

礫間接触酸化法による汚濁海水の浄化能に関する実証実験

Pilot Experiments on Coastal Water
Purification by Stone Bed with Biofilm

堀江毅* · 南兼一郎** · 河澄健輔*** · 大槻忠****

Takeshi HORIE*, Kenichiro MINAMI**, Kensuke KAWAZUMI***, Tadashi OHTSUKI****

ABSTRACT : Large scale model channels (15m long, 2m wide and 1.4m deep, 2 channels in series) were constructed for contact purification experiments by stone bed with biofilm at the inner canal of Amagasaki port. And three experimental cases of different conditions which were two patterns (one-way and return) and three hydraulic retention times (15, 30, and 60 minutes) of the flow, were carried out from June 1994 to March 1995.

The results obtained are summarized as follows.

- 1) The removal rate for SS showed higher values than 60%, for the experimental conditions of 15 minutes in hydraulic retention time and 15m in flow distance, and the rate was regarded as the most effective value to the practical use in all other runs.
- 2) In the return-flow run of experiment the removal rate against the inflow load per unit surface area of stones showed higher values such as 14.6% in SS, 6.6% in COD (no filtrated) and 14.3% in TOC, respectively, than in one-way-flow runs of experiments.

KEYWORDS: COASTAL WATER , CONTACT PURIFICATION , BIOFILM , RETURN FLOW , REMOVAL RATE

1. はじめに

礫間接触酸化法については、「シーブルー計画」¹⁾において最も有力な汚濁海水浄化法の一つとして検討が進められて来っており、各種の実験等²⁻⁷⁾を通じてその有効性が解明されつつある。

しかし、未だフィールドにおける実施規模での実験例等は数少なく⁴⁻⁷⁾、実海域への適用化にあたって明らかにすべき点は数多い。

そこでここでは、本法を用いた浄化護岸の設計等考えられる各種の港湾施設等への適用化にあたっての基礎的資料を得るため、特に1) 滞留時間(流速)、通水距離と浄化能の関係、2) 往復流の効果等について明らかにすると共に、3) 目詰まり防止方法等についても検討すべく、平成6年6月から平成7年3月までの約10ヵ月間に亘って、尼崎西宮芦屋港内運河部において同運河水を用いた実証実験を行った。

*運輸省港湾技術研究所 Ministry of Transport, Port & Harbour Research Institute

**運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所 Ministry of Transport, The 3rd District Port
Construction Bureau

***兵庫県土木部港湾課 Hyogo Prefecture, Port & Harbour Section

**** (株) エコテクノロジー研究所 Ecotechnology Research Institute

本文は、上記現地実験により得られた結果を報告するものである。

2. 実験施設

本実験は、図-1に示す尼崎西宮芦屋港東堀運河最奥部の北側護岸上に造成設置した長さ34m×幅2m×深さ1.4mの大型コンクリート製実験水路水槽を用いて実施した。本施設の平面配置および標準断面は図-2に示す通りである。

本施設は上、下端に幅1mのピット部を有する長さ15m×幅2m×深さ1.4mの実験水路A、B2本から構成されており、各水路は直列でも並列でも使用することが可能な構造となっている。また、運河奥尻部側のB水路は一方方向流でのみ使用可能であるが、運河開口部側のA水路は一方方向流のみでなく往復流での使用も可能な構造、設備となっている。

また、運河部における取水施設（ポンプ）は移動可能なものになっており、取水量は三角堰にて計量した後所定量各水路に注入し、余水は越流水として、また供試水は流下後浄化水として運河部に戻せるような設備となっている。

A、B水路とも水深を1mとしているが、日光および越流を防ぐため礫層の深さは1.3mとしており、また大型付着生物の付着による目詰まりの防止対策として各水路の流入端部1.5mの範囲はそれぞれφ30~40cmの大礫を、またその他の中間部はφ10~15cmの中礫をそれぞれ充填している。

さらに、曝気ならびに逆洗のため底部には逆洗装置を敷設しており、引き抜いた汚泥水は汚泥槽に導き所定時間沈降を図った後上澄水は運河部へ放流し、また沈殿汚泥は汚泥濃縮槽へ貯泥し、適宜バキュームカーにて搬出するようにした。なお、採水等のために各水路には5mおきにそれぞれ2ヶ所ずつ採水ピット部を設けており、各水路とも上、下端のピット部を合わせて計4ヶ所でそれぞれ採水等が可能な構造となっている。また、供試水流入部およびA水路の上・下端部とB水路の下端部計4ヶ所からは、連続的な自動採水も可能な装置を施してある。

3. 実験条件

本実験は、本実験施設の構造、規模、配置等および対象水域におけるおおよその水質変化予測計算結果等に基づき、対象運河部水域の水質浄化を図ることを主な目的として、表-1に示す通水方法を变化させた3ケースの実験を行った。

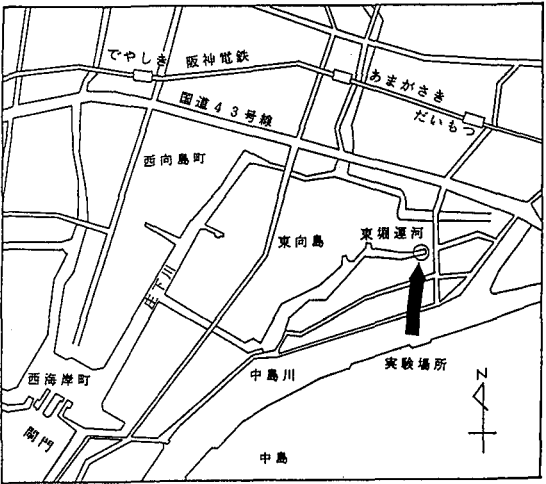
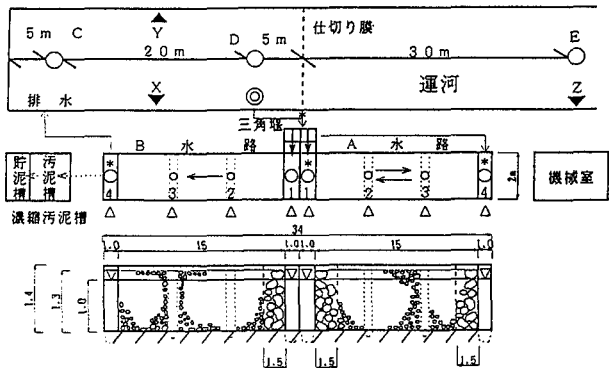


