〈技術報告〉

河川水の直接浄化のための上向流木炭接触酸化法

酒 井 信 行* 南 後 和 寛* 高 村 弘 人*

River Water Purification by Up-flow Charcoal Bed
Contact Treatment Technique

Nobuyuki SAKAI*, Kazuhiro NANGO* and Hiroto TAKAMURA*

* Kinki Regional Construction Bureau, 1-5-44, Ohtemae, Chuo-ku, Osaka 540 Japan

Abstract

In this report, the performance of up-flow charcoal bed contact treatment plant was experimentally investigated to determine the design-operating parameters and its proper maintenance method to ensure effective purification. Some improvements (*e.g.*, in flow direction, and lower part of tank) have been made on this plant. In this experimental plant, polluted water runs through charcoal bed in the upward direction, which is different from conventional gravel bed contact treatment plant, where contaminated water runs in the horizontal direction. Water-purification test, biological test, and a test on maintenance methods were conducted, with using river water and secondarily treated domestic waste water.

Removal efficiencies of BOD, SS, T-N and T-P were approximately 80%, 90%, 30% and 40%, respectively, at about 30-40 minutes of contact time. Also, it became apparent that the SS removal in influent part of the plant was expected to allow long-term purification without the rapid development of clogging in charcoal bed. The aeration-washing of the charcoal bed with diffuser avoided the deterioration of treatment performance due to the clogging. Therefore, up-flow charcoal bed contactpurification seemed to have a advantage to treat river water polluted.

Key words: river water, contact-purification, up-flow, charcoal, self-purification

1. はじめに

経済の発展, 都市化の進行に伴って, うるおいある美しい河川が強く求められるようになってきている。“清浄な水が豊かに流れる”河川の創出のためには, 流域を含んで多様な施策を総合的に実施していく必要がある。

河川の水質改善については, 下水道整備を中心として取り組まれてきたが, 膨大な事業費を必要とするためその進捗は思うにまかせず, 大きな水質改善効果をあげるに至ってはいない。このため, 全国各地で汚濁した支川や本川の水を対象とした「水域直接浄化」¹⁾の

試みが数多く行われるようになってきた。

Table 1 に下水道整備や排水処理を除く一般的な河川水質浄化対策の一覧表を示す²⁾。「水域直接浄化法」は対象水域や問題となる水質汚濁現象, 対策を実施する場所, さらに浄化機構によって区分することが可能である。

河川の有機汚濁に対しては, 野川で隣間接触酸化法の浄化実験³⁾が行われて以来,

- ①用いる材料が自然材であること
- ②一定の滞留時間で安定した有機物除去が期待できること
- ③堆積汚泥の除去を除いて維持管理がほとんど必要な

* 建設省近畿地方建設局 〒540 大阪市中央区大手前1-5-44

Table 1 River water purification techniques

techniques	
physicochemical	contact sedimentation (by using slanted plates and cloth) filtration (sand, micro-strainer, long fur) permeation (irrigation, trench, etc.)
biological	aeration contact oxidation (packed material: honey-comb, corrugated plate, string, gravel, charcoal, etc.) thin-layer-flow purification purification by water-dwelling plants (emerging, floating, in-water living plants)

いこと

などの理由で礫間接触酸化法が採用される事例が多い。一方、礫間接触酸化法については、

①有機物除去は期待できるものの栄養塩類の除去は期待できない

②堆積汚泥による閉塞や排泥方法が課題を残していることなどの問題点が指摘されている⁴⁾。本研究は、これらの問題を解決する一手法として考えられた“上向流木炭接触酸化法”について検討したものである。上向流木炭接触酸化法は、木炭表面への浮遊性物質の接触沈殿や付着性微生物による生物酸化の効果などを積極的に利用し、栄養塩類についても一定の除去が期待できるものである。また、既存の礫間接触酸化施設で一般的な滞留時間(1.3時間)よりも短い接触時間で同等の浄化効果が得られるため必要敷地面積を小さくすることが可能となり、維持管理の面についても堆積汚泥の排除を容易とするよう装置上の工夫が施されている。

