

多段土壌層法による河川の直接浄化および 水質浄化特性に関する研究

海野修司¹・若月利之²・増永二之³・伊与田勝己⁴

¹正会員 国土交通省所長 遠賀川工事事務所 (〒822-0013 直方市溝堀 1-1-1)

²農博 島根大学教授 生物資源科学部 (〒690-8504 松江市西川津町 1060)

³農博 島根大学講師 生物資源科学部 (〒690-8504 松江市西川津町 1060)

⁴正会員 第一復建(株) 技術第2本部水工部 (〒816-0094 福岡市博多区諸岡 1-7-25)

本研究では、多段土壌層法の河川の直接浄化への適応を目的に、2000年12月より一級河川遠賀川の支川、熊添川を対象に1年間実証試験を行い水質浄化性能の検討を行った。この結果、多段土壌層法の特徴である高速負荷条件(4m³/m²/日)を1年間継続しても、河川水のBOD₆-105mg/l(平均30mg/l)を平均で2mg/lまで年間を通じて安定して処理ができ、修景用水あるいは親水用水として利用できる処理水質を得ることができた。通水層資材の水質浄化能の比較(ゼオライトと軽石)では、BOD除去に関しては軽石の方がやや優れていた。また、多段土壌層装置における各汚濁物質除去係数を求めた。多段土壌層装置内への河川水中の無機SSの蓄積による目詰まりまでの耐用年数を推定した結果、耐用年数は20年以上と推定された。

Key Words : multi-soil-layering system, direct treatment of polluted river water

1. はじめに

わが国では、これまで国家的な支援を受け汚水処理施設が急速に整備されてきたが、近年の国・地方自治体の財政事情や整備対象地区の地方への移行に伴う費用の増大傾向から、これまでのような施設整備が困難となってきている。加えて、集合処理施設においても、長引く景気の低迷から国民は経済的負担に困惑し、個人負担工事が進捗せず、投資効果の発現が遅れる傾向が見られるようになってきた。

公共用水域の水質について、BODやCODなどの有機性汚濁については、平成11年度の調査で公共用水域全体で環境基準の達成率が78.7%と改善される傾向にあるものの¹⁾、市街地で生活排水などが流入する都市河川等ではBODが10mg/lを超えるような水質汚濁状況が全国的に見受けられる。また、琵琶湖や霞ヶ浦等多くの湖沼においては1980年代後半より溶存態のCOD濃度が徐々に増大する傾向が認められ²⁾、これらの水域が水道水源である場合、浄水塩素処理過程で生成されるトリハロメタン等による健康リスクの増大が危惧されている。

本来、水質汚濁の問題は、汚染者負担の原則に照らし、下水道等の集合処理や合併浄化槽等の個別処理

で対応すべきであるが、近年は、環境保全の観点から、暫定的あるいは補完的施策として、河川や水路の直接浄化事業に取り組みざるを得ない状況となってきた。また、現状の汚水処理体系では湖沼水に認められるCOD成分のような難分解性有機物の濃度上昇を解決することは困難であり、より高度な処理レベルの達成が求められている。つまり、高度処理を行うことのできる河川浄化システムは上記問題の解決に大きな貢献ができると考えられる。しかし、現在の河川浄化法の中には、処理水を再利用できるほどの高度処理技術は確立されておらず、新しい河川浄化技術の開発・導入が必要である。

筆者ら研究グループは、後述する多段土壌層法^{3), 10)}により、これまでに家庭排水や屋外公共施設のトイレ排水、食堂および公衆トイレの混合排水等の処理および、河川浄化へのベンチマーク規模の装置によりBOD₁₀-15mg/l程度の濁度河川の直接浄化試験を行ってきた。本報では、これらの結果を基に多段土壌層法をベースとしたより汚濁度の高い河川浄化システムの開発を目的に、2000年12月から2001年11月まで行った実証試験の結果を報告する。