図-1 実験場所



水路内採水地点 (○) A-1, 2, 3, 4 B-1, 2, 3, 4 計8地点
水位測定地点 (△) 上と同じ地点の水路側壁部計8地点およびその他の12地点
生物膜・付着生物測定地点 (○) A-2, 3, B-2, 3 計4地点
運河部採水地点 (○) C, D, E, 計3地点
運河部付着生物測定地点 (△) X, Y, Z 計3地点
自動採水地点 (*) 供試水採水地点、A-1, A-4, B-4 計4地点

図-2 実験施設の配置および測定・採水地点

4. 実験方法

4.1 水理実験

実験の実施に先立ち、今回使用した充填礫の特性（長・短径、表面積、容積など）を明らかにすると共に、本実験施設が有する水理学的特性を把握するため、実験開始時1回また実験終了時1回の計2回、A、B水路の空隙率を測定すると同時に、次のようなトレーサーを用いた水理実験を行った。

(1) 礫径、礫表面積等の測定

各水路とも大礫については5個、中礫については45個ずつ無作為に抽出し、礫径についてはその代表長さ3辺を測定して、その代表長さを基に球体換算直径を求め容積を計算した。また、礫表面積、重量については実測した。

(2) 空隙率の測定

空隙率は、水路の出来上がり寸法から内容積を求めると共に、実際に礫の充填されている水路に注水し、その注入水の容積と水路の内容積の比を算出することによって求めた。

(3) トレーサー試験

トレーサー試験は、流量毎の損失水頭と水路礫間内平均流速の測定、そしてその解析結果から分散係数等を求めるために行った。

試験は塩水を流入ピット部から投入し、下流の所定の位置で塩分濃度を測定する塩分トレーサー法によって行った。塩水の投入は約15%の塩水を、一定流量下で投入するようにした。また、塩分濃度の測定は導電率計を用い、測定は流入、流出ピット部および5m間隔で設けられている採水ピット部において行った。

4.2 浄化実験

(1) 供試水の流下方法

供試水（表-2）は運河部からポンプで汲み揚げ、三角堰にて一定の流量に調整した後A、B2つの実験水路へ注水するようにした。実験水路内に導水した供試水は、設定された一定の流速で、整流板で仕切られたピット部、礫槽、ピット部を順次流下した後、水路外へ排出されるようにした。また、A水路における往復流の実験は、6時間毎に流下方向を自動的に切り換えて行うようにした。

測定・分析用の試水は、水路の流入出ピット部、各水路内の5m毎に2ヶ所設けた採水ピット部からそれぞれ採水するようにした。そして、浄化能（効果）等については、物理的、化学的、生物学的各項目について一定期間毎の測定を経時的に実施して調べるようにした。

なお、供試水の流下フローおよび測定・採水地点については、図-2に示す通りである。

表-1 実験条件

実験期間	実験ケース1 H. 6. 7~10 (3ヶ月間)	実験ケース2 H. 6. 10~12 (2ヶ月間)	実験ケース3 H. 7. 1~3 (2ヶ月間)
対象水域 (対象水量)	30m×30m (2,700㎡)	30m×30m (2,700㎡)	30m×30m (2,700㎡)
流下方式	A水路 一方向流 B水路 一方向流	一方向流 一方向流	往復流 一方向流
水路の使用方法	並列	直列	並列
流量	30ml/h	60ml/h	15ml/h
滞留時間	30分間	15分間	1時間
想定礫間内平均流速	0.83cm/sec	1.67cm/sec	0.42cm/sec
曝気	A水路 なし B水路 なし	あり なし	なし
逆洗	A水路 1回/2週間 B水路 同上	1回/月 1回/2週間	1回/月 同上

表-2 運河部(膜内)の水質(平均)

	実験ケース1 (7~10月)	実験ケース2 (10~12月)	実験ケース3 (1~3月)
水温 ℃	28.5	17.9	10.6
塩分 %	2.61	2.87	2.77
DO mg/l	2.9	3.1	2.4
pH	8.40	8.56	7.59
透明度 m	1.3	2.3	0.7
濁度 mg/l	11.5	4.4	10.1
SS "	3.6	0.9	10.1
COD(酸) "	5.1	3.0	6.2
COD(総) "	6.3	2.7	10.6
DOC "	3.3	3.1	3.5
TOC "	4.9	3.5	4.9
T-P "	0.392	0.408	1.315
T-N "	2.427	3.943	5.818
大腸菌MPN/100ml	50	0	64

(2) 採水方法

各地点における採水は、所定の期間毎に1/2水深層において小型ポンプあるいはサイフォン（運河部においてはバンドーン型採水器）を用いて行った。また、供試水流入部およびA-1、A-4、B-4地点における連続自動採水は、実験期間中4時間おきに行い、原則的に10日間毎に10日間分のコンポジット・サンプルを分析するようにしたが、10日間おきの手動による採水・分析も行った。

(3) 付着生物の測定方法

実験水路内の礫付着生物および生物膜量については、各採水ピット部において平均的と考えられる礫2ヶ所分についてそれぞれの種類および量について調べると共に、合わせてそれぞれの礫の表面積についても測定するようにした。また、運河部側壁の付着生物については、代表的な箇所にて20cm四方(400cm²)の種類と量を調べるようにした。

5. 実験結果

5.1 水理実験

(1) 礫特性

大礫については、A、B水路とも1個当たり平均でそれぞれ長径28.8~30.5cm、短径16.2~19.8cm、高さ13.0~13.4cm、体積3900.0~3988.0cm³、表面積1602.9~1710.2cm²、球体換算直径22.6~23.3cm、重量9276.0~9956.0g、比重2.36~2.39であった。また、中礫については、A、B水路とも1個当たり平均でそれぞれ長径12.6~12.8cm、短径8.7~9.7cm、高さ6.6cm、体積432.4~495.1cm³、表面積350.8~386.4cm²、球体換算直径10.4~10.9cm、重量972.4~1076.0g、比重2.17~2.25であった。