本論文では、上向流木炭接触酸化法について、良好な浄化効果を維持するために必要な設計操作因子(木炭径、接触時間など)を明らかにすることを目的としている。約1年間にわたる水質調査結果をもとに、a 実験装置の浄化性能、b 設計操作因子の違いによる浄化特性、c 付着生物膜の性状、d 維持管理について考察を加えた。

2. 実験装置の概要と実験方法

2.1 実験装置の概要

建設省近畿地方建設局近畿技術事務所構内に実験装置を設置し、浄化実験を実施した。実験装置の概要をFig. 1に示す。この実験装置は、流入部、汚泥堆積部、木炭充填部からなる上向流浄化装置を2槽連結したものであり、装置内の通水方向を流入部では下向流、木炭充填部では上向流とすることにより、浮遊性物質の

Fig. 1 Experimental setup (unit: mm)

負荷を低減したり、整流化による均一な流れを確保するなどの効果も期待するものである。

実験の原水には、それぞれ近畿事務所構内の下水2次処理水を原水ピットに一時貯留したものを用いた。原水は、原水ピットから水中ポンプで導入され、第1槽から第2槽へはオーバーフローして自然流下するシステムとした。試料水は、槽の流入・流出部および木炭充填部の下に設置したピットから採水し、分析・測定に供せられた。

また、実験装置全体は装置内の状況が観察できるように透明なアクリル製とし、槽内には流入部にDO供給用の散気管、木炭充填部の下に曝気洗浄用の散気管、さらに槽底部の汚泥堆積部には汚泥引抜き管を設置し

た。なお、装置内での藻類増殖を抑制するため、装置全体を黒布で覆い、暗条件下で浄化実験を行った。

木炭充填部 (L100cm×W50cm×H100cm) 内には、木炭を充填した金網製の籠が4段に重なって入っており、木炭の交換、サンプリングを容易なものとした。また、多層汙過の考えにもとづき、第1槽には粒径の大きい木炭を、第2槽には粒径の小さい木炭を充填し、木炭間隙の目詰まりを抑制するよう配慮した。充填した木炭の性状を Table 2 に示す。

接触材として木炭を利用することは、間伐材、風倒木などの廃材の有効再利用に貢献し、使用した木炭もプラスチック製の接触材と異なり、堆肥化などにより自然環境への還元も期待できるものと考えられる⁵⁾。

2.2 実験条件と実験方法

下水2次処理水を対象とした連続浄化実験は平成5年4月26日～平成6年1月13日の期間実施した。通水開始後、数週間を経て木炭表面に生物膜の形成が確認された後、木炭粒径、接触時間、曝気の有無などの因子による浄化効果の差異を比較、検討するため運転条件を変化させ、① 木炭粒径比較実験 (Case 1)、② 接触時間比較実験 (Case 2)、③ 曝気条件比較実験

(Case 3) を実施した。実験条件の概要を Table 3 に示す。

各実験では、水質項目として DO, BOD, SS, NH₄-N, T-N, T-P を測定するとともに、木炭充填部の閉塞状況、木炭表面の生物膜の状況を観察した。各水質分析は河川水質試験方法 (案)⁶⁾ に準じて実施した。木炭充填部の閉塞状況は充填部での損失水頭の増加による静水圧の変化を測定した。生物相の同定は、木炭表面に付着している生物膜を剝離除去したものを試料として、微小なものは光学顕微鏡で、それ以外は肉眼観察にもとづいて行った。

なお、この浄化装置で用いた実験原水は比較的濃度変動が大きいので、各調査点で同時に採水したのでは厳密に浄化効果が把握できないと考え、装置内の滞留時間を計測して各調査点の採水時間間隔を決定した。なお、滞留時間の測定には、塩化カリウムを用いて電気伝導度を計測するトレーサー実験を採用した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験装置の浄化性能

連続浄化実験での原水と処理水水質および除去率を Table 4 に示す。この実験装置の浄化性能を隙間接触酸化法と比較すると、それぞれ変動範囲は大きいものの、BOD, SS, NH₄-N は同程度の、T-N, T-P はやや高い除去率が得られた。この装置の浄化特性を整理すると以下のものが考えられる。

