

◆ 報文 ◆

水路の水質浄化機能に関する実験

末次忠司* 小林裕明** 館健一郎***

1. まえがき

都市内には小河川や都市下水路、農業排水路などが貴重な水域として存在している。これらの河川や水路をネットワーク化することにより得られる効果は、氾濫防止・制御機能、災害時の緊急導水や防火機能及び微気象緩和機能など多岐に渡っているが、その一つに水質浄化機能があげられる。

ネットワーク化することによる水質浄化機能とは、滞留している水路の水の流通を促すことにより有機物の分解を促進させたり、比較的きれいな河川水を導水して希釈することにより水質を向上させる機能である。

本稿では、水路内の微生物等による水質浄化機能に注目し、灌漑期の中小水路を想定して、河川水を水路で流下させることにより得られる浄化効果を把握するために、円形回転水路を用いた基礎的な水質浄化実験を行った。この水路は、ポンプを用いずに(ばっ気が生じず)に長距離区間内の現象を把握できる回流式水路であり、純粋に流下のみの浄化機能を定量化できる特徴を有するものである。

2. 実験概要

実験は実際の河川水と河床生物膜を用いた。河川水は上浦市街地を流下して霞ヶ浦に流入する A 川、東京都と埼玉県の都県境を流下する B 川、埼玉県川口市を流下する C 川という BOD 値が異なるものを用いた。

実験水路は図-1 に示す水路がリング状に連続する円形回転水路(高さ 15 cm、幅 15 cm、中心半径約 70 cm、容量約 100ℓ、透明アクリル製)で、水路が設置してあるターンテーブルと水面上のターンボード(船のオールのように水表面を動いて流れを発生させる。全部で 6 枚設置)を逆方向に回転させることにより、2 次流の発生を抑えて、実際に近い流れを再現させることができる。

流速は、断面平均流速が 10 cm/s, 6 cm/s, 2 cm/s の 3 ケースを設定した。なお、2 cm/s のケースでは、ターンテーブルは回転させずに、ターンボードのみを回転させることにより水路内の流れを再現した。なお、実験前に水路横断面内の流速分布を計測して 2 次流が発生していないことを確認している。実験ケースを表-1 に示す。

水路の床板には、粗度として砂を貼付けた後、それぞれの河川に約 5 週間投入して生物膜を付着させたものを敷設した。ただし、case4 の床版では生物膜を付着させていない。

case3, case6 では、簡易な浄化工として、半円

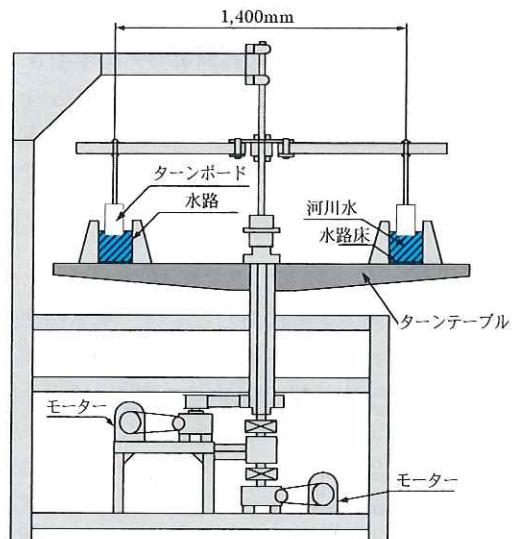


図-1 円形回転水路断面図

表-1 実験ケース

case No.	河川名	平均流速 (cm/sec)	生物膜	浄化工	明条件
case1	A川	2.0	有	無	暗
case2	A川	6.0	有	無	暗
case3	A川	6.0	有	有	暗
case4	A川	6.0	無	無	暗
case5	B川	6.0	有	無	暗
case6	B川	6.0	有	有	暗
case7	C川	6.0	有	無	暗
case8	C川	10.0	有	無	暗

柱形の塩化ビニル管の表面に人工芝を張り付けたもの(ラバー堰を想定)を、床板と同様に生物膜を付着させて水路床上に等間隔に4基設置した。この浄化工の設置は、水と生物膜との反応面積の増大効果をねらったものである。実験に用いた浄化工模型の概略図を図-3に示す。