本実験で使用した水路内水中礫の表面積の合計は、A、B水路それぞれ1163.9m²、1278.4m²、容量はA、B水路ともに29.9m³であった。従って、大礫部がA水路では2ヶ所(幅3.0m)、B水路では1ヶ所(幅1.5m)であったためか、A、B水路それぞれ38.9m²/m³、42.8m²/m³程度の表面積を持つ礫槽といえる。

(2) 空隙率

A、B水路の空隙率は、実験開始時(平成6年6月)にはそれぞれ45.2%、44.5%であったが、実験終了時(平成7年3月)には、A、B水路でそれぞれ43.4%、44.4%と、A水路で約1.8%(0.538m³)、B水路で約0.1%(0.030m³)程度それぞれ減少し、その分発生汚泥が残留していることを推測させる。

(3) 損失水頭

損失水頭は実験開始時に比べて、A水路の場合設定流量60m³/hで12mmから68~72mmへと56~60mm程度、30m³/hで8mmから32~48mmへと28mm~40mm程度、また、15m³/hで2mmから12~15mm

へと10~13mm程度それぞれ大幅に増加している。また、B水路の場合も設定流量60m³/hで18mmから59mmへと41mm程度、30m³/hで7mmから26mmへと19mm程度、また、15m³/hで3mmから11mmへと8mm程度それぞれ増加し、特に0.75m地点までの礫槽部で発生汚泥による目詰まりが多くなっていることを伺わせる。

(4) 礫間内平均流速と動水勾配(図-3)

礫間内平均流速と動水勾配の関係をみると、実験開始時に比べ実験終了時には、設定流量60m³/hの場合でA、B水路とも動水勾配は4~5倍程度も大きくなっており、特に流入部0~0.75m地点での目詰まりの大きいことを伺わせる。

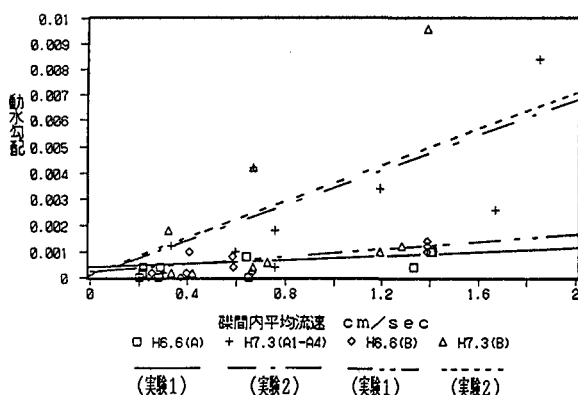


図-3 礫間内平均流速と動水勾配

しかし、通水距離 5m毎の礫間内平均流速は、実験終了時にも実験開始時とそれ程の変化はみられず、設定流量 $15\text{m}^3/\text{h}$ で $0.3\sim0.6\text{cm}/\text{sec}$ 、 $30\text{m}^3/\text{h}$ で $0.6\sim0.8\text{cm}/\text{sec}$ 、 $60\text{m}^3/\text{h}$ で $1.1\sim1.9\text{cm}/\text{sec}$ 程度の値となっている。

(5) 縦分散係数

実験開始時の縦分散係数 D_L は、A水路では $3.9\sim15.3\text{cm}^2/\text{sec}$ から $126.5\sim173.3\text{cm}^2/\text{sec}$ 、B水路では $4.4\sim6.8\text{cm}^2/\text{sec}$ から $191.5\sim447.0\text{cm}^2/\text{sec}$ と、流量の大きなケース程当然のことながら大きな値を示しており、A水路よりもB水路の方が大きな値となっている。また、同じ流量でも下流側程大きな値を示すような傾向がみられる。これに対して実験終了時には、A水路では $6.0\sim23.8\text{cm}^2/\text{sec}$ から $33.8\sim98.8\text{cm}^2/\text{sec}$ 、B水路では $3.1\sim7.7\text{cm}^2/\text{sec}$ から $58.2\sim82.7\text{cm}^2/\text{sec}$ となっており、実験開始時に比べるとA、B水路とも流量の大きなケース程縦分散係数の減少の度合いは大きく、発生汚泥等による目詰まりが進んでいることを伺わせる。

5.2 浄化実験

(1) 生物膜量

礫の付着生物膜量は、A、B水路とも平均で、実験ケース1（平成6年7月～10月）では $7.7\sim9.8\text{g}/\text{m}^2$ 、実験ケース2（10月～12月）では $10.5\sim11.3\text{g}/\text{m}^2$ 、実験ケース3（平成7年1月～3月）では $12.3\sim13.8\text{g}/\text{m}^2$ と、季節の変化にかかわらず順次増加している。

また、VSS/SS比をみると、A、B水路とも平均で、実験ケース1では $0.205\sim0.212$ 、実験ケース2では $0.188\sim0.202$ と両ケースとも大差ないが、実験ケース3では $0.340\sim0.406$ とそれらの約2倍弱になっているのが特徴的である。

(2) 負荷量と浄化量（表-3、図-4～11）

SSはそれぞれ $0.8\sim3.8\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 、 $33.9\sim147.1\text{g}/\text{m}^3/\text{日}$ 程度の負荷量に対して、 $0.5\text{g}/\sim2.5\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 、 $20.1\sim106.5\text{g}/\text{m}^3/\text{日}$ 程度の浄化量となっており、浄化量は設定流量 $30\text{m}^3/\text{h}$ （滞留時間30分）で最も大きな値を示し $2.5\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 、 $98.2\sim106.5\text{g}/\text{m}^3/\text{日}$ 、次いで $15\text{m}^3/\text{h}$ （滞留時間1時間）で $1.0\sim1.3\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 、 $43.2\sim49.7\text{g}/\text{m}^3/\text{日}$ 、 $60\text{m}^3/\text{h}$ （滞留時間15分）で $0.5\sim0.6\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 、 $20.1\sim23.8\text{g}/\text{m}^3/\text{日}$ とそれぞれなっている。

しかし、負荷量に対する浄化率は設定流量が小さい程大きな値を示し、 $15\text{m}^3/\text{h}$ で最も大きく面積当りで $66.7\sim81.3\%$ 、容積当りで $66.2\sim80.3\%$ 、またそれぞれ $30\text{m}^3/\text{h}$ で $65.8\sim73.5\%$ 、 $67.0\sim72.4\%$ 、 $60\text{m}^3/\text{h}$ で $35.3\sim62.5\%$ 、 $35.1\sim59.3\%$ 程度の値となっている。