(1) SS, BOD の除去率が高いことから、この装置の主な浄化特性は、浮遊性物質の固液分離 (沈殿、捕捉) および生物酸化である。

Table 2 Characteristics of charcoal bed

	Tank 1	Tank 2
Charcoal size	5-10cm	2-5cm
Charcoal temp.	800℃	600℃
Material	cedar, cypress	broadleaf tree
porosity	52%	59%

Table 3 Summary of experimental conditions

	Experiment No.		
	Case 1	Case 2	Case 3
Water temp.(℃)	6.8-18.5	6.8-18.5	6.8-18.5
Charcoal size (cm)	small : 2-5 middle : 5-8 large : 10-15	tank 1 : 5-10 tank 2 : 2-5	tank 1 : 5-10 tank 2 : 2-5
Porosity (%)	small : 47 middle : 44 large : 44	tank 1 : 52 tank 2 : 59	tank 1 : 52 tank 2 : 59
Flow rate (cm ³ /sec)	10-15	120-450	120-450
Contact time (hr)	0.5-0.7	0.15-0.7	0.30-0.35
Aeration	none	mid-aeration	none pre-aeration mid-aeration both aeration

Table 4 Treatment efficiencies of effluent from sewage disposal plant

	influent conc. (mg/L) min.-max.(ave.)	effluent conc.(mg/L) min.-max.(ave.)	removal (%) min.-max.(ave.)
BOD	3.6-42.3 (22.7)	0.2-7.5 (3.9)	39.3-95.1 (80.4)
SS	1.8-157.0 (24.7)	0.1-12.0 (3.1)	25.0-99.9 (84.8)
NH ₄ -N	0.44-5.21 (2.39)	0.18-3.35 (1.02)	27.9-79.1 (50.7)
T-N	6.1-23.6 (13.2)	3.9-16.9 (7.5)	2.9-84.9 (36.1)
T-P	0.29-4.00 (1.55)	0.13-1.81 (0.71)	16.5-75.0 (52.8)

Fig. 2 Distribution of suspended solid in No.1 tank

(2) T-N, T-P の除去率が大きく変動したのは、原水の汚濁負荷変動が大きく、また浮遊性物質除去を主体とする浄化機能の働きにより、浮遊性成分の割合が変化すると沈殿・捕捉の浄化効果が変動するためと推測される。

(3) 栄養塩類の浄化機能としては、各形態別に定量的な評価は行えなかったが、硝化・脱窒およびリンの生物膜への吸着および吸収によるものなども寄与していると考えられる。

接触時間比較実験 (Case 2) における浮遊性物質の削減効果は、Fig. 2 に示すように、流入濃度の約50%が流入部で重力沈降により削減され、さらに、木炭充填部における接触沈殿により約70%が除去された。この結果から、この実験装置の形状は、流入部で効率よく浮遊性物質を除去するため、これまで礫間接触酸化法で問題となっていた充填部間隙の目詰まりの抑制に効果的であることが確認された。

この浄化実験では、原水として下水2次処理水を採用したため水質が時間的、季節的に大きく変化したことが、長期間にわたり浄化効果が確認された。したがって、この実験装置は木炭充填部での目詰まり、堆積汚泥の

排出などの維持管理を定期的に行えば、良好な浄化効果を維持できるものと考えられる。

3.2 流入負荷量と除去率

連続浄化実験での各水質項目の流入負荷量と除去率の関係を Fig. 3～5 (実験条件: Case 2) に示す。

① BOD, SS は、低負荷量の範囲では負荷量が増加するにつれて除去率が高くなり、ある負荷量を超えると除去率はほぼ一定の値を示した。これは、負荷量の増加に伴い流入水中の浮遊性物質の粒径、成分が変化してSS量が大きくなると、後続の粒子が先行吸着している粒子の上に接触付着しやすくなる現象を表している。さらに間隙中の抑留量が大きくなり生物膜の厚さが増してくると、間隙流速が増大して限界抑留量に達することによるものと考えられる。

② NH₄-N は、負荷量が増加するにつれて除去率が低下する傾向がみられた。溶解性物質である NH₄-N は、主に微生物の吸収、電気的吸着により除去される。したがって、負荷量が多くなるとこれらの浄化機能が律速となり一定量の NH₄-N しか除去できないため、許容範囲を上回り除去率が次第に低下するものと考えられる。