今回の実証試験では、従来の土壌式浄化装置では不可能であった高速処理、4m³/m²/日負荷、において、河

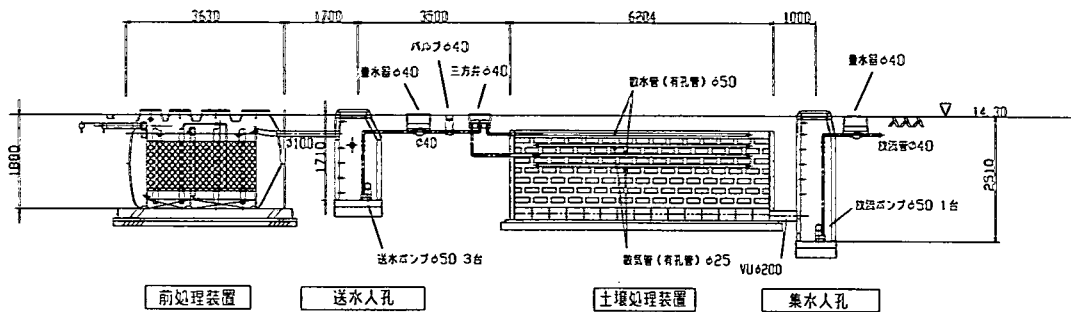


図-1 実証試験装置の断面図

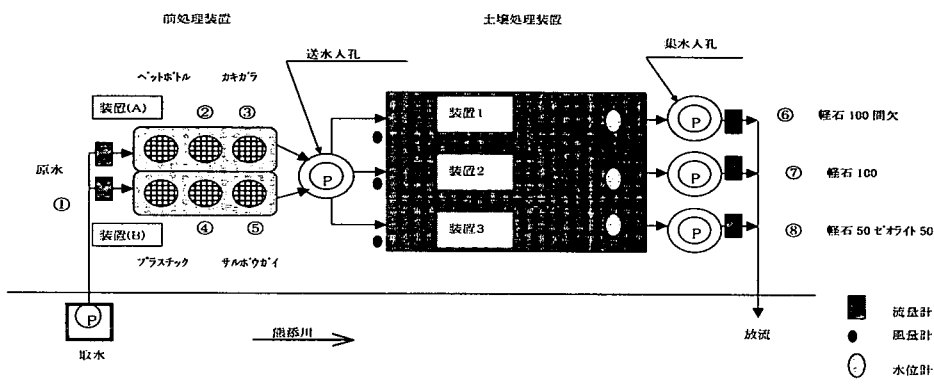


図-2 実証試験装置の処理フロー

川水中の汚濁度の指標となる BOD を現状の河川浄化法では達成困難である 5mg/l 以下に浄化することを目標として、現場環境条件での多段土壌層装置の処理能の検証を目的とした。

2. 実験方法

(1) 対象河川

一級河川遠賀川に流入する支川の一つである熊添川を浄化対象河川とした。熊添川流域（福岡県飯塚市および穂波町）の民家より生活雑排水が流入し汚濁源となっている。また、農作のための灌漑期（6-9月）には農業用排水が流入し、季節により河川水質および流量が変動する。平成8-11年における各月毎の観測結果では、冬期（12-3月）におけるBODおよび河川流量は38-78mg/lと0.06-0.1m³/s、灌漑期ではそれぞれ5-17mg/lと0.19-0.43m³/s、その他の月（4, 5, 10, 11月）では、19-34mg/lと0.11-0.16m³/sと冬期と灌漑期の中間程度の値であった。

実証試験装置は、熊添川が遠賀川に流入する地点の遠賀川河川敷に図-1のように埋設した。

(2) 実証試験装置

図-2に実証試験装置の処理フローを表す。河川水はポンプにより前処理装置（接触ろ過槽）に流入された後、土壌処理装置（多段土壌層装置）へ流入される。前処理装置にはSSの除去を目的として、ペットボトルの切断物、カキ殻、プラスチックろ材、サルボウガイ殻を充填し比較処理を行ったが、本報では結果のみ示し前処理装置の考察は行わない。

多段土壌層装置は図-3に示すように、透水性が高く粒径の揃ったゼオライトや軽石からなる通水層の中に、汚水浄化機能を強化した処理土壌層をレンガ積層状に多段に配置した構造を持つ。装置は3基設置し、通水層資材比較のために粒径3-5mmの軽石（大江化学工業製）を装置1と2に、同じく粒径3-5mmゼオライト（イズカ製）と軽石の1:1混合物を装置3に充填した。

表-1 多段土壤装置の比較 (材料および運転方法)

種別	通水土壤の材料		汚水負荷量 ($m^3/m^2/日$)	送水パターン		送水強度 ($m^3/m^2/日$)	
	軽石	むね付		2000年12月- 2001年3月中旬	2001年3月中旬 -2001年11月(※)	2000年12月- 2001年3月中旬	2001年3月中旬 -2001年11月(※)
装置1	100%	—	4.0	10分送水 10分休止	18時間送水 6時間休止	8.0	5.3
装置2	同上	同上	同上	連続送水	20時間送水 4時間休止	4.0	4.8
装置3	50%	50%	同上	同上	同上	同上	同上

※ 装置3は2001年6月で運転終了

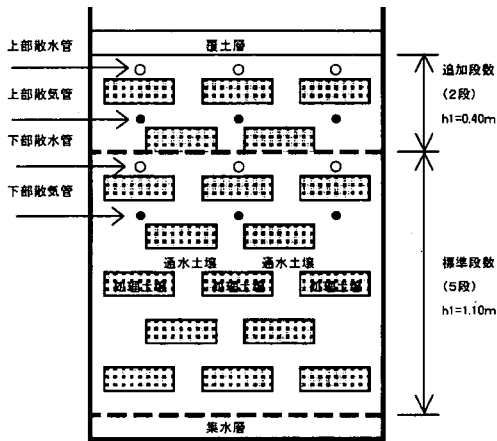


図-3 多段土壤層装置の構造概要

粒径 3-5mm のゼオライトや軽石は飽和透水係数が 0.8-0.9cm/s と高く、この透水性が従来の土壤浸透法では不可能であった負荷量 $1m^3/m^2/日$ を超えるような高速処理を可能にしている。土壤の比表面積は散水ろ床法と比較して千から百万倍大きく、高度な生物の集積が可能となりそれに伴い分解や硝化・脱窒の様な生物学的な反応が効率化される。比表面積の大きさはろ過・吸着・酸化還元といった物理化学的な反応も効率化すると同時に、処理土壤に含まれる腐植や酸化鉄・アルミニウムなど多様な構成成分により、農薬のような疎水性物質やリン酸の除去といった高度処理も可能となる⁹⁾。

処理土壤層は現地河川敷土壤：マサ土：木炭：腐葉土をそれぞれ容積比 16:16:4:4 の混合土壤を麻布で包み乾燥重量密度 1.2-1.3g/cc で充填した。処理土壤層の飽和透水係数は平均で約 0.004cm/s (346cm/日) であり、この処理土壤層の透水係数を超える流入水は処理土壤層表面を伝って、下方へ浸透してゆく。装置上

