物活性の高い初期のCOD除去率は低く、活性はそこそこでも膜量が増えた中低温期以降で除去率が高い傾向がある。今回のような低有機物濃度の汚濁海水の浄化では、除去率向上には生物膜の活性よりも生物膜量の増大のほうがより重要である事が解る。また、生物膜の平均的な比重(1.1)を用いて付着膜厚を推定すると、おしなべて100 μm以下となった。膜厚肥大のみからは、礫層の閉塞は考えられない。

b) 生物膜付着原生動物

海水は、場の条件に応じ様々な生物の発生をもたらす。生物膜上の微生物に加え、より高等な原生動物の発生は、食物連鎖を促進し抑留有機物の分解を促すとともに、動物自らの生物ろ過や有機粒子捕捉等の浄化作用も期待できる。原生動物の共存は、生物膜法に特有の効果である。

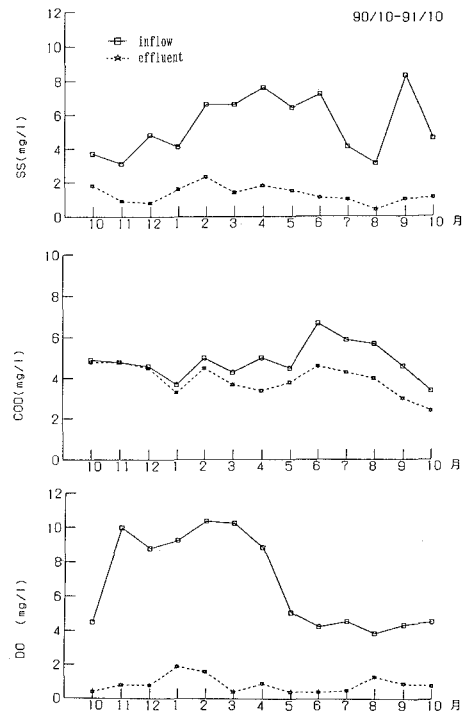


図-2 流入水・処理水の水質の月変化 (SS, COD, DO)

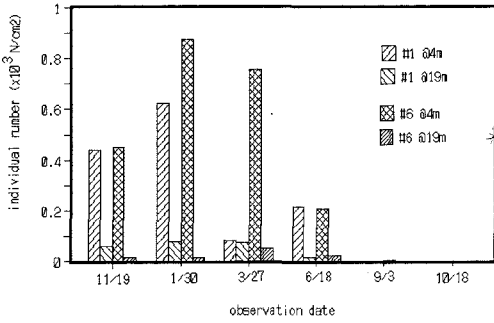


図-3 生物膜付着動物の個体数変化 (水路#1と6)

11月から約2ヶ月おきに生物膜付着動物を観察した。運転後 *Carchesium*, *Vorticella*, *Zoothamnium* といった繊毛虫類がこの順番で卓越種として観察された。9月には個体数が激減し線形動物が優占した。かなりはやい周期で種の遷移が起こったようである。優占繊毛虫類は下水の生物膜処理でも見られる種で、良好な処理が行われた事を示している。海産種も観察されたが占有割合は低かった。付着動物個体数の水路#1,6での観測値を図-3に示す。流入側4mピットでの個体数が圧倒的に多い。

3.5 水質浄化

流量に流入濃度を乗じ時間積分すると、その期間の汚濁物質流入重量が得られる。同様に処理水質を用いて流出重量が求められる。これらの値から、その期間での汚濁物質の除去率が算定できる。3時期についてSSとCODの除去率を水路毎に示すと図-4, 5の様になる。

図-4よりSS除去率を見ると、初期50~70%であったが中低温期以降60~85%程度に向上している。HRTの影響を水路#1,2,3で比較すると、HRTの永い#1で安定した高い除去がみられた。礫径の影響を#2,4,5で見ると、径が小さいほど除去率が向上している。CODの除去率は初期に10%以下であったが、その後15~40%程度に向上した。HRTや礫径の影響はSS除去と類似的傾向がみられた。曝気の影響を#1,6で比較すると、曝気水路の除去率がやや落ちるようであるが、顕著な違いは無いようである。