3.3 設計諸元検討実験

3.3.1 木炭粒径比較実験

木炭の粒径と浄化率の関係の調査結果を Table 5 に示す。この結果から、①粒径が小さいと除去率が高くなること、②他の水質項目に比較してSSの除去率が相対的に高いことなどが分かった。これは、主な浄化機構が沈殿と汜過であり浮遊性有機物などがSSの除去に伴い木炭間隙内や汚泥堆積部に抑留、堆積されているものと考えられる。

3.3.2 接触時間比較実験

BOD, SS について木炭充填部における接触時間と除去率の関係を Fig. 6, 7 に示す。流入負荷変動などの要因から除去率にバラツキがみられるものの、接触時間が長くなると除去率が増加する傾向が認められた。これらの結果から浄化施設を計画する際には経済性などを勘案して、接触時間を30～40分とするのが適当で

あると考えられる。

また、木炭表面の付着微生物の働きによる酸化分解の効果を把握するため、第2槽でのDOの消費状況をFig. 8に示す。ここでは第2槽流入部での曝気により木炭充填部の流入DOはほぼ飽和状態であった。一般

Fig. 3 Relation between loading and removal percentage of BOD

Fig. 4 Relation between loading and removal percentage of SS

に、DOが $2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下になると好気性微生物の活動に支障をきたすとされていることから、木炭充填部を好気条件下に保ち安定した浄化効果を維持するためには、各槽で木炭充填部との接触時間を15～20分以下にすることが望ましいと考えられる。

3.3.3 曝気条件比較実験

各槽における木炭充填部単位体積当たりの曝気空気量を約 $50 \text{ l} \cdot \text{m}^3$ 分とした曝気条件と各水質項目の除去率の関係をTable 6に示す。この結果から、特に窒素、リンについては曝気により浄化効果が飛躍的に増大することが分かった。また、全般的にみて中間曝気での除去率が最も大きな値となった。これは、前述のように好気条件下で栄養塩類の溶出が抑制されたことの他に、曝気による凝集効果も寄与していると考えられる。

3.4 装置内の付着生物の特性

木炭充填部では、通水後約1週間位から木炭表面に生物膜や浮遊物質が付着していることが確認され、各装置とも生物膜は褐色を呈していた。

付着生物としては、ツリガネムシなどの原生動物、輪形動物、環形動物、軟体動物などが観察された。この他、特異的なものとしては化学栄養細菌である鉄細

Fig. 5 Relation between loading and removal percentage of $\text{NH}_4\text{-N}$

Table 5 Effect of charcoal size on BOD, SS, T-N and T-P removal

	removal percentages (%)			
	none	pre-aeration	mid-aeration	both
TOC	46.2	51.0	49.3	44.2
SS	75.3	92.4	94.8	91.5
T-N	3.2	16.5	49.3	24.0
T-P	0.0	50.9	55.2	48.8

菌 (*Crnotherix* sp.) も観察された。

装置の壁面、籠の金網、木炭表面、堆積汚泥などには大型付着・底生動物が出現した。大型付着動物（幼生の段階）の付着は通水開始1カ月後位から観察された。主な出現種としては、甲殻類（カイミジンコ、ミ

ズムシなど）、昆虫類（ユスリカなど）などが多くみられた。

4. 維持管理および事業化の検討

上向流木炭接触酸化法の維持管理で最も大きな問題は、過剰な付着生物膜の剝離・流出による処理水水質の悪化とこれに伴う木炭間隙の閉塞である。したがって、この実験では、付着生物膜量を適正に制御するため、木炭充填部での損失水頭が大きくなった場合、散気管による曝気洗浄を試みた。この方法の概要は、流入・流出口を閉じ、木炭充填部の下に設置した散気管によって槽内に循環流を発生させ、木炭表面の過剰生物膜を剝離、沈降、堆積させるものである。