部の散水管より流入した河川水は、処理土壤層内のみでなく処理土壤層表面と接触しながらこれら土壤の浄化機能により浄化される。

従来の河川や湖沼の直接浄化に用いられてきた接触酸化法と比較した場合、上述したように土壤の比表面積の大きさと構成成分の多様さにより、より高度な処理を行うことができ処理水を親水用水などとして再利用することも可能となる。本装置による機能・機構の詳細については既報を参照されたい^{9), 10)}。また従来型の土壤浸透法と比較した場合、数十倍の負荷を行うことができ、施設面積を大幅に縮小することができる。

今回、BOD30-40mg/l の汚濁度の高い河川に適應するために、次のように装置を改良した。装置の処理能力を向上させるために、処理土壤層の段数を過去の河川浄化装置¹⁰⁾の5段から7段へ増加した。次に、装置内へのSSの蓄積による目詰まりへの対策として、散水管を処理土壤層1,3段目の上に、散気管を処理土壤層2,4段目の上に配置し、上部で目詰まりが起こった際に散水、散気とも下段に切り替えができるようにした。なお、装置3については、通水層資材の比較検討を終えた2001年6月上旬に実験を終了した。

(3) 運転条件

前処理装置は滞留時間 0.5-1.3 時間で運転し、接触ろ過槽内へのSSの集積に応じて3日から10日に一度の頻度で逆洗を行った。前処理水は送水ポンプにより負荷量 $4m^3/m^2/日$ を維持しながら、多段土壤層装置へ散水管を通して送水した。

多段土壤層装置への送水パターンを表-1のように変化させ、2000年12月-2001年3月中旬の期間は、装置1は10分間隔の間欠送水、装置2と3は24時間連続送水により負荷し、2001年3月中旬より試験終了までの期間は、装置1は18時間、装置2と3は20時間かけて連続送水により負荷し、流入時間の違いによる処理能の比較を行った。多段土壤層装置への散気は $5m^3/m^3/秒$ で24時間行った。

表-2 河川水、処理水の平均水質 (2000年12月-2001年11月)

種別	pH	DO (mg/l)	BOD (mg/l)	SS (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)	透視度 (cm)	水温 ($^{\circ}\text{C}$)
河川水	7.39	3.2 (0.5-7.5)	29.8 (5.7-105)	23 (2-77)	3.4 (1.7-5.0)	0.64 (0.32-1.16)	38 (8-77)	18.9
前処理水	7.40	1.8 (0.5-4.1)	16.0 (2.1-50.3)	13 (2-26)	2.8 (1.4-4.5)	0.56 (0.27-0.79)	55 (14-100)	18.5
装置1	7.63	7.9 (4.5-10.1)	2.2 (0.5-7.0)	3 (1-9)	2.0 (0.7-3.8)	0.22 (0.08-0.37)	100	18.0
装置2	7.62	7.2 (0.7-9.8)	1.9 (0.5-5.3)	3 (1-6)	2.0 (0.5-2.4)	0.25 (0.10-0.37)	98 (81-100)	17.9
装置3	7.63	8.3 (5.5-10.2)	2.6 (0.5-5.5)	2 (1-6)	0.8 (0.2-1.2)	0.20 (0.14-0.28)	100	14.4

表-3 汚濁物質の平均除去率 (%)

種別	BOD	SS	T-N	T-P
前処理	33.3	36.7	13.6	7.6
装置1	91.1	81.3	44.8	66.0
装置2	90.5	82.3	41.1	60.5
装置3	92.7	82.8	67.7	58.2

(4) 試料採取および分析

河川水および前処理水、処理水は、試験期間初期は3週間に一度、中後期は1-2ヶ月に一度の頻度で、晴れまたは曇りの日に、図-2に示す①-③の位置で採水し、pH、DO、BOD、SS、透視度、水温の測定を行った。2000年12月と2001年3、6、11月に5回、今回除去対象とはしていないが全窒素(T-N)と全リン(T-P)の測定も行った。また、2001年5月と11月に終日あるいは25時間の連続調査を行った。前処理水については、③と⑤より採取した処理水の分析結果の平均値を結果として示し、考察に用いた。

3. 結果と考察

(1) 多段土壌層法による河川水浄化

a) 河川水および処理水の水質

実証試験期間中の河川水および前処理水、処理水の各分析項目の平均値と変動の範囲を表-2に、また各処理装置のBOD、SS、T-N、T-Pの除去率の平均値を表-3に示す。pHは河川水および前処理水、処理水いずれもほぼ中性付近であり、また年間を通して大きな変動は見られなかった。DOは冬期において前処理後の段階で 1mg/l を下回ることがあり、平均値でも前処理水は河川水より値は低かったが、多段土壌層装置処理後は散気の効果もあり実証期間中ほぼ $5-9\text{mg/l}$ の範囲であり、装置内は好氣的に保たれていた。BO