実験は、各ケースとも注水時のばっ気の影響を少なくするために、河川水を水路内に注水後1時間静置した後に実施した。計測項目及び計測間隔を表-2に示す。また、実験は室内で行い、藻類等の光合成による有機物の内部生産の影響を除くために、実験水路の周囲を黒幕で覆って暗条件で実施したが、水温、気温等は特に制御していない。

各実験ケースのBOD初期値及び平均水温を表-3に示す。

なお、今回の実験には、以下の限界があることを断っておく。

- ・今回の実験で用いた河川水は、採水日が違うため、同一河川でもBOD初期値に差が見られる。

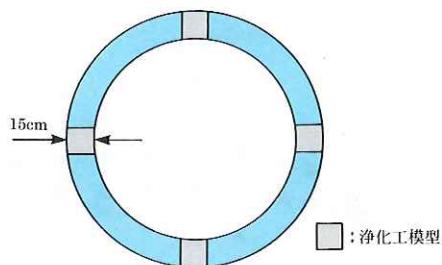


図-2 円形回転水路平面図

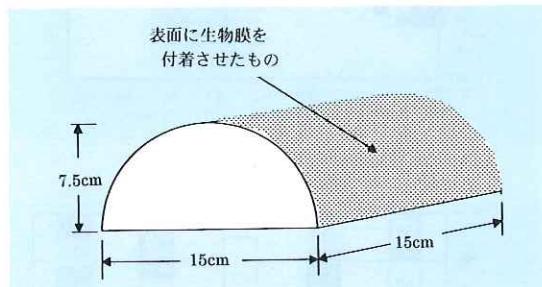


図-3 淨化工模型

表-2 計測項目と計測間隔

計測項目	計測間隔
BOD, D-BOD, COD, SS, T-N, T-P, DW, IL, chl-a	実験開始直前, 2h, 5h, 24h, 48h
植物プランクトン, 動物プランクトンの個体数及び種類	3河川とも実験開始前に各1回
DO, 水温, 照度	連続計測

表-3 各ケースのBOD初期値及び平均水温

case No.	BOD 初期値 (mg/l)	平均水温 (°C)
case1	14.5	10.5
case2	5.2	14.5
case3	10.5	8.6
case4	4.8	11.6
case5	9.3	17.5
case6	44.5	11.2
case7	14.3	11.2
case8	13.1	17.0

- ・大気中からの酸素の供給(再ばっ氣)によるBODへの影響は考慮していない。
- ・T-Nの内訳までは計測していないので、硝化に関する評価は行っていない。
- ・BOD測定においても硝化抑制は行っていないため、硝化に伴う酸素消費量がBODに含まれている可能性がある。

3. 実験結果

3.1 河川水の特性

実験開始前のそれぞれの河川水に対して藻類及び原生動物・後生動物の定量化を行った。3河川とも藻類では藍藻綱が90%を占め、そのうちサヤユレモ属(9,000~12,000細胞数/ml)が優占種であった。原生動物・後生動物では、鞭毛虫類が60~76%を占め、A川・B川ではオイコモナス属(それぞれ2,000細胞数/ml, 1,100細胞数/ml)が優占種であった。藍藻類のサヤユレモは湖沼、池、河川など各種の水域に見られる最も普通種であるが、鞭毛虫類のオイコモナス属はBOD負荷が高い場合や溶存酸素濃度の低いときに多数出現するものである。

3.2 各水質指標の計測結果

生物膜有、暗条件、浄化工無の条件でのケース(case1,2,5,7,8)におけるBOD, D-BOD(溶存性BOD), SS, T-N, T-P, DOの経時変化を図-4~9に示す。

48時間流下後のBODは、流下開始前の18~68%が低減され、D-BODでは5~48%が減少している。除去率は実験開始から5時間までの変化が大きく、それ以降は緩やかな減少となっている。これは以下の現象によるものと考えられる。実験初期にまず易分解性の有機物が分解され、その後、濃度の減少も伴って緩やかな減少に移っていく。