連続通水実験の結果から、木炭充填部の単位間隙体積当たりの抑留SS量が約 $10\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ を超えると除去率、通水性が悪化したため、安定した浄化効果を維持するためには許容抑留SS量以下となるよう配慮する必要があることが知見として得られた。この実験では、約10分間（曝気空気量約 $700\text{l}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{分}$ ）の曝気洗浄により木炭間隙の目詰まりが解消された。また、汚泥は堆積状況に応じて3カ月に1回程度の引抜きを行った。

Fig. 6 Relation between contact time and removal percentage of BOD

Fig. 7 Relation between contact time and removal percentage of SS

Fig. 8 Relation between contact time and concentration of DO

Table 6 Effect of aeration conditions TOC, SS, T-N and T-P removal

	removal percentages (%)		
	small (2-5cm)	middle (5-8cm)	large (10-15cm)
BOD	42.2	30.4	24.0
SS	56.0	42.9	27.0
T-N	19.2	12.8	10.2
T-P	21.3	16.5	9.5

Fig. 9 Schematic diagram of up-flow charcoal bed contact-purification plant

また、近畿地方建設局では、Fig. 9 に示すように、この上向流木炭接触酸化法を直轄河川で事業化する予定である。なお、事業化にあたっては河川の高水敷の条件、計画対象流量、汚泥の処理・処分、有効利用方法などについて今後も検討する必要があると考えられる。

5. ま と め

新たな河川水質浄化手法として期待できる上向流木炭接触酸化法を適用した浄化実験の結果、以下の知見が得られた。

1) BOD, SS など各水質項目について概ね良好な浄化効果が確認され、目詰まりの原因となる浮遊性物質も流入部で効率よく除去できた。

2) 流入負荷量と除去率の関係をみると、BOD, SS は負荷量が増加すると除去率も高くなり、ある負荷量を超えると除去率はほぼ一定の値を示した。一方、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は負荷量が増加するにつれて除去率が低下する傾向がみられた。

3) すべての水質項目について粒径の小さい木炭で高い除去率が得られた。これは、粒径が小さいと接触沈殿面積が大きくなり沈殿効果が促進されること、付着生物膜量が大きくなることなどによると考えられる。

4) 木炭との接触時間についての検討では、礫間接触酸化施設で一般的に採用されている滞留時間(1.3時間)に対して、30~40分の接触時間でBODの70~80%, SSの80~90%, T-Nの30~40%, T-Pの50%程度が除去された。

5) 曝気条件については、第2槽流入部で曝気をした場合に高い除去率が得られた。これは、曝気による栄養塩類の溶出抑制の他に、曝気による凝集効果が寄

与しているものと推測される。

6) 木炭表面の付着生物膜において多様な生態系が形成されており、出現生物は通常の生物膜処理の場合とほぼ同様であった。

このように上向流木炭接触酸化法は、BOD, SS などは礫間接触酸化法と同等の除去率が得られ、T-N, T-P についてもある程度の浄化効果が期待できる結果が得られた。また、通水方向を上向流とすることで礫間接触酸化法(横流式)よりも施設面積を小さくできるため、用地上の制約がある場所でも建設が可能であると考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、貴重な御指導を賜った京都大学防災研究所 池淵周一教授に深謝いたします。また、貴重な御助言をいただいた建設省淀川工事事務所、大和川工事事務所の関係各位に謝意を表します。また、実験のとりまとめにあたって御協力いただいた(株)日建設計の方々に感謝いたします。

(原稿受付 1994年10月27日)

(原稿受理 1995年5月28日)

引 用 文 献

- 1) 須藤隆一 (1990) 水域直接浄化の意義と展望、用水と排水、32(8), 3-7.
- 2) 廣木謙三 (1992) 水質浄化手法の概要について、ヘドロ, 53, 15-21.
- 3) 建設省京浜工事事務所 (1984) 野川浄化施設の効果、河川, 457, 20-28.
- 4) 衛藤俊司 (1993) 河川・湖沼・水辺の水質浄化、生態系保全と景観設計, 436pp., 工業技術会, 東京.
- 5) 谷田貝光克, 山家義人, 雲林院源治 (1991) 簡易炭化法と炭化生産物の新しい利用, 97pp., 勸林業科学技術振興所, 東京.
- 6) 建設省技術管理業務連絡会水質部会 (1984) 河川水質試験方法(案), 676pp., 国土木研究センター, 東京.