流入重量と流出重量の差は、水路内に補足抑留された除去量となる。SSについて、全運転期間での流入重量と除去重量とを示すと図-6となる。HRTが短く流量の大きな水路#3が、最も多くのSSを捕捉除去している。引き受ける流量を2,4倍に増やしても、除去率は1/2,1/4とは下がらず比較的高い除去率となっているためである。この傾向はどの期間をとっても認められた。水路入り口部での除去作用が大きいと思われる。水路#3の通年除去量450kgは、比重1.1を仮定して水路底30m²に敷き詰めると、厚さ1.5cm程度に相当する。337日目に

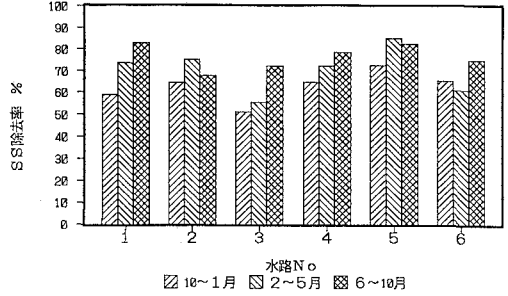


図-4 期間別水路別SS除去率

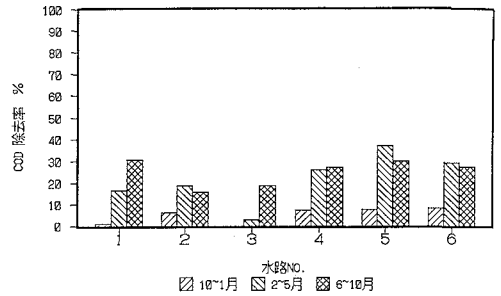


図-5 期間別水路別COD除去率

同水路の採水ピットの底に貯まった堆積物を計測したところ、4cm~数mmの厚さであった。HRTと除去率との関係をプロットしてみると、かなりばらつく。閉塞や降雨影響の少ない中低温期について図-7に示す。上に凸の関係がHRT1時間以上の区間で認めらる。運転時間あたりの除去量を重視する施設であれば、HRT1時間以上では運転上の障害が起きない限りでなるべく短いHRTのほうが効率がよいことになる。

細菌類や植物プランクトンの除去はごく良好であった。沈降速度の極めて遅いこうした成分は、単粒子沈降以外の生物的作用等によって除去されているものと思われる。

3.6 礫層の閉塞

a) 大型生物の付着による閉塞

6月に水路#4,5を中心にムラサキガイ (*Mytilus*)

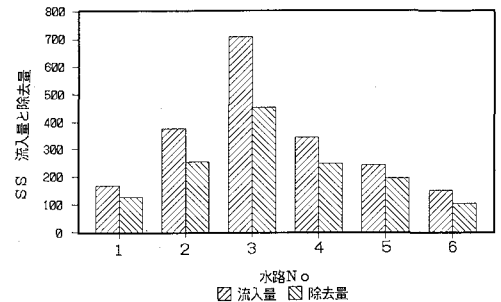


図-6 水路別のSS流入量と除去量 (単位: kg)

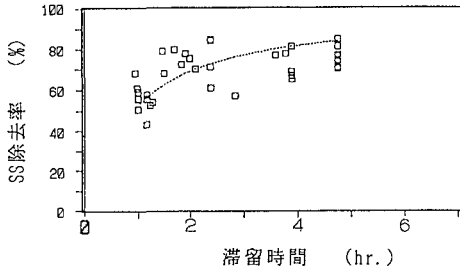


図-7 水路のHRTとSS除去率(中低温期)

が流入部礫に付着し、通水が阻害された。殻長は4~22mmであり、前年暮れから初夏にかけて幼生が付着したものと思われる。ムラサキガイの足糸により礫や付着物が絡まり洗浄除去が困難なため、入口部の礫を新たに入れ換えた。入れ換え後41日目に動水勾配分布を測定したところ、中礫水路(＃4)で3mまで、小礫水路(＃5)で2mまでの区間で大きな通水抵抗が観測された。動水勾配の最大値は＃4で0.02、＃5で0.07に達した。(20°C, $v=0.3$ 及び0.1cm/sで比較。上原ら, 1992)。ムラサキガイの再付着によるものであった。大礫水路でも流入部でのイガイ付着はみられたが、動水勾配の変化は少なかった。通年運転を考えるのであれば、ここで採用した大礫径程度以上の礫の使用が必要であろう。