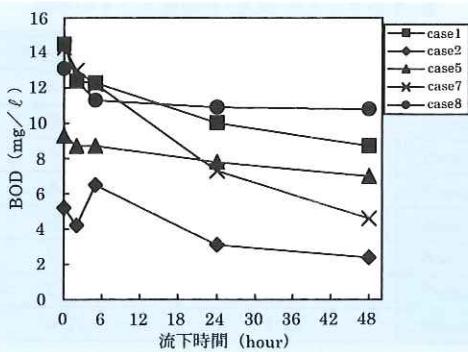


図-4 BOD

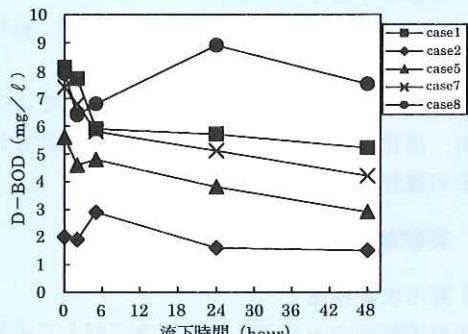


図-5 D-BOD

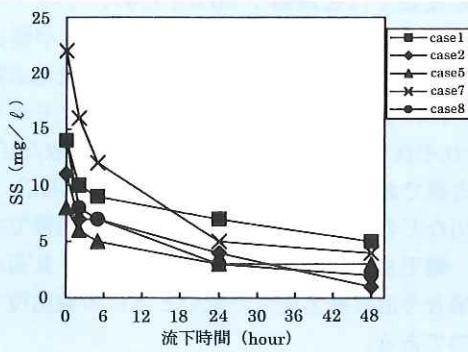


図-6 SS

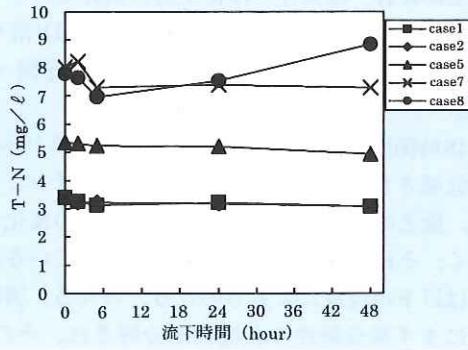


図-7 T-N

また、比較的比重の大きな浮遊性有機物が初期の段階で沈降し、徐々に比重の軽い有機物が沈降するといった物理的作用も伴うことによるものと考えられる。

また、48時間流下後までのBODの累積減少量を100とした場合に、D-BOD、P-BOD (浮遊性BOD : BODからD-BODを差し引いて求めた)の減少分が占める割合を図-10に示す。case2,7,8では、P-BODの減少の影響が大きくなっている。沈降による除去が卓越しているものと考えられる。

