

浄水汚泥を用いたリン除去技術

海野 修司¹・岡本 正美²・永渕 正夫³

¹正会員 国土交通省関東地方整備局 京浜工事事務所 (〒230-0051 横浜市鶴見区鶴見中央2-18-1)

²正会員 国土交通省九州地方整備局 河川部 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東二丁目10-7)

³正会員 株式会社 日水コン 九州支所 河川事業部 (〒810-0001 福岡市中央区天神一丁目10-24)

ダムや河口堰貯水池における富栄養化現象にともなって生じる利水障害等が、深刻な社会問題となつて久しい。水深が深い貯水池においては、湖水循環による富栄養化現象の抑制が一定の成果を収めてきているが、河口堰貯水池のように水深が浅い貯水池における富栄養化現象に対しては、各水域において様々な対策が試行されている段階であり、栄養塩であるリン負荷の削減は効果的な対策の一つである。筆者らは、浄水場で発生する浄水汚泥をリン除去施設へ適用することで、簡易な設備で安定したリン除去効果が得られることを実験により確認した。リン除去後の浄水汚泥は園芸用土等の再利用用途があることから、本技術は浄水汚泥の有効利用ばかりでなく、地域の資源循環システムを構成するモデルとなるものである。

Key Words : eutrophication, phosphorus, sludge in water treatment plant, aluminium, reuse

1. はじめに

近年、地域住民の河川環境、水環境保全に対する意識の高まりにより、特に、水質、景観といった身近な問題について多様なニーズが増大している。このような状況の中で、ダムや河口堰貯水池といった閉鎖性水域における富栄養化現象にともなって生じる利水障害等が、深刻な社会問題となつて久しい。

九州北部に位置する遠賀川は、流域内人口密度が約650人/km²で、九州直轄河川20水系では第一位である。流域の開発による都市化の進展や生活様式の変化に伴い、主に家庭排水に起因すると思われる水質汚濁が進んでいる。一方、水利用の実態は上流から河口堰まで多岐にわたり利用が繰り返されていることから、水質保全に対する地域のニーズが増大している。このため下水道整備の早期促進が望まれるところであるが、抜本的な水質改善までは長い時間を要する状況にある。

遠賀川下流2kmに位置する遠賀川河口堰の貯水池は、100万都市である北九州市を中心とする周辺市町の水道水源として利用されているが、アオコの発生など富栄養化現象により、取水障害や景観障害等の社会問題を引き起こし、富栄養化対策としての浄化事業の実施も急務となっている。

富栄養化の要因は、水の滞留と豊富な栄養塩濃度にある。栄養塩の由来は、流入河川に由来するものと底泥からの溶出に由来するものがある。底泥からの溶出負荷は、

特にリンにおいては底層が嫌気化したときに増加することから、底層部のDO改善が別途事業で進められている¹⁾。

水深が深い貯水池においては、湖水循環による富栄養化現象の抑制が一定の成果を収めてきているが、河口堰貯水池のように水深が浅い貯水池における富栄養化現象に対しては、各水域において様々な対策が試行されてきている段階である²⁾。

