

礫間接触酸化法による強汚濁河川水の 浄化効果に関する総合評価

Comprehensive Estimation on Purification Effect of Strong Polluted River Water
by Bio-activities of Contact Oxidation Materials

津田 将行¹・尾島 勝²

Masayuki TSUDA and Masaru OJIMA

¹学生会員 修(工) 福山大学大学院工学研究科 (〒729-0292 広島県福山市学園町1番地三蔵)

²フェロー会員 工博 福山大学教授 工学部建設環境工学科 (〒729-0292 広島県福山市学園町1番地三蔵)

The large-scale experimental channels were constructed in course of the Takaya-gawa river which a branch of the Ashida river, in Fukuyama-city. The purification effects of polluted river water were estimated by several kinds of materials in the field experiments. By bio-active characteristics of three contact oxidation channels which paved with coral stone, deoiling coal and charcoal, the experimental results were discussed. The water conduction period of each season was made about 3 weeks all through in autumn, winter, spring, summer during 11.1997~8.1998.

For SS, BOD, the purifying effect of coral stone was most excellent, and the purifying effect of charcoal was higher than other materials for T-P. On the epiphytic algae, there was seldom a difference of three contact materials, and it has been almost composed of the same kind.

Key Words : Contact Oxidation Method, Water Quality, Epiphytic Algae, Sludge

1. はじめに

礫間接触酸化法は、河川、湖沼、港湾など対象水域内において、礫等の接触材を敷設・充填して多層を形成し、直接的に水質の浄化を図る手法である。

接触材には成型クロボク土、廃材、自然素材(石、礫)などが用いられ、礫間の水の流れは水平流式(横流式)と目詰まりや排泥方法を配慮した上向流式(浮上式)がある。すでに、BOD、SS、衛生指標細菌を効果的に除去すること¹⁾⁴⁾や、浄化効果は滞留時間に依存していること⁴⁾などが報告されている。

浄化機構は、①. 接触沈殿、②. 接触材表面の微生物による吸着、酸化分解、③. 堆積汚泥による酸化分解・減量に大別できる。①に関して、接触材別の浄化能に関しては多く報告されているが、気象条件や対象水を同じにして、礫径や流速の相違による浄化性能を検討した報告は少なく⁵⁾、②に関する生物調査の報告例もわずかである⁶⁾。③に関しては、詳しい報告は見当たらない。

よって本研究では、実河川の河道敷内に水平流式の大規模実験水路を建造し、接触材を網目状の架台上に敷設することで汚泥の目詰まり防止や排泥を容易にした。接触材として比重や比表面積の異なるサンゴ石、脱油焼成石炭、木炭を用いて、a). 気象条件(天候、水温)による水質浄化能、b). 付着藻類調査から得られる生物学的情報、およびc). 堆積汚泥特性の3点に関してそれぞれ比較、検討し、水質浄化効果を総合的に評価する。

2. 実験および調査概要

実験水路は芦田川左支川高屋川の左岸寄り河道内に、既設の全長60m、幅1m、高さ1mの防水コンクリート製(水路勾配:約1/1200)が3水路あり、各水路間は1mである。図-1は実験水路概略図を示しており、開水路で光が入射する水路である。接触材としてサンゴ石、脱油焼成石炭、木炭を用い、それぞれをネットに入れ、10m毎の4ブロックに敷設し、各ケース通水開始前に、水路や接触材をジ