各指標値の中でもっとも低減率が大きかったSS

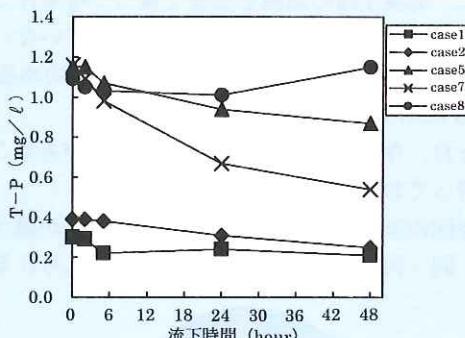


図-8 T-P

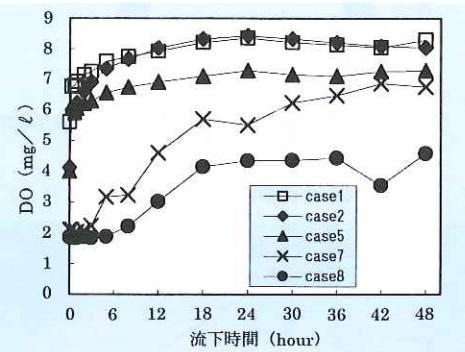


図-9 DO

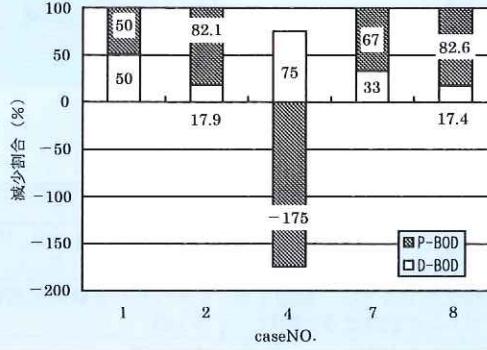


図-10 BOD の減少割合

では48時間後では初期値の63~91%が低減されているが、流速による低減効果の違いはみられなかった。

また、河川水中よりNが除去される過程は、バクテリアや藻類の増殖とともに取り込まれて河床に沈降するか、もしくは水生植物への吸着・固定化による除去で説明される(嫌気性条件下では脱窒による除去もある)。しかし、今回の実験では流下距離(反応時間)が短かったため、T-Nはいずれのケースでも48時間流下後での減少は10%未満と小さく、流下による浄化効果はあまりみられなかった。

3.3 生物膜の有無による違い

生物膜による浄化効果を明確にするために、生物膜の条件だけを変えたcase2(生物膜有)とcase4(生物膜無)の実験結果に注目してみる(図-11)。なお、実験開始前のBODは両ケースでほぼ等しい値であった。case2における48時間後のBOD、D-BODは、それぞれ初期値の54%、25%が除去されているのに対し、case4においてBODは微増しており、D-BODでは8%の減少と小さく、生物膜の有無による違いが明確に現れていると言える。

図-10からもわかるように、生物膜の有無はP-BOD濃度の変化に大きな影響を与えている。これは、生物膜は藻類が絡み合うように形成されており、これらに浮遊性有機物が付着することによる除去や生物膜内に存在するバクテリア等の分解作用による除去効果が現れたものと考えられる。

3.4 净化工の効果

今回、净化工として設置したものはラバー堰を模したもので、その表面には生物膜を付着させてあり、流水との接触面積を増加させることにより分解や付着による除去効果を促すことをねらいとしたものである。净化工の有無のみの条件を変えたcase2とcase3、case6とcase7のBODの経時変化を図-12に示す。case6ではBODの除去量はかなり大きいが、除去率でみると净化工無のcase7より净化工効果が小さくなっている。case2とcase3との比較では、净化工設置のケースの方が若干除去率が大きくなっている。従って、今回の実験においては条件により净化工による除去効果の違いがみられた。

3.5 流速の影響

流速の違いによるBODの変化をみたのが、

図-13である。流速が速くなることにより、拡散、分散、混合強度が強まり、水中物質濃度が均等化され、その結果、水中での物質同士、物質と微生物との接触機会が増加し、浄化機能が促進されると考えられるが、BOD除去率でみると、最も流速が大きいcase8が一番小さくなっている。case1、case8におけるD-BODとDOの経時変化を図-14に示す。一般的に、有機物の分解にはDOは4mg/l以上必要であると言われており¹⁾、case8のD-BODの減少が小さい理由としてDOが有機物の分解に必要な量に達していないことに

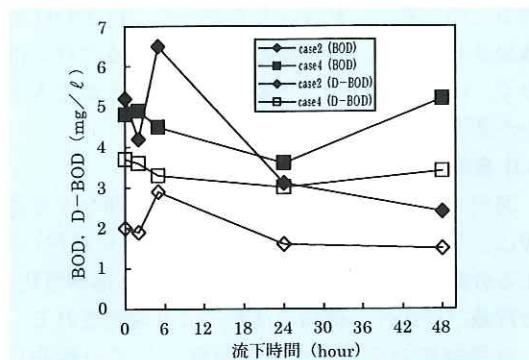


図-11 BOD, D-BOD (生物膜の有無)

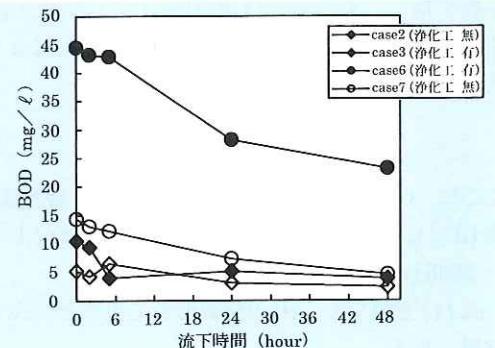


図-12 BOD (淨化工の有無)