これに対してCOD（未濾水）の浄化量は、流量 $60\text{m}^3/\text{h}$ では低い値を示すが、 $15\text{m}^3/\text{h}$ と $30\text{m}^3/\text{h}$ では $0.5\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 、 $17.4\sim20.7\text{g}/\text{m}^3/\text{日}$ 程度とほぼ同じ値を示す。また、面積と容積当りの浄化率はそれぞれ $15\text{m}^3/\text{h}$ で $35.7\sim41.7\%$ 、 $33.1\sim36.7\%$ 、 $30\text{m}^3/\text{h}$ で $10.4\sim11.6\%$ 、 $11.1\sim11.2\%$ 、 $60\text{m}^3/\text{h}$ で $5.0\sim7.0\%$ 、 $6.4\sim8.3\%$ と、SS同様設定流量が小さい程大きな値を示す。

TOCについては、負荷量 $0.7\sim5.1\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 、 $27.0\sim196.6\text{g}/\text{m}^3/\text{日}$ であったのに対して、浄化量は面

表-3 負荷量と浄化量・浄化率

項 目	流 量 (d/h)	負 荷 量		浄 化 量		浄 化 率		
		面積当り ($\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$)	容積当り ($\text{g}/\text{m}^3/\text{日}$)	面積当り ($\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$)	容積当り ($\text{g}/\text{m}^3/\text{日}$)	面積当り (%)	容積当り (%)	
S S	60	A	1.7	67.8	0.6	23.8	35.3	35.1
		B	0.8	33.9	0.5	20.1	62.5	59.3
	30	A	3.8	146.6	2.5	98.2	65.8	67.0
		B	3.4	147.1	2.5	106.5	73.5	72.4
	15	A	1.5	61.9	1.3	49.7	81.3	80.3
		B	1.5	65.3	1.0	43.2	66.7	66.2
C O D 未 濾 水	60	A	4.3	167.8	0.3	10.7	7.0	6.4
		B	2.0	84.0	0.1	7.0	5.0	8.3
	30	A	4.8	184.8	0.5	20.6	10.4	11.1
		B	4.3	185.5	0.5	20.7	11.6	11.2
	15	A	1.2	47.4	0.5	17.4	41.7	36.7
		B	1.4	59.0	0.5	19.5	35.7	33.1
T O C	60	A	5.1	196.6	0.1	2.5	2.0	1.3
		B	2.4	98.3	0.1	3.0	4.2	3.1
	30	A	4.2	162.9	0.2	8.1	0.5	5.0
		B	3.8	163.3	0.2	8.0	5.3	4.9
	15	A	0.7	27.0	0.2	5.8	28.6	21.5
		B	0.7	30.0	0.1	5.5	14.3	18.3

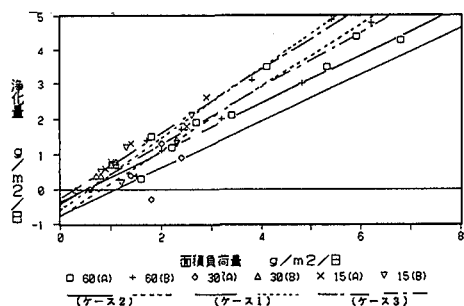


図-4 面積負荷量と浄化量 (SS)

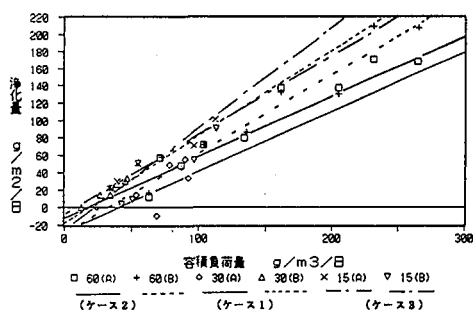


図-5 容積負荷量と浄化量 (SS)

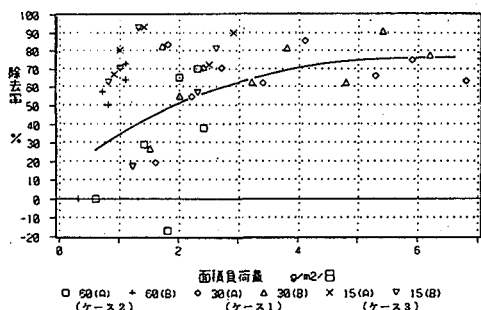


図-6 面積負荷量と浄化率 (SS)

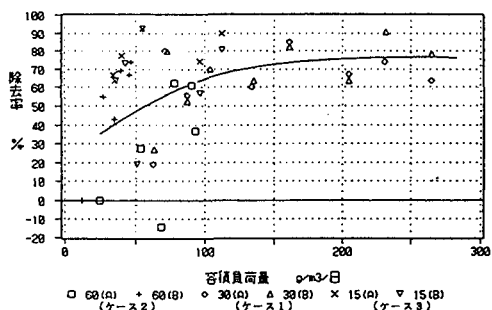


図-7 容積負荷量と浄化率 (SS)

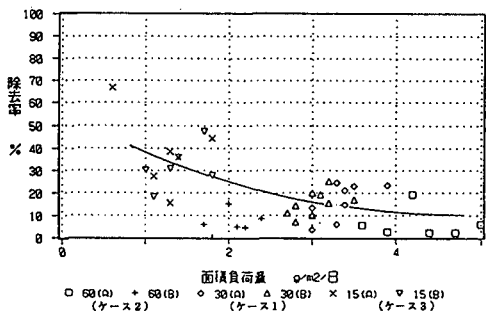


図-8 面積負荷量と浄化率 (COD(未濾水))

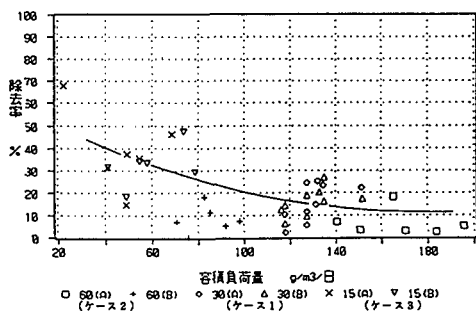


図-9 容積負荷量と浄化率 (COD(未濾水))

