

途上国で利用可能な 低エネルギー消費型の水質浄化法

生地 正人

KIJI Masato

株式会社四電技術コンサルタント
環境部 副部長



はじめに

当社ではダム貯水池の水質改善を目的とした技術開発を行っている。この対策には貯水池内と上流域があり、前者では浮上式フェンス法（水塊分離膜法）を開発し、既に各地のダム貯水池に設置されている。後者のダム上流域においては、未処理で放流されている台所排水や小規模事業場排水の浄化がある。

この開発目標は「①広く普及するための低コストでコンパクトな装置」と「②水質浄化能力は有機性汚濁物質(BOD等)のほかに富栄養化対策から総窒素(T-N)、総リン(T-P)の同時浄化が可能」という欲張ったものであった。

この対策に傾斜土槽法と名付けて技術開発を行い、技術的な開発目標は達成した。まだダム上流域での普及には至っていないが、開発途上国での上下水処理等への予想外の展開が始まっている。

本法は、「水の浄化とは何か」を考える上で示唆に富むものと思われるので紹介する。

傾斜土槽法

ダム貯水池から上流の集落を眺めていた時、排水の発生場所から水域に至る落差のエネルギーを水

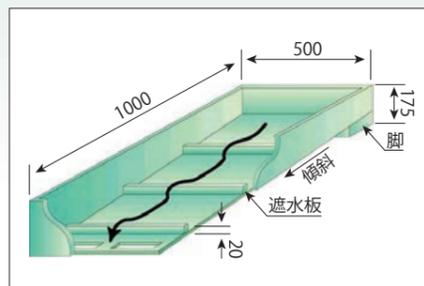


図1 傾斜土槽

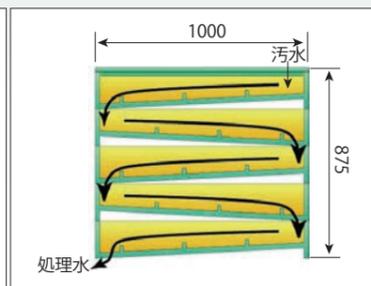


図2 多段積み重ね運用

質浄化に利用する発想を得た。また、土壌の表層には生物が多く、自然界で最も自浄作用が強い場所と考えられることから、この表層土壌を切り取って水質浄化に応用する方式を検討した。

底面に傾斜をつけた薄層構造体に、鹿沼土やスポンジ等を充填したものを傾斜土槽(図1)と呼び、これを用いた水質浄化法を傾斜土槽法と名付けた。図2のように、傾斜土槽を左右交互に積み重ねることで、コンパクトな装置となる。また、排水の発生点と排水先の落差が利用できれば、無動力で水質浄化が可能になる。

排水浄化事例：台所排水

傾斜土槽の3段積みで、一般家庭(4人家族)の台所排水を浄化した(写真1)。計画では5段積みであったが、落差の制約から3段となった。台



写真1 台所排水の無動力浄化

所排水は流し台の底部から配管で屋外に出し、流し台から地面(下水管)までの落差を利用して、無動力での浄化を行った。

浄化は2001年7月に開始し、毎月の水質調査を4年4ヶ月間継続した。この期間の総処理水量は143.6m³、日平均処理水量は92Lであり、期間中の担体(鹿沼土)交換等の維持管理は一切行っていない。

水質の浄化結果を平均値(原水濃度mg/L、処理水濃度mg/L、除去率)で示すと、SS:153, 34.0, 74%、BOD:819, 85.6, 83%、COD:542,

51.2, 80%、T-N:30.6, 5.4, 73%、T-P:5.88, 0.70, 81%であった¹⁾。

この結果から本法による有機性排水浄化では、有機性汚濁物質(BOD等)と栄養塩類(T-N、T-P)が同時に浄化され、浄化効果は長期に継続することがわかった。当初計画の5段使用なら、さらに除去率が高かったと予想された。

2015年5月に14年間使用した担体の鹿沼土を、全量の1/4を残して残りをスポンジとした。この作業は浄化機構にダメージとなり、翌日から処理水には濁りと泡立ちが発生した。これで洗剤の界面活性剤も浄化されていたことが判明した。この濁りと泡成ちは、2週間程度で無くなり、浄化活性の回復を実感できた。