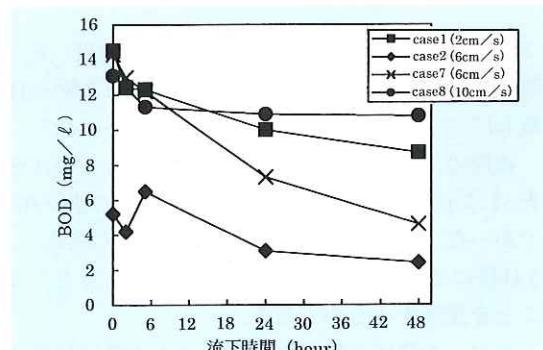


図-13 BOD (流速による違い)

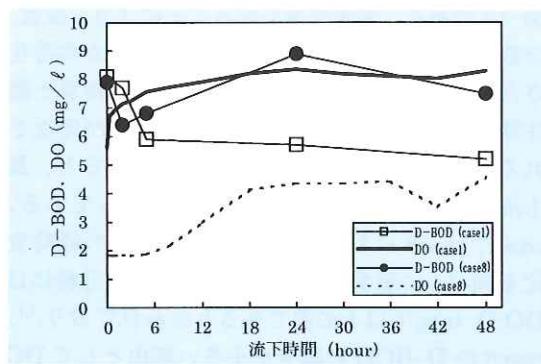


図-14 D-BOD, DO

因るものと考えられる。したがって、D-BOD を減少させるには、単に流速を大きくするだけではなく、いかに DO を多い環境とすることができるかが重要であると言える。

3.6 自浄係数

河川水中に存在する有機物の減少に関与する過程は、溶解性有機物の微生物(浮遊性・付着性)による分解、浮遊性有機物の微生物による溶解性化・分解及び浮遊性有機物の沈殿により説明される。

自浄機能の大きさを表す尺度として一般的に用いられる自浄係数は、有機物濃度の減少の速度係数を指し、その減少は単位時間当たりの減少量が濃度に比例するとして、Streeter-Phelpsにより、式(1)に表されている。

$$\partial C / \partial t = -(K_1 + K_3)C \quad (1)$$

ここに、 C ：全有機物濃度 (mg/ℓ)、 K_1 ：脱酸素係数 (d^{-1})、 K_3 ：沈殿や吸着による除去係数 (d^{-1})、 t ：時間 (d)

式(1)を積分し、10の指数関数で表すと、式(2)が得られる。

$$C = C_0 \cdot 10^{-(k_1+k_3)t} \quad (2)$$

ここに、 C_0 : $t = 0$ における全有機物濃度、 k_1 : 脱酸素係数 (d^{-1})、 k_3 : 沈殿や吸着による除去係数 (d^{-1})

実際の河川で算定された自浄係数 ($k_1 + k_3$) を表-4に示す。ここで、例えば ($k_1 + k_3$) の値が 0.2 であったとすると、川の水が同じ状態で流れ、5日後には BOD 濃度が初期の $1/10$ になるということを意味するものである。

また、水路床の付着生物膜による水質浄化効果を知るために単位水路床面積当たりの除去速度を

表-4 自浄係数 ($k_1 + k_3$) の実測値²⁾

(底は 10)

事例	$k_1 + k_3 (\text{d}^{-1})$
多摩川	0.1~1.88
多摩川	0.12~0.20
千曲川	1.2~2.4
松浦川	0.12~0.18
巣木川	0.11~0.17
筑後川	0.11~0.17
浅川	0.12
残堀川	0.43
野川	0.03
黒瀬川	0.31~3.3
竹田川	$0.361 + 0.111 \cdot \theta$ (θ : 水温 $^{\circ}\text{C}$)
底喰川	1.4
町野川	-3.0~9.7

求めてみる。定常状態における水路の流出端での濃度は式(3)で表される。

$$C_{out} = C_{in} [1 - R \cdot A / (C_{in} \cdot Q)] \quad (3)$$

ここに、 C_{in} 、 C_{out} ：水路の流入端と流出端の濃度 (mg/ℓ)、 R ：生物膜の除去速度定数 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、 A ：水路床面積 (m^2)、 Q ：流量 ($\frac{1}{86,400} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