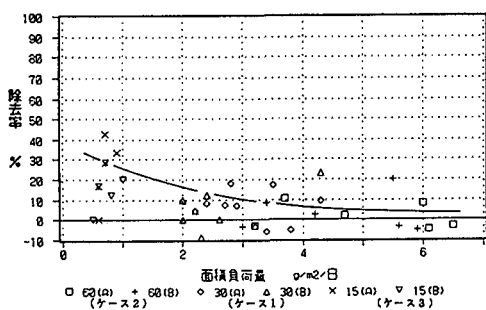


図-10 面積負荷量と浄化率 (TOC)

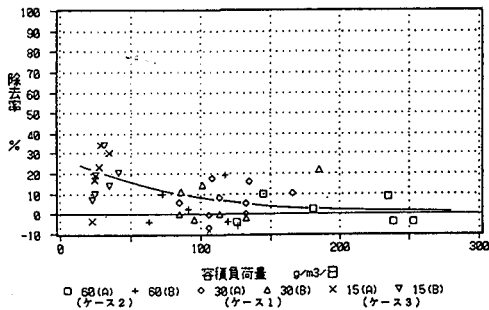


図-11 容積負荷量と浄化率 (TOC)

積当りの場合には $0.1 \sim 0.2 \text{ g/m}^2/\text{日}$ と流量による差異は余りないが、容積当りの場合には $30 \text{ m}^3/\text{h}$ で $8.0 \sim 8.1 \text{ g/m}^3/\text{日}$ と最も大きく、次いで $15 \text{ m}^3/\text{h}$ で $5.5 \sim 5.8 \text{ g/m}^3/\text{日}$ 、 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ で $2.5 \sim 3.0 \text{ g/m}^3/\text{日}$ となっている。しかし、浄化率は、面積、容積当りとも SS、COD（未濾水）同様設定流量が小さい程大きな値を示し、 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ で $14.3 \sim 28.6\%$ 、 $18.3 \sim 21.5\%$ と最も大きな値を示している。

(3) 流量（滞留時間）と浄化量（図-12～15、20～22）

流量（滞留時間）と浄化量の関係を見ると、SS、COD（未濾水）、TOC いずれの場合とも、滞留時間が 15 分間の時に、流量が大きなケース程より大きな浄化率を示すような傾向が認められる。

特に SS の場合、流量 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ のケースで通水距離 15 m 地点、即ち滞留時間 15 分間で約 60%、30 m 地点、即ち滞留時間 30 分間で約 70% 程度の浄化率を示している。これに対して、流量 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ と $15 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合には、通水距離 15 m 地点で、即ち滞留時間が 30 分と 1 時間でそれぞれ約 60% の浄化率となっている。

従って、これらの結果をみると、礫間内平均流速が 1 m/分 (1.7 cm/sec) 程度であるならば、滞留時間が 15 分間（通水距離 15 m）でも SS の浄化率は約 60% 程度にはなるので、30 分間（通水距離 30 m）でも約 70% 程度ということを見ると、実海域への適用化にあたっての浄化効率等からいえば、滞留時間 15 分間で通水距離 15 m としても所定の浄化効果が期待出来るといえそうである。

なお、流速が 1 m/分 程度であるならば、COD（未濾水）、TOC の浄化率については、滞留時間が 15 分間（通水距離 15 m）でそれぞれ約 12～13%、30 分（通水距離 30 m）でそれぞれ約 16～17% 程度と考えられる。

(4) 通水距離と浄化量（図-16～22）

濁度についてはいずれの流量でも通水距離 5 m 地点で既に 65% 以上の減少率を示し、流量 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合（滞留時間 10 分間）には 90% 以上、 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合（滞留時間 20 分間）には 70～80% 程度、また $60 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合（滞留時間 5 分間）でも 65.0% の減少率となっている。そして、 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合でも、通水距離 15 m 地点（滞留時間 15 分間）では 92% の減少率となっている。

また、SS についても、いずれの流量の場合とも通水距離 15 m 地点で約 60% 程度の浄化率となっており、 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合でも 30 m 地点では約 70% 程度の浄化率となっている。

従って、濁り系物質の浄化に当っては、本法により、通水距離 15 m、滞留時間 15 分間で約 60% 程度の浄化率は確保出来るものと考えられる。

一方、COD、TOC 等の有機物質については、流量が少なく滞留時間が長い程、即ち通水距離が長い程浄化率も高くなっており、COD（濾水）、COD（未濾水）、TOC、DOC いずれとも、通水距離 15 m で 10～15% 程度、30 m で 16～17% 程度の浄化率となっている。

(5) 一方向流と往復流（表-3、図-23～25）

一方向流（B水路）と往復流（A水路）との浄化量の差異について検討した流量 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ （滞留時間 1 時間）の場合の実験結果をみると、SS、COD（未濾水）、TOC いずれの項目とも、負荷量に対する浄化量の割合は、一方向流のケースよりも往復流のケースの方が高い値を示している。

即ち、SS については、面積当りの浄化率が一方向流 66.7% に対して往復流は 81.3%、容積当りの浄化率が 66.2% に対して 81.3% とそれぞれなっている。また、COD（未濾水）、TOC についても、面積当り、容積当りの浄化率が一方向流に対して往復流では、それぞれ 35.1%、33.1%、に対して 41.7%、36.7%、また 14.3%、18.3% に対して 28.6%、21.5% と高い値を示し、往復流の方が浄化効率は良いといえる。

また、往復流の条件下にあった A 水路では、付着動物の種類数、個体数、湿重量とも一方向流の条件下にあった B 水路よりもかなり多く、そのためか一般細菌類の減少率も A 水路の方が B 水路よりも約 2 倍程度高い値を示している。

一方、損失水頭も往復流の方が若干低く、発生汚泥による目詰まりも流入部（0.0～0.75 m）では多いもの

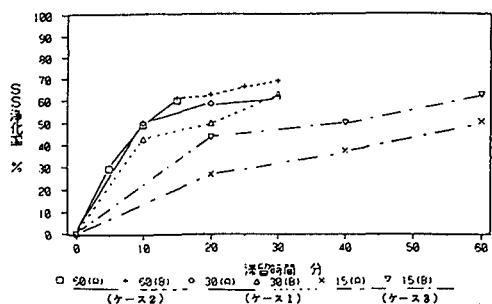


図-1 2 滞留時間と浄化率 (SS)