排水の浄化機構：滞留時間

従来の活性汚泥法等の水中の生物学的浄化では、原水が装置に流入してから流出するまでの時間となる滞留時間(HRT)が浄化に重要である。標準の活性汚泥法の滞留時間は6~8時間である。

傾斜土槽を9段積みとし、醤油製造工場の排水浄化を行った。この実験のBOD除去率と滞留時間の変化を図3に示す。D-BODは溶解性のBODを意味する。本法では30分程度の滞留時間で浄化可能であった。生物学的浄化の装置の容量は滞留時間で決定され、本法はコンパクトな水質浄化装置となることわかる。

本法のBOD浄化機構は、まず物理的なる過と生物学的吸着作用により汚濁物質が水と分離除去され、槽内に捕捉された汚濁物質は時間をかけて本来の浄化(有機物分解)が進む。30分程度の滞留時間で浄化されるのは、主に汚濁物質の水からの分離除去である²⁾。

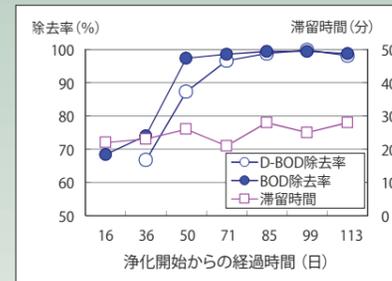


図3 滞留時間とBOD除去率

排水の浄化機構：面積負荷量

本法は大気からの自然の酸素供給に依存しており、滞留時間の他に表面積が律速条件になると考えられた。

生活雑排水を想定した人工排水を用いた浄化実験を行い、水量面積負荷量とBOD除去率との相関式を求めた。これを図4の凡例の赤丸と線形で示す。本法による様々な種類の排水浄化を行った。排水の種類によって、生活雑排水よりも浄化が容易な排水(線形の右側)と、浄化が困難な排水(線形の左側)があることがわかる。

図4のX軸を水量面積負荷量から対数表示のBOD面積負荷量としたものを図5に示す。図4の生活雑排水相当の相関式と合致しない排水も、それぞれのBOD面積負荷量と除去率には相関があることがわかる³⁾。

図4で特異的に浄化容易な排水は、高濃度の油脂類(n-HEX、平均78,000mg/L)と懸濁物質(SS、13,000mg/L)を含むドレッシング工場排水であった。水温は流入水よりも処理水が最大で3.7℃高かった。これは内部の微生物反応による発熱であり、水中の浄化ではみられない現象であった。

開発途上国の排水処理

開発途上国において電気は貴重

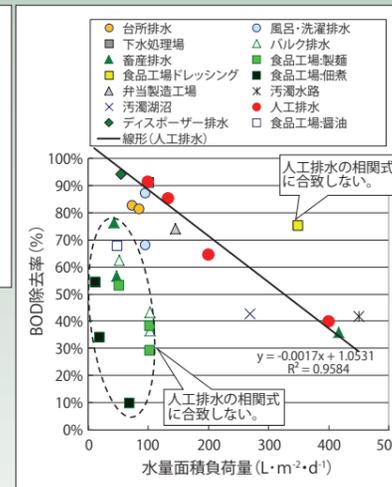


図4 水量面積負荷量とBOD除去率

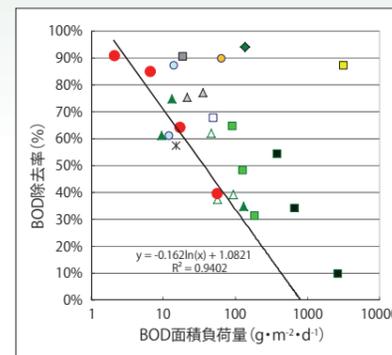


図5 BOD面積負荷量とBOD除去率 (凡例は図4と同じ)

で、排水処理分野の電力使用の順位は低い。ネパールの首都カトマンズでは活性汚泥法の下水処理場が4ヶ所建設されたが、電力不足で十分に機能せず、3ヶ所は廃止(埋立て処分)され、残った処理場では無曝気での放流も行われている。