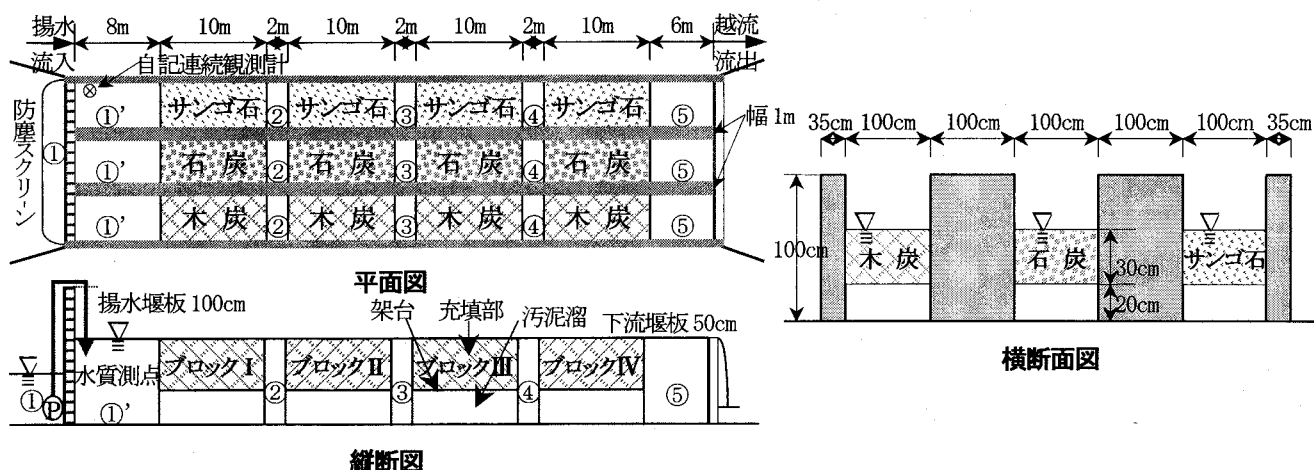


図-1 防水コンクリート製実験水路概略図

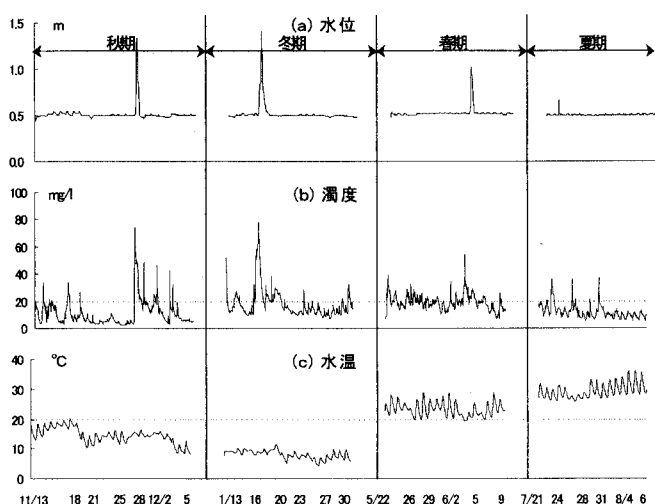


図-2 連続観測データ

ジェット洗浄、接触材は数日間天日干し後、敷設し通水を始める。

実験期間は季節の水温変化や河川水質条件の変移を考慮して、秋期（1997年11/10～12/5）、冬期（1998年1/10～1/30）、春期（同年5/21～6/9）、夏期（同年7/21～8/6）の4ケースとし、それぞれ約3週間の連続通水実験（給水量 $2.0\text{ m}^3/\text{hr}=33.3\text{ l/min}$ 滞留時間約12hr）を行った。

水質は各ブロック間の開水路部の水質観測点（①、①'～⑤）において週2回の直読及び採水分析調査とした。調査項目は水温、pH、DO、COND、SS、BOD、D-BOD、COD_{Cr}、T-N、T-Pである。

付着藻類調査は、各ケースの通水開始2、3日後の初回と各ケースの最終日（終回）とし、各ケースの調査日は秋期：11/12、12/5、冬期：1/13、1/30、春期：5/22、6/9、夏期：7/21、8/6である。調査方法は、各水路ブロック（I～IV）から接触材を十数個採取、接触材表面の藻類をブラシで擦採った後、ホルマリン（5%）で固定し、その一部を酸処理、珪藻同定用試料とした。珪藻は酸処理試料を、その他の藻類は固定試料を400～1000倍で検鏡し、種の同定及び計数を行った。これらの生物調査は（株）日本総合科学

に委託した。

堆積汚泥は通水停止後、各ブロック毎に接触材をジェット洗浄して架台下の堆積汚泥とともに吸引採泥し、堆積汚泥湿潤重量、含水率、強熱減量を計測した。含水率、強熱減量の分析は（株）建設技術研究所に委託した。