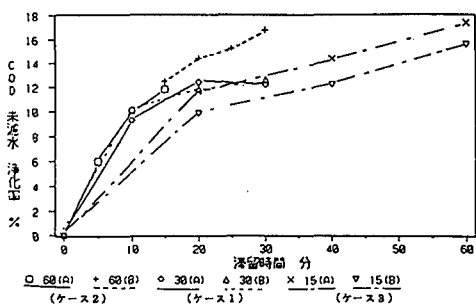


図-1 3 滞留時間と浄化率 (COD(未濾水))

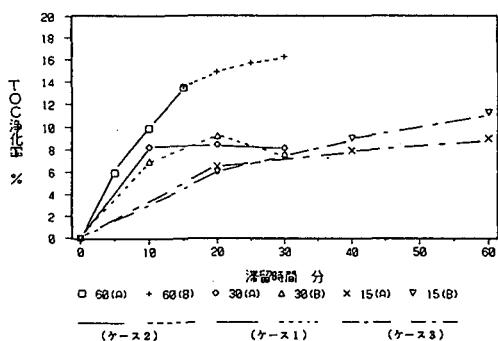


図-1 4 滞留時間と浄化率 (TOC)

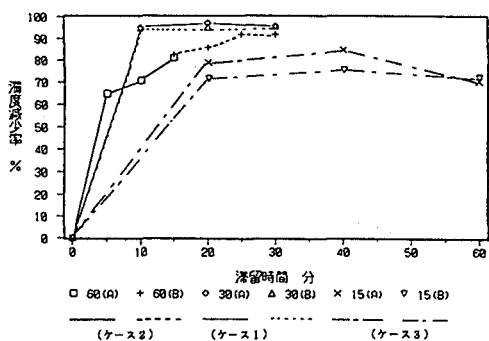


図-1 5 滞留時間と浄化率 (濁度)

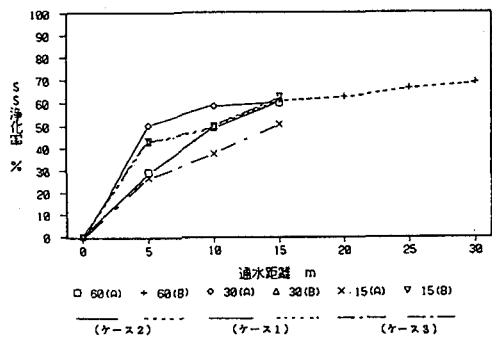


図-1 6 通水距離と浄化率 (SS)

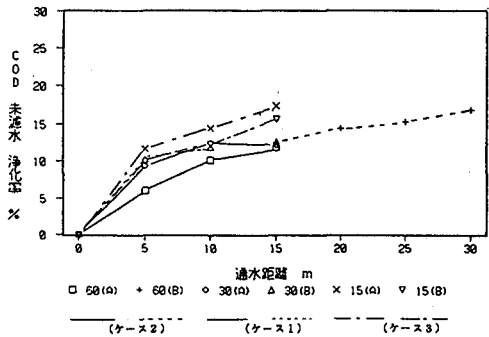


図-1 7 通水距離と浄化率 (COD)

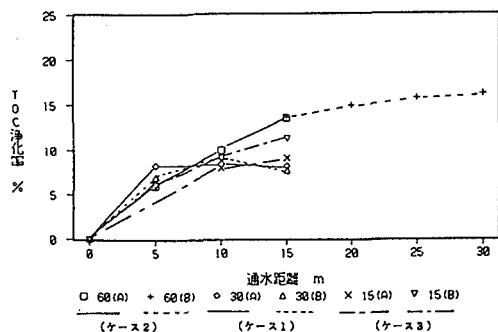


図-1 8 通水距離と浄化率 (TOC)

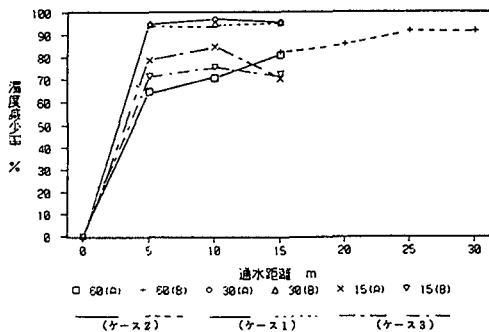


図-1 9 通水距離と浄化率 (濁度)

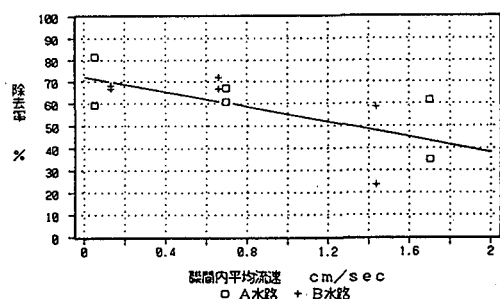


図-20 膜間内平均流速と浄化率 (SS)

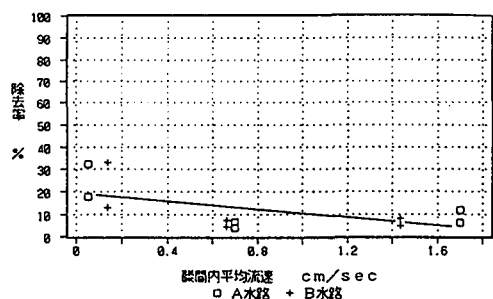


図-21 膜間内平均流速と浄化率 (COD(未濾水))

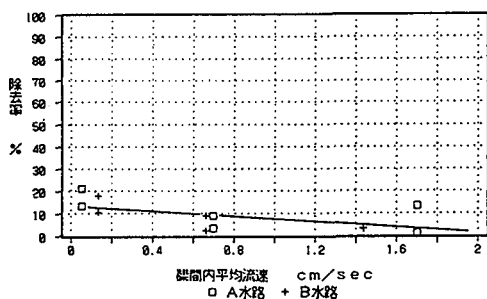


図-22 膜間内平均流速と浄化率 (TOC)