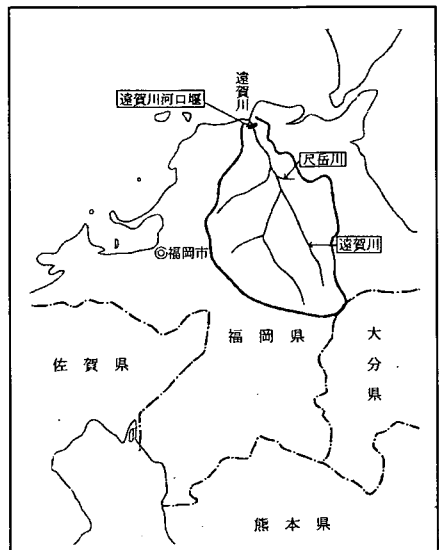


図-1 遠賀川位置図

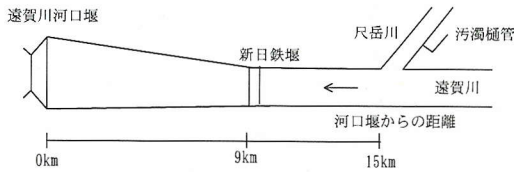


図-2 遠賀川河口堰と尺岳川的位置関係

浅い貯水池における富栄養化対策として、栄養塩であるリン負荷の削減は効果的な対策の一つであり、黒ボク土等を用いたリン除去施設が国内の数箇所で稼働している³⁾。

流入河川のリン負荷削減対策としては、リン負荷量の占める割合の高い河川を優先的に実施することが効率的である。そこで、この貯水池内のリン濃度削減対策の一環として、リン濃度の高い支川尺岳川を対象としたリン除去施設の建設が急務となった。遠賀川河口堰と尺岳川的位置関係は図-2に示すとおりである。尺岳川は、左岸より流入する汚濁樋管によって水質が著しく悪化することから、汚濁樋管を対象としてリン除去を行うことが、さらに効率的となる。

リンは、BOD等の有機物と異なり分解しないため、削減するには水域から取り出す必要がある。したがって、リン除去においては溶解性のリンを如何に効率よく集め、かつ集めたリンを如何に効率よく汚泥として処分するかが課題である。

リンを削減する手法として、下水処理場で行なわれている凝集沈殿法がある。この手法を河川区域に適用する場合には、堤内地に処理施設を建設する必要がある、その施設の用地取得、周辺環境対策などの初期投資や施設の維持管理、薬品代、日々の人件費、汚泥の処分費等のランニングコストが高価となる。また、その他の手法として植生浄化があるが、広大な用地を必要とし、適用できる水域は限られる。

このように、施工性、経済性、効率性など一般的なリン削減手法には課題が多い。

一方、浄水場で発生する浄水汚泥は、従来、産業廃棄物として処分されていたが、近年では処分費の削減と資源活用の点から有効利用が進められてきており、新たな利用用途が求められている。平成10年度現在、浄水汚泥の有効利用率が100%である浄水施設数は2割を越えるが、一方で6割を越える施設で有効利用がまったくなされていない⁴⁾。有効利用用途は、埋土、農業用土、煉瓦、セメント材料等である^{5), 6), 7)}。浄水汚泥の成分の多くは原水中に含まれる浮遊物質であり、自然に由来するものであるが、浄水過程でアルミニウム系の凝集剤が使用

されることが多い。農業利用上は、凝集剤に由来する水酸化アルミニウムが施肥リン酸と難溶性のリン酸アルミニウムを形成するため、植物はリン欠乏となることが問題点である⁷⁾。

筆者らは、遠賀川河口堰に流入する汚濁支川尺岳川のリン除去に当たり、このような浄水汚泥のリン吸着特性に着目して、基礎試験、現地実験を踏まえ、浄水汚泥を用いたリン除去施設を開発し、良好なリン除去効果が得られることを確認した。実施設計に当たり、浄水汚泥のリン除去資材としての基本性能を室内実験により把握するとともに、現地河川水を用いたリン除去システムをパイロットプラント規模で製作し、本システムの処理特性の把握、設計条件の検討を行った。この結果を受けて、汚濁樋管の晴天時平均流量に相当する処理水量0.05m³/sの実施設が建設され、ほぼ計画どおりの成果が得られた。

2. 実験方法

(1) 浄水汚泥の特性

浄水汚泥とは、水道の浄水処理過程において発生する汚泥のことで、その成分は原水中に含まれている濁質とその濁質を除去するために投入された凝集剤（硫酸バンドやPAC）である。この汚泥は、グラウンドの路盤材等に利用されているが、活性炭が入った汚泥などは受け入れ先が少なく廃棄物として処分されているのが現状である。

本実験では、遠賀川河口堰に近く、将来的に安定して浄水汚泥の供給が得られると想定されたことから、北九州市の浄水場より発生した浄水汚泥を用いた。

写真-1に浄水汚泥の写真を示す。表-1に本実験で用いた浄水汚泥の処理方式及び性状を示す。

(2) 浄水汚泥によるリン除去機構

リン吸着材におけるリン吸着の機構概念図を図-3に示す⁸⁾。吸着材の表面にP₀₄-Pを吸着し、強い結合をして、水中よりリンを除去する。浄水汚泥によるリン除去機構は、浄水汚泥中の水酸化アルミニウムが吸着材としてリンを吸着する反応と考えられる。