式(3)より、次式が得られる。

$$R = E \cdot C_{in} \cdot Q / A \quad (4)$$

ここに、 $E (= 1 - C_{out} / C_{in})$ ：除去率

これまでに検討してきた、主に実験水路における各水路浄化工法による生物学的除去速度定数を表-5に示す。

また、今回の実験結果である BOD を用いて式(2)及び(4)より求めた各ケースの ($k_1 + k_3$) 及び R 値を表-6に示す。

表-4に示す実際の河川における自浄係数 ($k_1 + k_3$) と比較すると、今回の実験により求めた自浄係数は小さな値となっている。これは、河川には瀬や淵が存在し、瀬における接触酸化作用による浄化や淵における浮遊物質の沈殿及び水生植物への吸着作用等による浄化効果が水路と比較すると優れていることによるものと考えられる。

また、今回の実験は水路河床に生物膜を付着させただけの単純な条件における浄化効果を計測したものであるが、礫間接触材や紐状接触材などを

表-5 生物学的除去速度定数³⁾

(付着生物によるBOD分解)

水路	研究者	除去速度 (g·m ⁻² ·d ⁻¹)	備考
実験水路	Hanakiら	1.0~6.0	
礫間接触水路	津野・古部	0.7~1.3	河床付着バクテリア
浄化水路	岡田・須藤ら	3.6~16	紐状接触材、人工排水
浄化流路	川島・鈴木	15~17	数理モデル
実験水路	古賀ら	0.2~0.5	水路床の生物膜
実験水路	杉尾・長岡	15~77	水路床の生物膜、グルコース
実験水路	鈴木・竹石	2~70	水路床の生物膜、酢酸
排水路浄化施設	中村	51	礫充填
排水路浄化施設	中村	6.5	人工芝
実験水路	森田ら	7.2	人工芝、脱脂粉乳
実験水路	森田ら	3.2	ステンレス、脱脂粉乳
実験水路	森田ら	4.6	紐状接触材、脱脂粉乳
実験水路	森田ら	11	人工芝、河川水
実験水路	新ら	1.0~6.0	塩ビ板、パルプ排水

* ばっ氣による浄化効果を含んでいるものもある

表-6 自浄係数($k_1 + k_3$)及びR値

case	$k_1 + k_3$ (d ⁻¹)	R(g·m ⁻² ·d ⁻¹)
1	0.11	0.44
2	0.17	0.21
3	0.22	0.41
4	-0.02	—
5	0.06	0.17
6	0.14	1.33
7	0.25	0.73
8	0.06	0.17

用いて浄化機能を強化することにより、表-5に示すような除去速度を得ることが可能となると思われる。

4.まとめ

今回の実験により得られた知見をまとめると以下のようである。

- (1) 生物膜有、暗条件、浄化工無の条件で、実験水路に河川水を48時間流下させることにより、BODが18~68%、D-BODが5~64%、SSが63~91%減少し、開始後5時間までの減少率が大きい
- (2) また、生物膜を水路床に付着させていないケースでのBODの除去効果はみられず、生物膜の有無による浄化効果の違いは大きい
- (3) 河床生物膜がある場合の自浄係数($k_1 + k_3$)は0.06~0.25(d⁻¹)、生物膜の除去速度定数Rは0.17~1.33(g·m⁻²·d⁻¹)であった
- (4) BODで表される有機物については、水路を流下することによる低減効果を確認することができたが、T-Nについては低減効果はみられなかった。

参考文献

- 1) 宗宮功他：自然の浄化機構、技報堂、p.86, 1990.
- 2) 國松孝夫、村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析、技報堂、p.106, 1989.
- 3) 楠田哲也他：自然の浄化機構の強化と制御、技報堂、p.73, 1994.

末次忠司*



建設省土木研究所河川部
都市河川研究室長、工博
Dr. Tadashi SUETSUGI

小林裕明**



同企画部企画課企画係長
(前都市河川研究室研究員)
Hiroaki KOBAYASHI

館健一郎***



同河川部都市河川研究室
研究員
Ken-ichiro TACHI