3. 自記連続観測データによる水路流況

サンゴ石水路の上流端測点（①'）に、圧力式水位計と濁度計・水温計を設置し、自記連続観測を行った。計測水位、濁度および水温の観測結果を図-2に示す。

実験水路の平常水位は下流堰高約0.5mによって制御されている。しかし実験水路は河道敷内にあり、強い降雨時には高濁水出水の影響を直接受ける。図-1の水路概要に示すように、上流堰板高は1mであり、図-2(a)の水位連続データに示すように、秋・冬・春期には水位が1mを超える出水があり、上流堰板を超え泥水が多量に水路内に流入し完全な冠水状態が各ケース1回ずつ起こった。また夏期には、最大水位0.66mと上流堰板を越えるほどではないが、下流側から泥水の逆流があった。

図-2(b)に濁度の連続データを示す。出水により秋期や冬期にそれぞれ74.2mg/l、77.8mg/lと高濁水が流入していることがわかる。しかし、平均値は秋期：11.0mg/l、冬期：17.7mg/l、春期：19.2mg/l、夏期：11.9mg/lと春期や冬期は秋期や夏期に比べて、平常時に高濃度の濁水が水路に流入していることがわかる。平均濁度値と流入水量より1日当りの流入泥土量を算出すれば秋期：12kg、冬期：19kg、春期：21kg、夏期：14kgの泥土が流入することになる。

図-2(c)に水温の連続データを示す。各季節の平均水温は秋期：14.5℃（8.3～20.3）、冬期：8.1℃（4.2～11.7）、春期：23.3℃（19.3～28.9）、夏期：29.3℃（26.0～36.1）、であった。各期の水温の変動幅は秋が最も大きく12℃、次いで夏の10.1℃、春の9.6℃、冬の7.5℃の順であった。

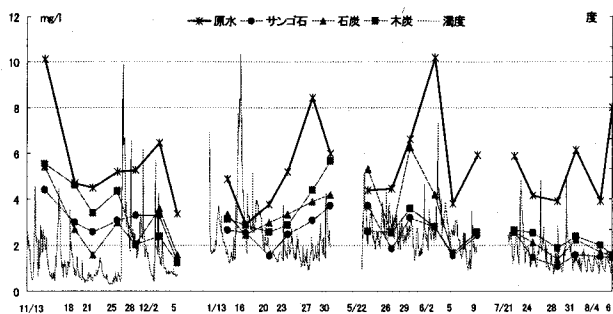


図-3 BODの時系列変化

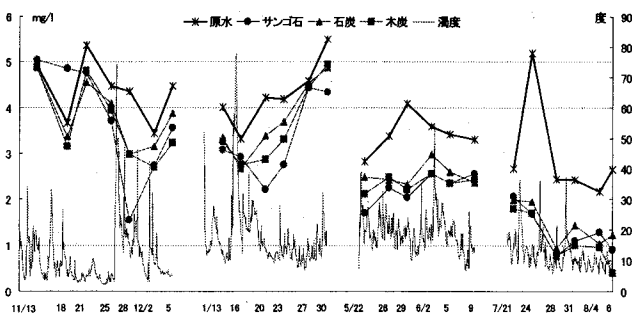


図-4 T-Nの時系列変化

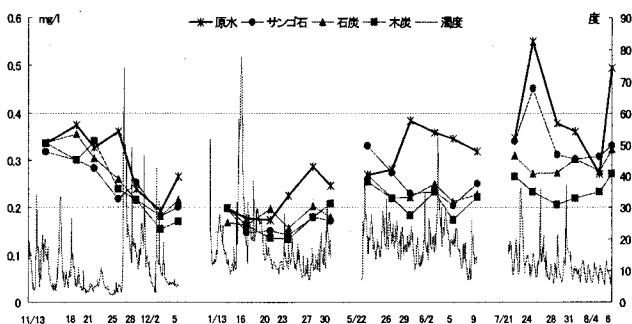


図-5 T-Pの時系列変化

4. 結果および考察

(1) 水質指標

a) SS、BOD

SSに関して図には示していないが、他者の礫間接触酸化法研究結果と同様に高い浄化効果が得られている。

図-3に流入原水と各水路最下流測点⑤におけるBODの時系列変化を図-2(b)の濁度変動とともに示した。

各ケースの原水平均濃度値は、5.20～5.91mg/lであり、春期に高く、冬期に低い値を示した。いずれのケースでも各接触材ブロックを流下するにつれて濃度値は低下していた。