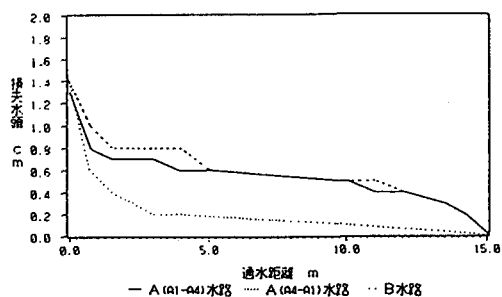


図-23 損失水頭の変化(平均) (15 m^3/h)

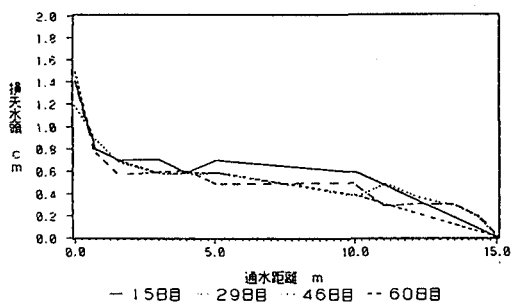


図-24 損失水頭の経時的変化(A水路)
(15 m^3/h)

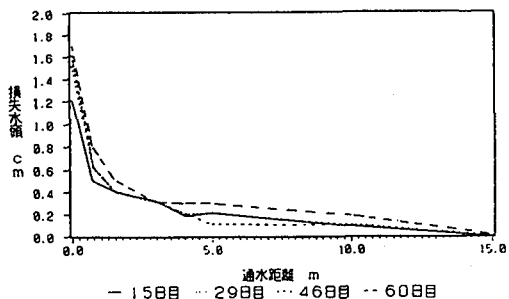


図-25 損失水頭の経時的変化(B水路)
(15 m^3/h)

の、膜槽全体により平均的になっているのに対して、一方向流の場合には、特に流入部(0.0~0.75m)のみでの目詰まりが大きいために考えられる。また、経時的にもB水路では損失水頭が若干増加しているが、A水路ではむしろ若干低下している。

(6) 運河(膜内)水の浄化(表-4)

運河部膜内水の浄化の程度を膜外水と比べてみると、実験ケース1(流量30 m^3/h)の場合に比べて流量の多いケース2(流量60 m^3/h)の方が、各項目とも浄化・低減率は高くなっている。

即ち、ケース1に対してケース2では、SSは17.5%に対して25.7%、有機物質のCODやTOC等については、5.4~11.3%に対して11.9~15.4%とそれぞれ高い値を示す。

また、ケース1、2とも、透明度については33.3~39.2%程度膜内の方が膜外より増加しており、濁度も

19%程度膜内の方が減少している。

しかし、実験開始12日目に地震に見舞われたケース3においては、実験開始時から運河水のpHの低下や汚濁化、栄養塩類の増加等が大きく、特に地震後は膜内においてその傾向が著しく、本実験施設からの浄化放流水による浄化効果も減殺されてしまっている。

(7) 物質収支

1) SS累積捕捉量

(図-26～27)

実験ケース1～3の全期間210日間におけるSS累積捕捉量は、A水路で293.4kg、B水路で241.9kgとなっており、A水路の方が51.5kg多くなっているが、これは逆洗による排出量がB水路で122.2kgであったのに対して、A水路では66.8kgと55.4kg少なかったせいである。それ故、もし排出量が同程度であったなら、流入負荷量はA水路の方が41.1kg多く、浄化量は両水路とも同程度なので、実際はこの41.1kg程度分だけA水路の方がB水路よりも多く分解等の浄化が図られていたことになる。

また、A、B水路における捕捉量は、空隙容量当りでそれぞれ21.7kg/m³、18.2kg/m³となっており、共に大きな値といえそうである。

2) 物質収支

実験ケース1～3の全期間210日間におけるSSの物質収支についてみると、流入負荷量に対してA水路では浄化量は61.1～68.0%、排出量は10.8～11.8%、捕捉量は50.3～56.8%程度であったのに対して、B水路では浄化量が69.2～75.9%、排出量は11.6～23.3%、捕捉量は46.0～64.3%となっており、B水路における排出量は実験ケース2、3において約10%程度多くなっている。

(8) 維持・管理方法について

1) 大礫の効果

本実験では水路水槽の充填材としてφ10～15cmの礫を用いたが、流入部における目詰まりを防止すべく、

表-4 運河(膜内)水の浄化・低減率(%)

	透明度	pH	濁度	DO	SS	COD (総水)	COD (未総水)	TOC	DOC
ケース1 (7～10月) 30m ³ /h	-33.3	-1.0	19.0	-13.0	17.4	8.1	11.3	5.4	5.5
ケース2 (10～12月) 60m ³ /h	-39.2	0.0	18.7	-19.0	25.7	12.8	15.4	11.9	13.6
ケース3 (1～3月) 15m ³ /h	41.0	1.0	13.6	20.0	-34.0	-32.6	-58.0	-33.7	-18.8

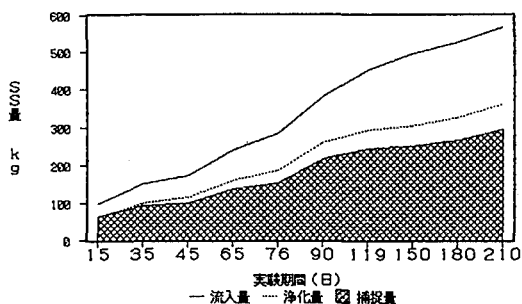


図-26 SS累積捕捉量(A水路)

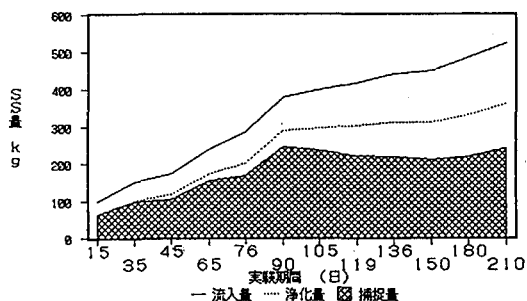


図-27 SS累積捕捉量(B水路)