Dについて、実証試験期間中、13-15時頃の河川水の平均BODは 30mg/l 程度であったが、後述するように季節あるいは1日の中での河川水のBODの変動は大きかった(図-4, 5, 6)。河川水のBODは、前処理により平均値で33%除去され、そしていずれの多段土壌層装置でも90%以上除去され、比較検討した3装置いずれも処理水質は平均値で目標値である 5mg/l 以下の $1.9-2.6\text{mg/l}$ であった。河川水のSS濃度はBODに比べるとやや低く平均値で 22.7mg/l であり、前処理により平均37%除去され、多段土壌層装置により平均80%程度除去された。T-N、T-Pについて、今回処理対象としておらずBOD除去を目的として連続散気を行った運転条件であったが、河川水の平均濃度T-N 3.4mg/l 、T-P 0.64mg/l に対してそれぞれ41-68%、58-66%の除去率を示した。装置3におけるT-Nの高い除去率はゼオライトによるアンモニアの吸着が寄与していると考えられた。今回の装置運転条件の場合、連続的な散気により、DOの結果に示されたように装置内部がかなり好氣的になっており脱窒が進みにくい条件であったと考えられる。従って、多段土壌層法による家庭排水処理で試みられているように、散気量・時間の制御によりT-N除去の効率を河川浄化においても比較的容易に向上させることができると考えられた³⁻¹⁰⁾。T-Pに関しても、処理土壌層に鉄粒を重量比で10%程度混合することにより、除去率を高められることが過去の研究により示されている。透視度は表-2のように、多段土壌層装置処理後平均で100cmあるいはそれ以上の値を示した。

b) 河川水のBODの変動と処理能

図-4, 5にBODの時間変動を、図-6に実証試験期間中の季節変動を示す。5月と11月いずれの時期にも、昼過ぎの時間帯にBODが最大となっており、5月の調査時には 105mg/l にも達した。また、図-4の18:00頃にもピークが認められ、逆に5月11日とも深夜から早朝で濃度が下がっており、その濃度の差は5-10倍にも達していた。これらのBODの時間変動は、人の生活パターンと一致しており、河川流域の民家等からの

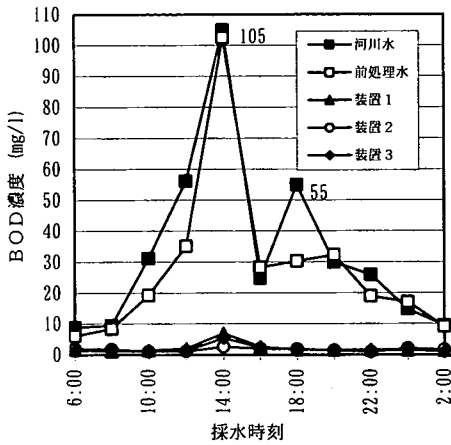


図-4 BODの時間変動
(2001年5月)

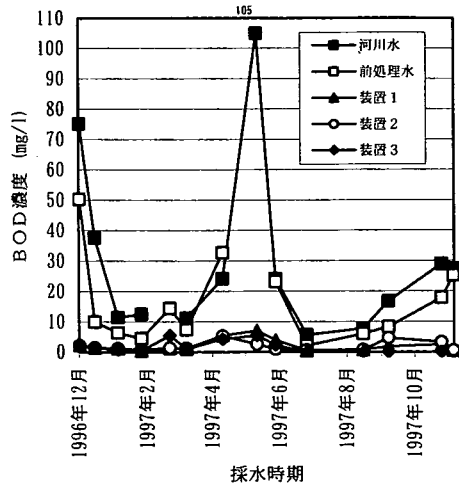


図-6 BODの季節変動

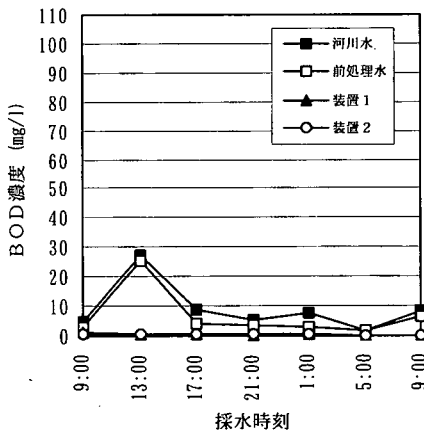


図-5 BODの時間変動
(2001年11月)

生活雑排水の流入が河川水の水質に直接影響を及ぼしていることが分かる。この時間変動に対して、前処理は単純な接触ろ過であるためその影響が直接現れたが、多段土壌層装置の処理水質はいずれの装置でも安定しており、5月のBOD105mg/lの負荷に対しても処理水のBODは3-6mg/lであった。

時間変動と同様、季節によっても河川水のBODは大きく変化していた。試験期間中最大で105mg/lが記録され、このような高濃度のBODは平成8年から10年における調査時にも度々観測されている。図-6で

6-9月頃は灌漑時期における農業用水の流入によりBODが低くなっていたが、過去の調査で濃度が高かった冬期1-3月において濃度が低いのは、採水日前の降雨による河川水の増加による濃度の希釈や川底の洗い流しによる影響と考えられた。このBODの季節変動に対しても時間変動と同様、多段土壌層装置においてはその影響は非常に小さく、目標処理水質である5mg/lを上回することはほとんど無く、河川水のBODの変動に対してのみでなく、気温(水温)などの環境変動に対しても安定であることが示された。

今回調査対象としていなかったが、最終採水時に他の分析項目と同時にCOD_{Cr}(ニクロム酸カリウム法)の分析を行った結果、2001年11月12日14:00の濃度はBOD27mg/lに対してCOD47mg/lであった。時間変動は図-4のBODと同様であり、多段土壌層装置によるCOD_{Cr}除去率は装置1, 2とも89%に達し、装置の使用1年経過後においてもBODだけでなくCOD_{Cr}も効果的に除去できていた。本報では詳しくは述べないが、内分泌攪乱化学物質の一種である女性用ホルモン活性も本多段土壌層法により、通常の下処理場の処理水の1/10のレベルまで低下させることができたのは^{10,11)}、本法のBOD, COD_{Cr}処理に示される高度処理性能のためであると考えられる。

c) 通水層資材の比較と処理能

装置1と2には軽石のみを、装置3には軽石とゼオライトを1:1で混合して用いたが、表-2, 3の結果が示すように、今回の処理対象であるBOD処理能について平均値はやや軽石の方が高く、BOD除去を主目的とした本装置の場合、軽石で充分であることが示された。