接触材の浄化効果を各ケース毎に測点⑤の平均濃度値と比較すると、秋期は石炭、冬・春・夏期ではサンゴ石が低い値を示し、特に夏期ではいずれの接触材でも除去率は高く、サンゴ石の浄化効果が最も良く次いで石炭、木炭の順であった。

一番良好な浄化効果を示すサンゴ石の除去率を秋期から夏期までを季節毎に順に示すと、47%、46%、53%、69%となり浄化槽などで下水処理する場合と同様に、BOD除去率は水温の高い季節の方が高くなった⁷⁾⁸⁾。

各ケースとも水路冠水により各接触材上部には泥を被ったが、冬期を除けば、その後も各接触材ブロックを流下につれて濃度値は低下しており、浄化効果は持続していることがわかる。

b) T-N

図-4に流入原水と各水路最下流測点⑤におけるT-Nの

時系列変化を図-2(b)に示した濁度変動とともに示した。

各ケースの原水濃度平均値は、秋・冬・春・夏期の順に示すと4.39mg/l、4.31mg/l、3.43mg/l、2.93mg/lとなり、濁度が低く、水温が高い春・夏期の濃度が低い。

各水路の測点別にみると秋期、冬期に各接触材測点⑤の濃度は原水との相違はあまり顕著ではないが、春・夏期には水路流下によって良好な浄化効果を示した。また水路冠水後もBOD同様に浄化効果を維持していた。

接触材の浄化効果を各ケース毎に平均値と比較すると、秋期・夏期は木炭、冬期・春期ではサンゴ石の濃度が低く良好な浄化効果を示した。季節毎に秋期から順にこれら一番良好な浄化効果を示した接触材の除去率を示すと、秋期：木炭：17%、冬期：サンゴ石：24%、春期：サンゴ石：34%、夏期：木炭：62%である。原水のT-N値が低く、水温が高い条件で、除去率が高い。

c) T-P

図-5に流入原水と各水路最下流測点⑤におけるT-Pの時系列変化を図-2(b)に示した濁度変動とともに示した。

各ケースの原水平均濃度値は、秋・冬・春・夏期の順に示すと、0.30mg/l、0.22mg/l、0.33mg/l、0.40mg/lと水温の低い時期はT-Pも低く、逆に水温の高い時期はT-Pの濃度も高い値を示していた。

各接触材ブロックを流下するにつれて、原水よりも高い値を示す場合が各ケースでみられる。このことは一旦接触材に付着していたリンが剥離流出したことになる。ケース毎に平均除去率が高いのは、冬期：サンゴ石：22%で、これ以外のケースでは木炭の除去率が高く、秋期：16%、春期：33%、夏期：38%であった。

(2) 付着藻類

付着藻類調査によってブロック毎ならびに接触材種類による棲み分けと水質浄化との関係を調査する。生物学的水質評価法については様々な方法が多く提案されている。本研究の考察においては、次式(1)～(3)の指数を用いて論ずる⁹⁾。

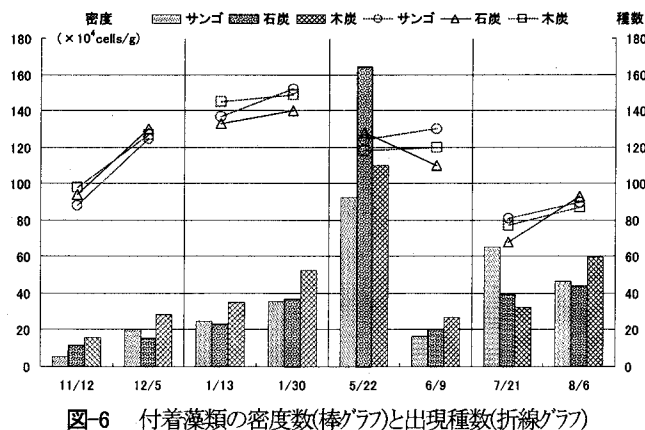


図-6 付着藻類の密度数(棒グラフ)と出現種数(折線グラフ)

(i) 類似度指数 (Similarity index)