カトマンズの下水処理場で低電力消費型の下水処理技術として、傾斜土槽法による下水処理のデモンストレーションを行った⁴⁾(写真2)。

図6にCODcrの浄化結果を示す(BODは測定困難。電力不足で5日間の恒温維持が困難)。冬季の浄化開始となったことで、当初の除去率は低かったが、春季から除去率は上昇し、最終的には約90%に達した。現地の処理場の職員からも、非



写真2 ネパールの傾斜土槽



写真3 無動力での下水処理

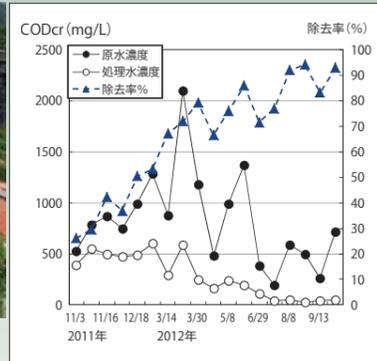


図6 下水処理結果 (CODcr)

常にきれいな処理水だと称賛された (写真3)。

浄水処理:濁度等

生物学的な浄水処理技術としては緩速ろ過法がある。これは原水を鉛直方向に、砂利や砂のろ過層に流下させ、層内に生息する微生物で原水の汚濁物質を浄化させる方法である。この方式は原水が比較的清浄な場合は有効であるが、水質汚濁が進みBODが増加すると、ろ過層内部が酸素欠乏になり浄化不能となる。経済発展の著しい途上国等では、上水源となる河川等の水質が悪化しており、緩速ろ過法の有効性が危惧されている。

傾斜土槽法は緩速ろ過法と同じ生物学的な浄化機構であるが、排水処理の実績から明らかなように、緩速ろ過法より浄化能力が高い。これは薄層構造等による酸素の供給能力が高いためである。

スリランカにおいて平均BODが37mg/Lの原水について、緩速ろ過法の前処理として傾斜土槽法で浄

水処理を行った。処理の流れは、原水→傾斜土槽①→傾斜土槽②→緩速ろ過→最終処理水である。傾斜土槽の仕様と日処理水量を表1の注に示す⁵⁾。

濁度は本法でもよく除去されている。上記試験では緩速ろ過法の前処理であったが、現在は本法のみで浄水処理がされている。この原水と処理水を写真4に示す。原水は、グッピーが泳ぐ白濁した水であったが、処理水は透明感のある美味しい水ができていた (写真5)。

浄水処理:重金属類

ヒ素による上水源の汚染は世界各地で報告されており、特にバングラディッシュは汚染井戸の暴露人口が多い。日本の上水基準0.01mg/L (WHOも同じ) を超える井戸水の暴露人口は4,900万人、バングラディッシュの上水基準0.05mg/L超過の暴露人口は2,900万人と推計されている⁶⁾。ヒ素の多い井戸水には鉄やマンガン等も多く、これらも基準値を超えている場合が多い。

バングラディッシュで日本のNGO等により、傾斜土槽法によるヒ素を含む重金属除去の実証試験が行われた⁷⁾。本法は、装置面では現地で調達可能な材料で住民が製造可能な点、運用面では住民による維持管理と修理が可能な点が評価された。

写真6に現地での傾斜土槽の製作状況 (躯体は魚運搬用の発泡スチロール容器で担体はスポンジ)、写真7に維持管理 (定期的なスポンジの洗浄) を示す。

浄水試験を行った原水 (井戸水) の約1年間の平均濃度はヒ素0.19mg/L、鉄5.0mg/L、マンガン0.66mg/Lであった。鉄とマンガンの日本の上水基準は、それぞれ0.3mg/L、0.05mg/Lである。除去率は浄化を続けると上昇し、ヒ素は70%前後、鉄とマンガンはほぼ100%になった。無味無臭なヒ素は短期間での除去効果は実感できないが、鉄とマンガンの除去効果により、村では「初めて白いご飯が炊けた」と喜ばれている。

ヒ素は酸化的環境下ではオキシ水酸化鉄(FeOOH)に安定して吸着しており、水に溶出することはない。これが嫌気的環境になると、鉄とヒ素は還元され溶解性となり水中に溶出する。