ゼオライトの効果としては先にも述べたように、アンモニア吸着によるT-Nの除去能の向上がある。家庭排水処理やトイレ排水処理を目的とした多段土壌層装置は、窒素除去の向上を目的に、窒素の装置内での滞留時間を長くし、通水層資材としてゼオライトを使用している³⁾⁻¹⁰⁾。河川の直接浄化だけでなく窒素汚染水の高速処理を目的とする場合は、ゼオライトは有効な資材であると思われる。

d) 河川水負荷量と処理能

装置1と2はほぼ1年間、装置3は6ヶ月、負荷量 $4\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ を維持したが、目詰まりを起こすことなく上述の処理能を安定して維持できた。欧米諸国で一般的に行われている、通常のセプティックタンクー土壤トレンチ法による家庭排水処理では通常の負荷量は $25\text{--}50\text{l}/\text{m}^2/\text{日}$ 程度であり^{12), 13)}、今回の $4\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ 負荷はその80-160倍にも達する。流入水の滞留時間は、過去の実験より得られてきた $4\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ 負荷時の装置内の全水分含量を日負荷量で割ることによって計算でき、3.2時間程度と推定されている。そして、表-1の前処理水の平均BOD $16\text{mg}/\text{l}$ 、家庭排水の平均BOD $200\text{mg}/\text{l}$ としてそれぞれの装置のBODの負荷量を推定すると、今回の多段土壌層装置へのBOD負荷量は $64\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ 、土壤トレンチへは $5\text{--}10\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$ となり、これらの値を比較すると多段土壌層装置において水量のみならずBOD等の汚濁成分の高速処理が行われたことがわかる。

また、10分間隔の間欠送水のため散水中は $8\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ 、あるいは装置1の試験中後期では1日18時間の運転であったため最大 $5.3\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ に相当する水量負荷がかかっていたと考えられる。しかし、2001年3月中旬より装置間で設定された運転時間の違いに基づく散水時の瞬間的な負荷量の違いによる処理能への影響の差はいずれの分析項目の結果にも明確には現れなかった(図-6)。

多段土壌層装置の飽和透水係数は、過去に粒径1-3mmのゼオライトを通水層に用いた 1m^3 の装置を用いた実測値約 $0.1\text{cm}/\text{秒}$ より大きく3-5mmのゼオライトの飽和透水係数 $0.8\text{cm}/\text{秒}$ より小さいと考えられる。この飽和透水係数より、飽和浸透による水負荷量は $86\text{--}690\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ と推定される。しかし、実際の汚水を負荷する場合には、飽和浸透による負荷は不可能であり、欧米の土壤トレンチ法では、不飽和浸透を確保し目詰まりを抑制しながら処理を行うために、汚水負荷量を飽和浸透係数の7-15%としている^{12), 13)}。多段土壌層装置の飽和透水係数にこの基準の安全側の値である7%を適応すると、 $6\text{--}48\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ となる。従って、今回の多段土壌層装置において $4\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ というのは安全側によった負荷量である。また、間欠散水運転に伴う実負荷量 $5.3\text{--}8\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ も、欧米の土壤トレンチの基準から考え

ると、許容範囲内であると考えられる。

(2) 多段土壌層装置による汚濁物質除去機構

上述の多段土壌層装置による汚濁物質除去について、和田、三浦¹⁴⁾が行った透過性石積み堤浄化システムによる汚濁物質除去過程のモデル化と同様の方法で考察を行った。

a) 物理的ろ過による汚濁物質除去

装置内部を流下する際の物理的ろ過による汚濁物質除去は、懸濁性物質に作用すると考えられる。物理的ろ過による汚濁物質除去量 L_t を式で表すと次式のようになる。

$$L_t = k_1 \cdot L_0 \quad (1)$$

ここで、 L_t は装置による汚濁物質除去量、 L_0 は装置に負荷される汚濁物質質量、 k_1 は物理的ろ過による汚濁物質除去係数であり除去率にあたる。懸濁性物質はSS量によって表されるので、表-1に示される前処理水と処理水の平均値を用いて計算すると、多段土壌層装置の k_1 は0.81となる。SS以外の物質は、懸濁性のものだけが物理的ろ過作用を受けると考えた。結果は本論文に示していないが2001年11月に行った通日調査の際に、オルトリン酸、硝酸、亜硝酸、アンモニアも分析しておりこれらを溶解性T-N、溶解性T-Pとして、懸濁性と溶解性成分の比を次のように設定した。また、BODについては、主要な供給源である家庭排水中のBODと溶解性BODの値を用いた¹⁵⁾。