Kimoto(1967)の群集類似度指数 C_π は式(1)で示される。

$$C_\pi = \frac{2 \sum_{i=1}^s n_{ii} \times n_{2i}}{(\sum \pi_1^2 + \sum \pi_2^2) N_1 \cdot N_2} \quad 0 \leq C_\pi \leq 1 \quad (1)$$

$$\sum \pi_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^s n_{ii}^2}{N_1^2} \quad \sum \pi_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^s n_{2i}^2}{N_2^2}$$

N_1, N_2 : サンプル総個体数、 n_{ii}, n_{2i} : サンプルの個々の種の個体数、2ブロック間の共通種が多いほど C_π 指数は1に近づく。

(ii) 多様性指数 (Diversity index)

Shannon の多様性指数は式(2)で示される。

$$H = - \sum_{i=1}^s \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

s : 種類数、 n_i : i 番目の種の個体数、 N : 総個体数

(iii) 汚濁指数 (Pollution index)

汚濁指数は式(3)で示される。

$$PI = \frac{\sum (s \times h)}{\sum h} \quad (3)$$

h : 出現個体数、 s : 汚濁階級指数

a) 密度・総出現種数・優占種

図-6 に各接触材ブロックの単位重量当たりの個数を付着藻類密度とし、各水路毎のブロック I~IV を平均したものを平均密度数(左軸、棒グラフ)として表したものと、各水路での出現した種類の累計を総出現種数(右軸、折線グラフ)としたものを調査日毎に示し、秋期と冬期、春期と夏期の2ケースずつに分けて考察する。

1) 秋期初回の密度数は、木炭(15.7 万 cells/g)が一番多く、次に石炭(11.7 万 cells/g)、サンゴ石(5.6 万 cells/g)の順であった。秋期終回には秋期初回に比べ各接触材で増加しており、また冬期初回は秋期終回に比べて各接触材で増加し、その後の冬期終回も各接触材で冬期初回よりも増えていた。接触材別にみれば木炭の密度

表-1 秋期初回の付着藻類の類似度指数(C_π)

		サンゴ石				石炭				木炭			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
サンゴ石	I	1.00											
	II	0.97	1.00										
	III	0.96	0.93	1.00									
	IV	0.90	0.85	0.98	1.00								
石炭	I	0.96	0.92	0.92	0.85	1.00							
	II	0.94	0.89	0.97	0.94	0.95	1.00						
	III	0.94	0.88	0.96	0.93	0.96	0.99	1.00					
	IV	0.95	0.91	0.97	0.95	0.95	0.99	0.99	1.00				
木炭	I	0.87	0.86	0.81	0.74	0.93	0.86	0.87	0.87	1.00			
	II	0.92	0.91	0.91	0.85	0.93	0.92	0.92	0.93	0.95	1.00		
	III	0.97	0.95	0.96	0.91	0.96	0.96	0.96	0.98	0.90	0.96	1.00	
	IV	0.93	0.91	0.86	0.78	0.98	0.91	0.92	0.91	0.95	0.94	0.94	1.00

数が最も高い。

この4調査日の出現種数は秋期初回では88~98種と木炭が多く、その後の種類数は密度数と同様に秋期終回、冬期初回・終回と経時変化とともに増えており、冬期終回には140~152種であった。

この4調査日を出現種別にみると、珪藻綱、藍藻綱、ミドリムシ綱、緑藻綱などが出現し、中でも珪藻綱の占める割合は約70~98%と高い割合を占めていた。優占率が高かったのは珪藻綱の *Fragilaria construens*, *Cyclotella kutziana*, *Navicula pupula* 等で優占率1位の割合は平均で24%(15.4~43.3%)あった。

2) 春期初回の密度数はサンゴ石: 92.3 万 cells/g、石炭: 163.9 万 cells/g、木炭: 109.9 万 cells/g とすべての接触材で採取分析の中で最も高密度となった。しかし、春期終回ではサンゴ石: 16.4 万 cells/g、石炭: 20.0 万 cells/g、木炭: 26.9 cells/g と各接触材で春期初回の約2割まで減少していた。このケースの総出現種数は初回と終回を比較するとサンゴ石: 124→130種、石炭: 128→110種、木炭: 118→120種とサンゴ石、木炭で増えている。