A水路の両端部およびB水路の流入部では 1.5 m幅で $\phi 30\sim 40\text{cm}$ の大礫を用いた。

しかし、本実験では各実験ケースとも2～3ヶ月間という短い実験期間であり、またそれぞれ1回／2週間～1回／月の頻度で逆洗を行ったため、全体としてそれ程の目詰まりはみられず、損失水頭も余り増加していない。それ故、大礫の効果については明らかではなかったが、A、B水路とも流入域 0.0～1.0m程度の大礫の領域内では付着生物が多く認められたものの、その下流側の $\phi 10\sim 15\text{cm}$ の礫中では余り認められなかったこと等を考えると、付着生物等による目詰まり防止には、流入部における大礫の使用が有効であることを示唆しているように考えられる。

2) 曝気の効果

損失水頭をみると、流量 $60\text{m}^3/\text{h}$ の条件下で曝気をかけたA水路は流入部側に位置していたのにもかかわらず、損失水頭は経時的にむしろ減少しており、流入部で実験開始2ヶ月後に約3 cm程度水位は低下している。これに対して、下流側に位置する無曝気のB水路の流入部では、実験開始15日目から29日にかけて損失水頭が約1 cm程度は減少したものの、その後はほとんど変化していない。従って、これら損失水頭の経時的な変化の差異は、曝気が目詰まりの防止等にかなり効果のあることを示していると考えられる。

3) 往復流の効果

前述のように、往復流は浄化の面でも有利に作用することは明らかであり、さらに目詰まり防止にも有利に働くと考えられる。即ち、往復流の場合には、流入部での損失水頭差はいぜん大きいとはいえ、一方向流の場合に比べるとさらに小さく、また通水距離による差異も小さく、損失水頭が下流側に向かってなだらかに減少するような傾向がみられる。また、経時的にみても、本実験結果からは、いずれの地点でも損失水頭にそれ程明瞭な変化は認められない。

4) 逆洗の効果

維持・管理にあたって、逆洗による目詰まり防止は有効な手段と想定される。しかし、本実験では、逆洗による発生汚泥の排出量は、負荷量に対してB水路では 23.3%であり、A水路ではその約1/2の 11.8%程度に留まっている。

また、実海域においては逆洗のようなシステムを取り入れることは困難であることも考えると、今後目詰まり防止のために有利な通水方法、構造、接触材等について新たな工夫が必要であると考えられる。

6. 考察

(1) 浄化能について

本実験施設と同規模の施設で実施された東京湾奥部砂町運河における実験結果⁵⁾では、 $\phi 10\sim 15\text{cm}$ の礫を充填した滞留時間 1、2、4 時間（通水距離 30m）の実験ケースで、SSは約 $1.5\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 程度、CODは約 $0.25\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 程度の浄化量とそれぞれなっている。

しかし、本実験では、SSは滞留時間 30分間（通水距離 15m）で $2.5\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 、1時間で $1.0\sim 1.3\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ と、滞留時間 30分間分間の場合には $1.0\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 程度高い値を、またCOD（未濾水）の場合には滞留時間 30分間、1時間の場合とも $0.5\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ と、約2倍程度高い値をそれぞれ示している。

また、砂町運河における実験結果から、滞留時間は2～4時間が望ましく、その際の除去率はSSで70～80%、CODで10～30%程度とされているが、本実験結果をみると、SSの除去率は60%程度ではあるものの、実験域への適用化を考えた場合、滞留時間15分間で通水距離15mの場合が最も浄化効率が良いといえそうである。

一方、今回初めて往復流の条件下（滞留時間1時間、通水距離15m）における浄化実験を実施したが、一方向流に比べ往復流の場合、面積当りの負荷量に対する浄化率は、SSで14.6%、COD（未濾水）で6.6%、TOCで14.3%程度それぞれ高い値を示し、本法を適用した施設が、港湾における水質浄化型護岸等の一つに成り得ることを示唆していると考えられる。しかし、詳細については今後更に検討して行く必要がある

ものと考えられる。

なお、曝気の効果については、中村²⁾も流入水BODが30mg/l程度までは曝気の有無が浄化効果に影響を及ぼすことはないようであるとしているが、本実験結果をみても曝気の有無による浄化率等の差異については明らかではない。

(2) SS捕捉量について

中村²⁾は、本法による河川水の浄化を図る場合、浄化を良好に維持するためには、礫槽内における初期の空隙容量当りのSS堆積量を10~12kg/m³以下に保つ事が望ましいとしているが、嫌氣的分解やゴカイ等の摂取等による減少がないものと仮定し、捕捉量そのものが礫槽内への残留量とみなすと、本実験における残留量は18.2~21.7kg/m³という高い値となる。

しかし、中村²⁾が紹介している河川水の浄化に本法を用いた場合の実験例をみると、SS捕捉量の46.7~66.7%程度が減少し、残留量は33.3~53.3%程度となっている。従って、本実験の場合にもSS捕捉量の約30%程度が分解等によって減少しているものと仮定すると、礫槽内の残留量は12.7~15.2kg/m³程度と推測される。

7. おわりに

本実験の実施にあたり、終始御指導頂いた港湾技術研究所海洋水理部 細川 恭史 海水浄化研究室長はじめ、御協力頂いた関係各位に対し、心から感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) シーブルー・テクノロジー研究委員会：シーブルー計画(1989.3)
- 2) 大槻 忠：人工ラグーン、埋立と浚渫 No.152、p.10-17(1990)
- 3) 小田 一紀・他：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、p.991-995(1992)
- 4) 赤井 一昭・他：閉鎖性汚濁海域の人工環礁(海洋の空)による水質浄化システムについての試み、日本沿岸域会議研究討論会講演概要集 No.3、p.39-40(1990)
- 5) 港湾技術研究所・シーブルーテクノロジー工法研究会：汚濁海水の浄化工法に関する研究報告書 (1992.3)
- 6) Y. HOSOKAWA, et al. : Channel Experiments on Coastal Water Purification by Stone Bed with Biofilm, HYDRO-PORT'94 p.885-905(1994.10)
- 7) 辻 博和：自然の浄化機能を活用した石積み浄化堤による海水浄化工法、第20回底質浄化セミナーテキスト p.84-89(1994.11)
- 8) 中村 栄一：排水路浄化施設の処理機能、用水と廃水 Vol.32、No.8、p.44-47(1990)
- 9) 中村 栄一・酒井 憲司：礫間浄化法による汚濁水の浄化、土木技術資料 Vol.29、No.10、p.26-31 (1987)