T-N 懸濁性：溶解性=1：1.8

T-P 懸濁性：溶解性=1：0.8

BOD 懸濁性：溶解性=1：0.4

そして、装置に負荷される汚濁物質質量は、

$$L_0 = L_p + L_D \quad (2)$$

と表され、 L_p は懸濁性、 L_D は溶解性の汚濁物質質量を表す。溶解性物質の分解・吸着・吸収・脱窒等の生物物理化学的な反応による汚濁物質除去係数を k_2 とすると、汚濁物質除去量は次式で表すことができる。

$$L_t = k_1 \cdot L_p + k_2 \cdot L_D \quad (3)$$

表-1の前処理水の値と処理水の平均値(T-N, T-Pに関しては通水層資材にゼオライトを用いた装置3の値は省く)を用いて各汚濁物質の除去係数を計算した。

溶解性T-N $k_2 = 0$

溶解性T-P $k_2 = 0.31$

溶解性BOD $k_2 = 0.99$

以上のように、溶解性T-Nでは0となり負荷分がそのまま処理水へ流出していること、溶解性T-Pは30%、溶解性BODはほぼ100%除去されていることがわかる。しかし、これは見かけ上の除去係数であり、実際には物理的ろ過により除去された懸濁性物質から、その分解あるいは成分の溶出に伴って溶解性物質が放出され、生物物理化学的に除去あるいは装置外へ流出している。実際の k_3 を求めるためには懸濁物質分解による各溶解性物質の放出速度を調べる必要があるが、懸濁物質が捕捉される量と分解によって消失する量が平衡に達していると仮定した場合、実際の生物物理化学的な反応による汚濁物質除去係数： k_3 を用いて汚濁物質除去量は次のように表される。

$$L_t = k_3 \cdot (k_1 \cdot L_p + L_p) \quad (4)$$

本研究と比較するとBODとして1/4の負荷であるが、過去に人工排水を用いて行った基礎実験の結果では、2年間の装置使用後の内部の炭素含量について、ゼオライト、軽石、マサ土等の処理開始前の炭素含量が0.5%以下の資材の場合は最大1%程度まで炭素含量が増加するが、黒ボク土のような炭素含量が5-10%程度の資材は最大2%程度の炭素含量が減少した⁴⁾。この結果より1年間の連続運転の大部分の期間では、懸濁性物質の負荷と分解が平衡に達しているという仮定は妥当であると考え、各汚濁物質の k_3 を求めた。

T-N $k_3 = 0.31$
 T-P $k_3 = 0.66$
 BOD $k_3 = 0.99$

この結果より、BODに関しては木炭や土壌への捕捉そして生物分解が非常に高い効率で起こっていると考えられる。T-Pについても比較的 k_3 は高く、軽石や土壌への物理化学的吸着の効率が高いと言える。しかし、軽石へのリン酸吸着はいずれ飽和に達しT-Pの k_3 は、装置の使用とともに低くなると考えられる。T-Nについては、 k_3 は最も低く、溶存性T-Nの除去機構としては脱窒以外には生物による取り込み、土壌へのアンモニアの吸着が考えられるが、生物の死滅による再放出や飽和のために寄与率は低いと考えられ、 k_3 の内容としては脱窒効率であると考えられる⁴⁾。

多段土壌層法における汚濁物質の除去機構のモデルについては既報に詳述しているが⁷⁻⁹⁾、本研究で得られた除去係数などの結果は図-7のようにまとめられる。

(3) 目詰まりに関する考察

今回の実証試験期間中には目詰まりは発生しなかったが、長期的に装置を使用するため、装置内へのSSの蓄積による目詰まりについて考察を行った。

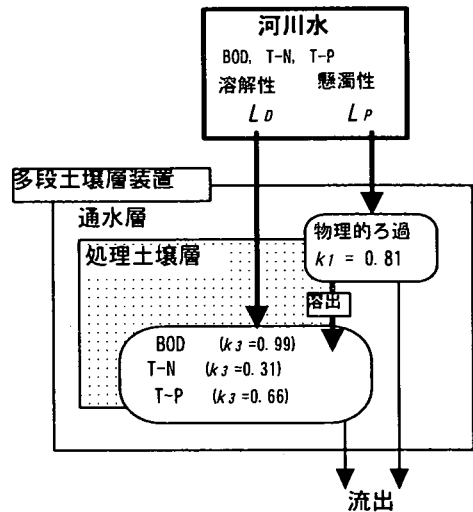


図-7 汚濁物質除去係数

a) 河川増水による突発的な土砂の流入・堆積

河川浄化において浄化装置を高水敷や低水路に設置した場合、増水時の突発的な土砂の堆積により浄化装置が使用不能になるケースが考えられる。今回の実証試験期間中2001年6月から7月に4度、遠賀川の増水により装置を設置した高水敷が冠水した。冠水時の装置上部からの水位は0.8-3.0mであった。このうち3度は前処理水で多段土壌層装置を満たした後運転を停止したが、4度目は増水時は上記対応が間に合わず通常通りに運転を続けた。2001年の試験終了後、多段土壌層装置を解体し内部断面の観察調査を行った結果では、増水の影響と見られるSSの堆積は確認されず、多段土壌層装置内部への濁流水の侵入はなかったと考えられた。増水時に、前処理水で多段土壌層装置を灌水する方法は、濁流水の侵入を防止する方法として有効な手段であった。

b) 無機SSの蓄積と多段土壌層装置の耐用年数

河川浄化を行うために最も注意しなければならないのが、河川水に含まれる粘土や砂といった無機SSの蓄積による孔隙の閉塞である。有機性SS蓄積や生物膜の肥厚化等によっても目詰まりは起こるが、これは有機物を分解すれば解消される可逆的な目詰まりであり、装置の2-3ヶ月の休止および今回行っている散気により装置内に蓄積した有機性SSが分解され目詰まりが解消されることが過去に実証されている⁶⁾。このことより、有機性SS蓄積による目詰まりへの対策として、多量に農業用水が河川に流入する比較的水質の良好な農業灌漑時期に年間3ヶ月装置を休止をする、あるいは装置面積を25%程度増やす事により装置の一部