夏期初回と終回を比較すると、密度数は石炭、木炭の両接触材は増加しているが、サンゴ石は減少していた。総出現種数は3つの接触材とも増加している。

この4調査日を出現種別にみると、珪藻綱、緑藻綱、藍藻綱などが出現し、珪藻綱の優占率は74~99%と高い割合であった。優占率が高かったのは秋期や冬期と同様に *Fragilaria construens*, *Navicula pupula* や *Nitzschia amphibia* 等であり、優占率1位の割合は平均で37%(26~47%)と秋期や冬期に比べ1位に対する優占率も高くなっていた。

この2期での密度数の減少に関して、出現種数が目立った減少をしていないこと、またある特定種の密度数が多くなっていないこと、春期初回には出現した個々の付着藻類の密度数が多いことから、i) 図-2(c)に水温の連続データで示したように平均水温は、春期: 23.3℃、夏期: 29.3℃と動物プランクトンなどの捕食者にとって最適条件(水温や栄養源が好条件、二次捕食者が少ない等)となったこと、ii) 図-2(b)に示したように、特に春期は

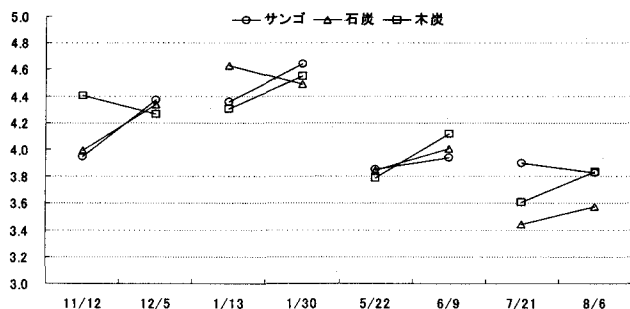


図-7 付着藻類の多様性指数(H')

平常時の濁度値が高いことにより、泥土が接触材に沈着して目詰まりによる住みやすい環境が失われたこと等が考えられる。

b) 類似度指数

群集類似度指数 $C\pi$ を式(1)を用いて、各調査日毎の各ブロックの類似度マトリックスを作成し、接触材相違や各水路内の上・下流ブロックなどの位置的相違を群集構造の類似性により各ブロック毎を比較する。その一例として秋季初回を表-1に示した。

この表ではサンゴ石ブロックIVと木炭ブロックI・IVの指数はそれぞれ0.75、0.78と低い値を示したが、その他の各ブロック間の指数は0.80以上と高い値を示している。このことより各接触材水路内の上・下流ブロックや接触材が異なる各ブロック間の付着藻類種には相違はなく、ほぼ同種から構成されていることがわかる。

他の調査日に関しても、各ブロック間の類似度指数 $C\pi$ は0.80以上であり、各接触材に付着する種構成はほぼ同種で構成されており、各ケースの初回や終回において、同一の接触材を用いた場合の上下流ブロックによる位置的相違や接触材の異なるブロック間に付着する藻類の種構成に相違はなく、棲み分けの相違は認められない。

c) 多様性指数

各接触材の群集構造を式(2)で表される Shannon の多様性指数を用いて各ブロック毎に算出し、各接触材水路の平均値を図-7に示した。多様性指数とは、その環境における生物種の豊富さを示し、多様性指数の変化から環境の外的変化の度合いを判断することが可能である。すなわち、多様性指数が大きいことは、外的環境要因の変化を敏感に察知できるといえ、その多様性の変化から様々な汚染物質のインパクトを評価することができる¹⁰⁾。

各ケースの初回と終回を比較すると、図に示すように秋：木炭、冬：石炭、夏：サンゴ石の3つの減少事例を除いて増加している。また各ケースの初回よりも終回の方が各接触材の指数の差が小さくなっており、接触材の違いによる種構成の差はなくなる傾向がわかる。

各ケース毎で比較すると冬期の指数が一番大きく、次いで秋、春、夏期の順で指数が小さくなっていった。多様

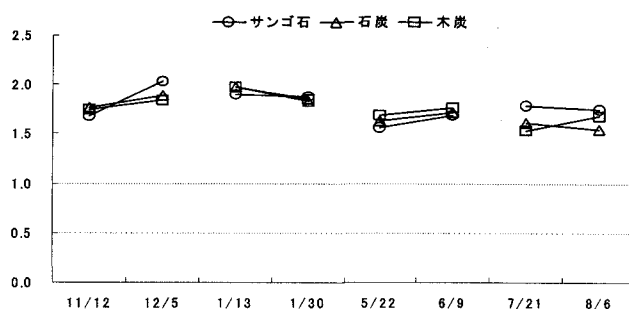


図-8 付着藻類による汚濁指標(PI)