b) 剝離膜による閉塞

大礫水路でも徐々に動水勾配は上昇した。膜の肥大だけでは説明できず、付着膜の剝離と運搬再堆積といった作用の中での現象と推定された。通水192日後の動水勾配の分布状況を、大礫水路について図-8(毛利ら, 1993)に示す。各動水勾配値は水位を測定した前後2地点の中間位置にプロットした。流量が大きくSS抑留が大きな水路ほど水路の下流側で動水勾配が大きくなっている。水路＃3の12~2月の期の水路内SS濃度分布では、剝離が観察されている7.5m付近での自濁による濃度上昇が読み取れ、粒径の大きな粒子も観察された。途中のSS濃度上昇のため、流入原水濃度にまで再低下するのに水路長の前半分近くを必要とした。HRTが短い場合、剝離による影響を考慮し補償距離を見込んでの水路長の設定等が必要であろう。一方、＃1, 6水路では礫洗浄をせずに通年の通水ができた。夏から秋にかけて動水勾配が水路全体にわたって低下する様子が観察された。生物作用による抑留有機物の減量も考えられる。付着抑留量に対し礫径、流量、水路長等が適切であれば、長期継続運転も可能性がある。＃6では動水勾配は小さく、曝気による攪拌で抑留物が礫層内に分散していると思われた。

3.7 沈澱池と見立てたときの見かけ沈降距離

粒子が重力による沈降だけで除去されたとして、礫層

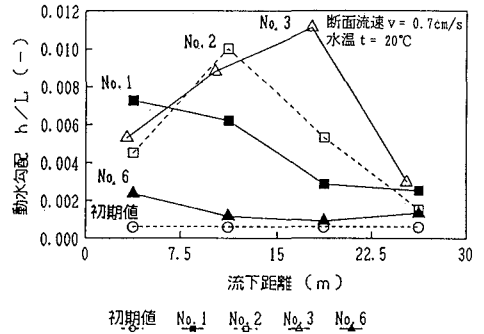


図-8 大礫水路の動水勾配分布(通水192日目)
(断面流速0.7cm/s水温20°C条件での換算値)

内の見かけの沈降距離を推定してみた。①流れは層流である、②礫表面への沈降粒子は再浮上しない、等理想的沈澱池と仮定している。沈降速度分布既知の粒子トレーサーとしてカオリンを用いた。投入後流下にとまらう各地点でのSS濃度の経時変化を測定した。各地点での通過SS量から除去率を求め、その除去率を与えるためには理想沈澱池内をどれくらいの速度で溢流していることに相当するのかを求めた。溢流流速と滞留時間との積を理想沈澱池の見かけ深さすなわち見かけの沈降距離とした。

カオリンの50%値沈降速度は0.1mm/s程度で、微細粒径部分での沈降速度は誤差が大きい。実験時は各水路とも13.2m³/hの流量で通水した。流下につれ濃度及び通過量が減っている。下流側で誤差が大きく、上流側の2地点での記録から見かけ沈降距離を求めた。水路＃1, 6で10~13cm, 2, 3, 4で3~4cmとなった。(田中ら, 1992)。誤差要因が多いが、見かけ沈降距離は礫間空隙の物理的な長さ程度(礫径程度)かそれ以下であることが推察された。実距離よりも短くなる要因には、沈降以外の作用による粒子の捕足除去も当然含まれる。

3.8 面積負荷

沈澱池解析に用いられる水面積負荷や容積負荷等で処理効率を比較しても良い関係が得られなかった。そこで、礫の面積で日あたりの流入汚濁負荷を除いて面積負荷を求めた。生物膜単位面積あたりの負荷の強さを表すひとつの指標と考えられる。図-9, 10にSSおよびCODに対する整理結果を示す。生物膜あたりの負荷が強くなると、生物膜は膜量や活性の増加によって除去率を維持しようとする。しかし、過大な負荷は健全な成長を妨げる様になる。限界を与える負荷は図から、SSに対し1g-SS/m²/day, CODについて0.5g-COD/m²/day程度と読める。過剰負荷を与えないひとつの目安と考えられる。