25%分を順番に休止させる事ができこれにより年間3ヶ月の休止期間を設ける等の運転管理が有効であると考えられる。無機SSによる目詰まりは、それが分解消失しないことから、洗浄等の処置が必要であるが、河川浄化施設のような大規模なものの場合それは非現実的であり、目詰まりの解消は不可能となる。

ここで、本実証試験条件における多段土壌装置への無機SSの蓄積および不可逆的な目詰まりの発生時期を考察してみる。負荷量 $4\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ 、河川水の平均SS濃度 $22.7\text{mg}/\text{l}$ (表-2)、多段土壌層装置での平均SS除去率44%、その内無機SSの割合30% (2001年6月分析) とすると、

- ・多段土壌層装置への無機SS蓄積量 = $12\text{g}/\text{m}^2/\text{日}$
- 多段土壌装置の深さが1.4mあるので体積当たり、
- ・多段土壌層装置への無機SS蓄積量 = $8.6\text{g}/\text{m}^3/\text{日}$ となる。

この無機SS蓄積量の内、装置の透水性を規定している通水層におけるSSの蓄積が不可逆的な目詰まりの原因となる。通水層と処理土壌層におけるSSの捕捉比は、それぞれの体積比と比表面積の比によると考えられる。通水層と処理土壌層の体積比は3:2である。通水層の比表面積は、軽石を平均粒径4mmの球形と仮定すると約 $10^2\text{m}^2/\text{m}^3$ となるが、表面の細孔構造を考慮するとSS捕捉に寄与する表面積は拡大すると考えられる。このことを考慮し、さらに通水層へのSSの集積割合を大きめに設定し耐用年数を安全側に評価するために、つまり耐用年数を短めに評価するために通水層の比表面積を $10^4\text{m}^2/\text{m}^3$ と仮定する。土壌の比表面積は $10^5\text{--}10^8\text{m}^2/\text{m}^3$ と程度とされるが¹⁰⁾、今回用いた土壌ではマサ土を混合したこともあり砂分が70%を占めており比表面積を $10^6\text{m}^2/\text{m}^3$ と仮定する。これらのことから、比表面積比を1:10に設定すると、

- ・SS補足率の比は通水層:処理土壌層 = $0.13:0.87$
- 多段土壌層装置 1m^3 当たりの一年間の無機SS蓄積量は、
- ・通水層への無機SS蓄積量 = $408\text{g}/\text{m}^3/\text{年}$
- ・処理土壌層への無機SS蓄積量 = $2731\text{g}/\text{m}^3/\text{年}$

そして、通水層への無機SS蓄積による目詰まりまでの耐用年数を計算するために、本実証試験より前に行われた基礎実験により得られた目詰まり時の多段土壌層装置 1m^3 当たりの内通水層へのSSの蓄積量 $30\text{--}120\text{kg}/\text{m}^3$ を適応すると、

- ・目詰まりまでの耐用年数 = $73.5 - 294$ 年

以上の計算では、装置内へ均等にSSが分布蓄積することを仮定しているが、実際には、河川水は上部から散水されSSの蓄積は装置上部の処理土壌層1-2層目までで主に起こる。このことを考慮し、装置上部2層目深さ約40cmへの集中的な無機SS蓄積を仮定する

と、

- ・装置上部のみへの無機SS蓄積による

目詰まりまでの耐用年数 = $21\text{--}84$ 年となる。簡単なシミュレートの結果ではあるが、現状の浄化条件で20年以上の耐用年数が示される。本研究に使用した多段土壌層装置の通水層および処理土壌層資材のサンプリングを行っており、その分析によってより正確なSS蓄積による目詰まりへの影響および耐用年数が解析が行えると考えている。

また、今回の多段土壌層装置には、有機SS蓄積による目詰まり対策として、図-3に示すように散水管を2組設置しており、上部での有機SS蓄積により目詰まりが進行した場合、下部の散水管に切り替えることにより、上部での有機SSの分解および装置下部への有機SSの誘導により、装置上部への局所的なSS蓄積を避けるシステムを導入しており、突発的な目詰まりに備えた。

4. 結言

本研究では、汚濁河川水の直接浄化への多段土壌層法適応について1年間の実証試験を通して検討を行った。水質調査の結果、通水層に軽石を用いた装置において、河川水の平均BOD $30\text{mg}/\text{l}$ を、 $4\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ の負荷量で処理して平均で $2\text{mg}/\text{l}$ 程度まで減少させることができ、修景用水あるいは親水用水として利用できる処理水質を得ることができた。

多段土壌層装置の汚濁物質除去機構について、懸濁物質の物理的ろ過による汚濁物質除去係数 (1.0 が除去率100%に相当) は、SSの除去率より、0.81と求められた。また、装置内での溶解性物質の生物物理化学的な除去係数はBOD、T-P、T-Nそれぞれについて、0.99、0.66、0.31と求められた。

多段土壌層装置内への河川水の無機SSの蓄積による目詰まりまでの耐用年数を推定した。装置内で上記物理的ろ過によりトラップされた無機SSが装置上部40cmに集中的に蓄積すると仮定して、耐用年数は20年以上と推定された。

本報告によって、多段土壌層法のBOD $30\text{mg}/\text{l}$ 程度の河川への適応の可能性が示された。実証試験期間中に河川水中BODが $100\text{mg}/\text{l}$ に達した時期も本装置が安定して処理できていたことより、熊添川よりも平均BODが高い河川への適応も可能であると考えられる。限界値の解明が今後の課題である。