性指数が大きくなることは、出現種の数が多く、また種毎の密度数が均一であることを示しており、水温の低い冬期には出現種の数が多く、またほぼ密度数が均一になるが、水温の高い夏期には出現種数は他に比べて少なく、また密度数に偏りを示すことが明らかになった。

d) 付着藻類による汚濁指標

式(3)で示される汚濁指標を用いて、各ブロック毎に算出し水路別の平均値を図-8に示す。類似度指数のところで示したように、各接触材の付着藻類はほぼ同種から構成されており、このことから調査日毎の接触材の違いによる汚濁指数の目立った相違は認められない。

各ケース毎に比較すると、秋期や春期では連続通水によって各接触材で汚濁指数は増加しているが、他のケースには減少しており、生物学的に水質を判定すると浄化されていることがわかる。

図-8は各接触材ブロックの汚濁指数を平均値で示しているが、各ブロック別で指数を示してもβ-中腐水性域(1.5~2.5)や貧腐水性域(1.0~1.5)に属していた。

(3) 堆積汚泥

図-9は、各ケースの連続通水期間は若干異なるので、各ブロックに堆積した汚泥を足し合わせ各水路毎の合計堆積汚泥湿潤重量を通水日数で割ったものを、1日当りに発生する堆積汚泥湿潤重量(印塗潰し)として算出したものと、この1日当りに発生する堆積汚泥湿潤重量と含水率より1日当りの堆積土粒子重量(印中抜き)として算出したものを示した。

堆積汚泥湿潤重量の大小に関して、各ブロックの位置的な規則性は認められない。したがってここでは水路毎に各ケースを比較する。

1日当りの堆積汚泥湿潤重量については、各ケースで石炭水路の堆積量が一番少なく、次いでサンゴ石水路、木炭水路の順であり、石炭水路を基準にすると、サンゴ石水路には1.1~1.7倍、木炭水路には1.7~2.4倍もの汚泥が堆積している。

ケース別に比較すると、その堆積量は石炭、木炭水路では図-2(b)に示した連続濁度記録の平均値の高い順

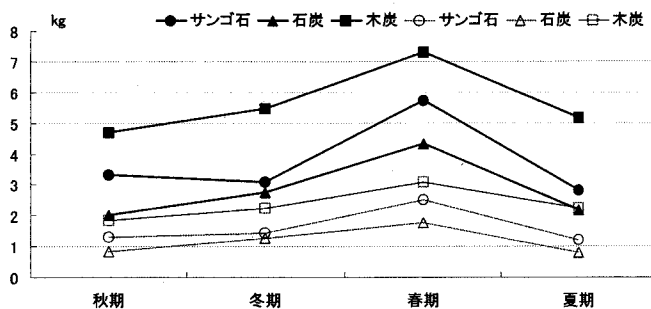


図-9 1日当りの堆積汚泥湿潤重量(印塗潰し)と堆積土粒子重量

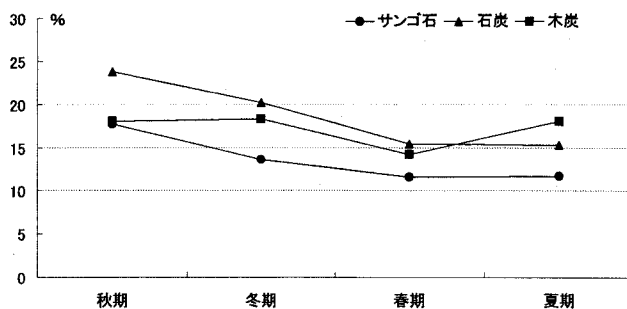


図-10 堆積汚泥の強熱減量

(春→冬→夏→秋期)とほぼ一致している。

次に1日当りの堆積土粒子重量は図に示すように、1日当りの堆積汚泥湿潤重量と同じく、各ケースで石炭水路の堆積量が少なく、次いでサンゴ石水路、木炭水路の順であり、石炭水路を基準にするとサンゴ石水路には1.1～1.6倍、木炭水路には1.7～2.8倍になる。