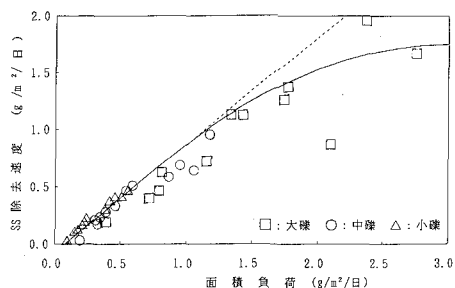


図-9 面積負荷とSS除去速度の関係

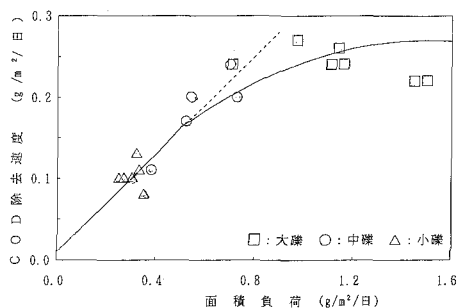


図-10 面積負荷とCOD除去速度の関係

4. 設計の条件

以上の実験成果から水路型礫間接触酸化施設の浄化機構と設計上の配慮事項が整理される。

- 沿岸海水に対しても生物膜の発達認められた。数カ月の付着期間以後、SSに対して6～9割、CODに対して1～4割の除去が見られた。透明な処理水が得られた。生物膜の消費により、処理水のDOは常に低い。
- 粒子や有機物の除去率は、礫径が小さいほど滞留時間が長いほど良いが曝気の効果は明瞭ではなかった。
- 礫径が小さいと初夏の付着貝による目詰まりが著しかった。長期的な運転にはここで用いた大礫程度の径(10～15 cm)は必要と思われる。
- 実験条件範囲内では、粒子の除去量は滞留時間が短く流量の大きな水路ほど増大した。HRT 1時間以上では、なるべく短いほど除去量が稼げた。

e) 流量が大きな水路ほど付着膜の発達が早く、また膜の剥離も進む。水質影響や剥離機構が不詳のため、適切なHRTや流速条件は不明である。内部自濁が想定される場合、これを補償する水路延長を設定する等の工夫が必要となる。HRT 4時間の水路では無洗浄で通年運転ができた。水路内曝気は閉塞を遅らせる効果がある。

f) カオリントレーサー実験から、粒子の除去は沈降過程のほか生物作用等が複合したものと思われた。見かけの沈降距離は礫径程度からやや小さ目の値であった。流入濁質が異なる場合には除去の目安にならう

g) 生物膜の健全な作用が保証できる限界を、面積負荷で評価できた。HRT 1～数時間程度の水路型施設では、必要処理流量と要望処理水質を与えると、面積負荷図から水路容積が推定できる。必要HRT、流下流速や水頭の検討から水路形状を評価できる。流入部と流出部については目詰まりやDO対策などの工夫の余地がある。

実規模の水路実験は、運輸省港湾技術研究所と民間17社(シーブルー・テクノロジー工法研究会)との共同研究として実施された。本報告はその成果の一部である。

参考文献

- 上原 功・門倉伸行・大井千秋・廣田 修・田中 修・細川恭史 (1991): 礫間接触水路における初期損失水頭について、第46回年講, II部, pp. 1122-1123.
- 上原 功・毛利光男・大井千秋・山崎信男・田中裕作・細川恭史 (1992): 礫間接触水路の抑留分布と閉塞について、第47回年講, II部, pp. 904-905.
- 海老瀬潜一・宗宮 功・大塚尚史・(1978): 市街地河川流達負荷量変化と河床付着性生物群, 用水と廃水, 20巻, 12号, pp. 17-29.
- 小田一紀・貫上佳則・重松孝昌・倉田克彦・網 潔之・斉藤 満・西田恭子 (1993): 礫間接触浄化構造物の海水浄化特性とそれによる沿岸局所水域の浄化過程の研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 966-970.
- 田中裕作・毛利光男・田中 修・安松一平・上原 功・細川恭史 (1992): 礫間接触水路におけるカオリンによる沈降特性試験, 第47回年講, II部, pp. 908-909.
- 中村栄一・酒井憲司 (1987): 礫間浄化法による汚濁水の浄化, 土木技術資料, 29巻, pp. 26-31.
- 毛利光男・須田有輔・上原 功・門倉伸行・田中裕作・細川恭史 (1993): 汚濁海水における礫間接触水路の抑留物の分布と閉塞について, 水環境学会誌, 16巻, pp. 516-525.