また、今回の実証試験で行った負荷量 $4\text{m}^3/\text{m}^2/\text{日}$ は土壌式浄化法としては高速であるものの、河川に適応する場合には広い施設用地が必要となる。熊添川のケー

スでは、処理対象期間の平均流量 7,000m³/日に対し 3,500m²程度の施設用地を必要とするが、熊添川と遠賀川の合流地点の河川数は広く十分対応できる。しかし、他の十分な河川数を持たない河川への適応を考えた場合、より高速処理を行い施設面積を縮小することが重要となる。

また、費用面では、高速処理を得て多段土壌層法の経済性が向上した。7,000m³/日規模の多段土壌層法による処理施設（軽石タイプ）は処理水量 1 m³/日当り 8.7 万円となるが、他の河川浄化法で同等の BOD 負荷削減量を達成するには、曝気付礫間接触酸化法による処理施設の場合で 1m³/日当り 11.0 万円と試算された。

今回の実証試験期間中、送水量調整器具の不具合が原因で、装置への水量負荷が一時的（2001 年 9 月 4 日 - 9 月 14 日）に 5.9m³/m²/日に達していた。短期間ではあるが 5.9m³/m²/日の負荷量にも対応できたことから（原水 BOD 16.8mg/l, 処理水 BOD 1.8mg/l）、さらなる高速処理の可能性が期待できる。

参考文献

- 1) 環境庁：環境白書（総説），pp. 244-252, 2000.
- 2) 鈴木繁：水質保全の現状と今後の課題，環境技術，Vol. 23, pp. 8-13, 1994.
- 3) 若月利之，小村修一，安部裕治，泉一成：多段土壌層法による生活排水中の窒素，リンおよび BOD 成分の除去とその浄化能の評価，日本土壌肥科学会誌，Vol. 60, No. 4, pp. 335-344, 1989.
- 4) 若月利之，小村修一，安部裕治，泉一成，松井佳久：浄化装置充填土壌資材の浄化機能と耐用年数，日本土壌肥科学会誌，Vol. 61, No. 1, pp. 74-84, 1990.
- 5) 若月利之，小村修一，沢田吉晴：非湛水下における硝酸態窒素とリン酸の同時除去に対する金属鉄粒とジュート資材の効果，日本土壌肥科学会誌，Vol. 62, No. 4, pp. 417-423, 1991.
- 6) Wakatsuki, T., Esumi, H. and Omura, S. : High performance and N & P - removable on-site domestic waste water

treatment system by Multi-Soil-Layering method, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 27, No. 1, pp. 31-40, 1993.

- 7) Wakatsuki, T., Luanmanee, S., Masunaga, T. and Attanandana, T. : High grade on-site treatment of domestic wastewater and polluted river water by Multi-Soil-Layering method. *Ecological Engineering* Elsevier, (in press)
- 8) Luanmanee, S., Attanandana, T., Saitthiti, B., Panichajakul, C. and Wakatsuki, T. : Efficiency of the Multi-Soil-Layering system with various organic matter components on domestic wastewater treatment. *Ecological Engineering* Elsevier, 2001. (in press)
- 9) 若月利之，森純一，増永二之，工藤鴻基：多段土壌層法による土壌生態系を用いた水質浄化工法，環境技術，Vol. 28, No. 11, pp. 806-813, 1999.
- 10) 増永二之，佐藤邦明，青山智恵，藤井俊逸，善波孝人，野辺一寛，若月利之：多段土壌層法による環境水質改善技術の開発-汚濁河川水の直接浄化-，用水と廃水，Vol. 43, No. 12, pp. 1033-1040, 2001.
- 11) 青山知恵，増永二之，若月利之：多段土壌層法による高度下水処理の今後の可能性-17β-Estradiol について-，第 34 回日本水環境学会年会講演要旨集，pp. 407, 2001.
- 12) Perkins, R. J. : *Onsite Wastewater Disposal*, Lewins Pub., pp. 251, 1989.
- 13) Sherwood, C., Reed, Ronald, W., Crites, E., Joe, Middlebrooks : *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, 2nd edition, McGraw-Hill, Inc., New York, pp. 433, 1995.
- 14) 和田安彦，三浦浩之：透過性石積み堤水質浄化システムの水質浄化特性と浄化効果の研究，土木学会論文集，No. 566, VII-3, pp. 1-12, 1997.
- 15) 稲森修平：生活排水対策，産業用水調査会，pp. 379, 2001.

(2002. 3. 5 受付)

STUDY ON DIRECT TREATMENT OF RIVER BY MULTI-SOIL-LAYERING METHOD OF WATER PURIFICATION AND ITS CHARACTERISTICS OF WATER PURIFICATION

Syuuji UNNO, Toshiyuki WAKATSUKI, Tsugiyuki MASUNAGA, Katsumi IYOTA

In this study, in order to apply Multi-Soil-Layering (MSL) method to direct treatment of river, a demonstration experiment of the treatment of *Kumazoe* river and the ability of water treatment of MSL system was examined for 1 year from December 2000. The MSL method could treat BOD of 6 to 105 mg/l (30mg/l in average) in river water up to 2 mg/l in average stably throughout year under the condition with high hydraulic loading rate of 4m³/m²/day. Coefficients for removal of pollutants in river water by MSL system were also determined. Durable years of MSL system until the system cause clogging by the accumulation of mineral SS in river water into the system was estimated more than 20 years.