図-10に各ケース別の堆積汚泥の強熱減量を示している。強熱減量に関して、堆積汚泥量と同様に各水路ブロックの場所的な特性は認められない。

ネット入り接触材の3層積みである石炭水路は相対的に空隙は少なく、堆積汚泥量は少ない。しかし、汚泥中での有機物分解速度が遅く、残留汚泥中に残っている有機物量が多くなり、強制的に酸化分解させる強熱減量の割合が高くなるといえる。

2層積みのサンゴ石水路は、相対的な空隙が次に少なく、堆積汚泥量も次に少ない。しかし、図-10に示すように強熱減量は最も少なく、汚泥中での有機物分解速度が相対的に最も速いことが推測できる。

1層積みの木炭水路は、各接触材ブロックの空隙が最も大きく、堆積汚泥量は図-9に示すように最も多い。したがって、汚泥中での有機物分解速度が他の水路と比べて大差ないとしても、同一期間内での残留有機物量は多くなり、強熱減量の値は季節的にはほとんど変らない中間的な値になったものと考えられる。

ケース別に比較すると石炭・サンゴ石水路では、秋・冬・春・夏期では、それぞれ24%～15%、17～12%へと時系列変化とともに減少傾向にあり夏期の有機物成分が少ないことがわかる。しかし、木炭水路では、春期は14%、他のケースは18%とほぼ同じ値を示していた。

4. まとめ

実河道内に建造した水路において、礫間接触酸化法による河川水質浄化実験を行った。

①.水質項目に関して、SS、BODについては、サンゴ石の除去率が高く、T-Nについては秋・夏期には木炭、冬・春期にはサンゴ石の除去率が高くなった。T-Pについては木炭が高い浄化効果を示した。

②.付着藻類に関して、類似度指数より各調査日におい

て、各接触材水路内の上・下流ブロックや接触材が異なる各ブロック間の付着藻類種には相違はなく、ほぼ同種から構成されていることがわかった。多様性指数より水温の低い冬期には、出現種の数が多く、また密度数がほぼ均一になることがわかる。

③.堆積汚泥に関して、1日当りの堆積汚泥湿潤重量に関して、各ケースで石炭水路の堆積量が一番少ないが、強熱減量は3つの接触材のうち一番高い。サンゴ石水路は各ケースで強熱減量の値が小さい。

参考文献

- 1) 楠田哲也編著：自然の浄化機構の強化と制御，pp. 101-109，技報堂出版，1994。
- 2) 岡田香子，鈴木穰，畑津十四日，天田高白：接触酸化水路における衛生指標細菌の除去機構，水環境学会誌，23，pp. 677-682，2000。
- 3) 酒井信行，南後和寛，高村弘人：河川水の直接浄化のための上向流木炭接触酸化法，水環境学会誌，18，pp. 663-669，1995。
- 4) 土屋十朗，岡田光正：浮上式礫間接触酸化処理法による都市河川の直接浄化手法について，水環境学会誌，16，pp. 430-435，1993。
- 5) 毛利光男，須田有輔，上原功，門倉伸行，田中裕作，細川恭史：汚濁海水浄化における礫間接触水路内の抑留物の分布と閉塞について，水環境学会誌，16，pp. 516-525，1993。
- 6) 毛利光男，須田有輔，上原功，門倉伸行，田中裕作，細川恭史：海水浄化の礫間接触水路内の付着・底生生物相，水環境学会誌，19，pp. 637-647，1996。
- 7) 井出哲夫：水処理工学，理論と応用，技報堂出版，1990。
- 8) 亀田泰武，渡部春樹，金井重夫，野村充伸：下水処理と水環境 ミクロの世界から地球環境まで，山海堂，2000。
- 9) 木元新作，武田博清：群集生態学入門，共立出版，1989。
- 10) 吉村千洋，福士謙介，熊谷幸博，佐藤義秋，海田輝之，大村達夫：オゾン消毒下水処理放流水を受容する河川の底生動物相に関する研究，水環境学会誌，No-21/9，pp. 609-615，1998。

(2002. 9. 30受付)