バングラディッシュは大河川の沖積



写真4 スリランカの傾斜土槽



写真5 原水と処理水



写真7 スポンジ担体の定期洗浄

平野の国である。同国のヒ素汚染は、上流のヒマラヤ山岳地帯で鉄と吸着して存在していたヒ素が、洪水等で流されて平野部の地層に含まれ、地下水が嫌気的環境となることで発生したと考えられている。

本法によるヒ素の除去機構は、バングラディッシュの汚染機構の逆方向の酸化的浄化機構によるものである。井戸水を酸化的環境下に曝すことでオキシ水酸化鉄が生成し、ヒ素は鉄酸化物と吸着して水から除去される。鉄の酸化には鉄バクテリアの関与も考えられる。

途上国の水質浄化技術

「水の浄化とは何か」を考えると、通常H₂Oの水分子自体に浄化の必要はなく、水中で水分子と混在している汚濁物質を分離することで浄化は成立する。この分離では膜処理技術が卓越しており、どのような汚水からでも飲み水を作ることが可能である。

しかしながら、このような高エネルギー消費型の高度技術は、活性汚泥法の下水処理場が廃止されたネパールの状況を見ても、途上国での一般的な運用は無理だと思われる。また、水と分離後の汚濁物質は、どのように処分するのかという問題もある。

活性汚泥法による有機性排水の浄化では、含水率の高い汚泥が大

量に発生する。本法では含水率の低い土壌が生成し、台所排水浄化での生成土壌には肥料成分のリンが0.8% (dry) 含まれていた⁸⁾。

日本の下水処理場では、汚泥の大部分は焼却や埋立て処分される。途上国では、排水中のリン等の肥料成分の農地利用が可能な排水浄化システムが望ましく、本法は有効であると考えられる。

おわりに

国内のダム上流域の排水対策として考案した傾斜土槽法は、ネパールの無動力での下水処理やバングラディッシュの重金属で汚染された井戸水の浄水処理等へ、予想外に展開し始めている。

本法の水質浄化は底面が傾斜した薄層構造体の横方向に、原水を自然流下させるというシンプルな方

式である。この浄化効果は、生態系を利用した水質浄化としては最高レベルのものと考えられる。

本法は今後の基本的な水質浄化技術の一つとなり、簡易で低エネルギー消費で浄化できることから、途上国の上下水処理技術として、今後広く普及していくものと期待される。

<参考文献>

- 傾斜土槽法による台所排水の有機性汚濁と栄養塩類の同時浄化、水環境学会誌、2005.5、生地正人、末次鏡
- スポンジ担体を用いた傾斜土槽法による有機性汚濁物質と栄養塩類の同時浄化、水環境学会誌2014.7、生地正人ほか
- 傾斜土槽法を用いた小規模な環境インフラの可能性について、水環境学会シンポジウム要旨集、2015.9、生地正人
- アジア開発途上国における傾斜土槽法 (SSCM) 技術紹介の取り組み、水土の知、2015.1、宮下武士、生地正人
- 有機汚染水 (BOD30mg/L) を飲料水に浄化する生物浄化ユニットの開発、緩速・生物ろ過国際会議、2014.6、丸山和秀、橋口佳史
- 海外におけるヒ素汚染の実態と飲料水対策、水環境学会誌、2014.2、中島淳
- バングラディッシュでのSSCM実証実験について、(独)水資源機構関東技術発表資料、2016、佐々原秀史
- 傾斜土槽法を用いた富栄養化対策、用水と廃水、2005.12、生地正人

表1 スリランカでの浄水結果

試料名	項目	濁度 n.t.u	BOD mg/L	CODMn mg/L	総無機態窒素 mg/L
原水		13.5	37.1	10.0	11.6
処理水	傾斜土槽①	0.1	9.9	5.0	10.3
	傾斜土槽②	0.0	7.1	4.0	3.6
	緩速ろ過	0.0	2.1	2.3	3.6

注) 傾斜土槽①②は各2×10m、担体は①は砂利、②はアンスラサイト、処理水量は8m³・day⁻¹