写真-1 浄水汚泥

表-1 浄水汚泥の処理方式及び性状

項目	処理方式または値	備考
濃縮前処理	無業注	穴生及び伊佐座浄水場は短時間加圧脱水法、本城浄水場は長時間加圧脱水法である。
脱水処理方式	機械脱水(加圧)	
含水率	60~70%	
リン含有量	2~3mg/g	
リン酸吸収係数	3,000 mgP ₂ O ₅ /100mg	土壌がリン酸を保持する能力の指標、値が大きいほどリン酸吸収能力が高い
有害物質 (アルキル水銀, 全水銀, カドミウム, 鉛, 有機リン, 六価クロム, ヒ素, シアン, トレノ, PCBなど)	定量限界以下	産業廃棄物の埋立処分にかかる判定基準(平成7年10月2日改正総理府令51号)

表-2 実験の概要

実験	目的	内容
リン吸着平衡試験	浄水汚泥の交換頻度は、維持管理を考えるうえで重要な事項であるばかりでなく、施設構造にも影響する。このため、リン除去効果持続日数を推定することを目的とする。	浄水汚泥のリン吸着平衡濃度を測定し、リン飽和吸着量を算定する。飽和量を日吸着量で割り、効果継続日数を求める。
連続通水実験	実施設において安定したリン除去効果を得るために必要となる浄化フロー、施設計画諸元を得ることを目的とする。	現地水を対象とした現地実験施設を設置し、通水条件を変化させて連続通水実験を行う。
溶出試験	施設稼働中及びリン吸着後の浄水汚泥を再利用する際に、周辺環境へ悪影響を与えないことを確認するために、有害物質の流出の有無を把握することを目的とする。	浄水汚泥からの有害物質の溶出量を測定する。

(3) 実験の目的

浄水汚泥をリン除去施設に適用するにあたっての課題を解決するため、表-2に示すように実験を実施した。

リン吸着平衡試験は、浄水汚泥のリン吸着飽和量を測定することにより、浄水汚泥のリン除去効果継続日数を推定することを目的とした。連続通水実験は、実施設を想定した現地実験施設を用いることで、安定したリン除去効果を得るために必要となる浄化フロー、施設計画諸元を得ることを目的とした。溶出試験は、浄水汚泥からの有害物質の流出の有無を把握することを目的とした。

(4) リン吸着平衡試験

浄水汚泥のリン除去効果持続日数を把握するために、浄水汚泥のリン飽和吸着量を測定した。

定速攪拌装置に既知濃度のリン水溶液 (KH₂PO₄aq) を用意し、その中に浄水汚泥を入れ、攪拌した。一定時間後に採水しPO₄-P濃度を測定し、浄水汚泥のリン吸着量が飽和する平衡濃度を把握した。この平衡濃度と初期の濃度を比較して、その減少量からリン飽和吸着量を算出した。

本試験では、予備試験におけるPO₄-P濃度の変化と汚濁樋管水のPO₄-P濃度が概ね10mg/Lであったことから、リン溶液のPO₄-P濃度を5, 10, 20, 60, 600mg/Lとし、攪拌時間を24時間, 48時間, 72時間とした。試験ケースを表-3に示す。表中の(吸着後破碎)とは平衡に達した塊を破碎したものである。

攪拌条件は浄水汚泥と供試水が十分混合するように、ジャーテストにおける急速攪拌における条件と同様の周速度40cm/s¹⁰⁾とし、連続攪拌とした。

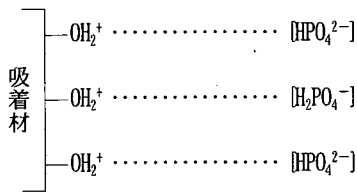
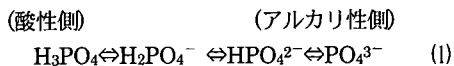


図-3 リン吸着機構概念図

よりよい吸着材は、容易にリンと結合することとともに、表面積が多いこととなる。表面積を多く保つには、多孔質の素材から形成されることが重要である。この点、浄水汚泥はもともと、粒状であることから、リン吸着材として適した形状をしている。

リン酸は水溶液中ではpHによって式(1)に示す3態のいずれかで存在する。



通常のpHでは、リン酸はH₂PO₄⁻, HPO₄²⁻の状態で存在する。一方、アルミニウムは、リン酸と極めて離溶性の塩を形成する。生成したAl(OH)₂・H₂PO₄はバリサイトと呼ばれ、その溶解度積は10⁻²⁸である。これは事実上、水には溶けないことを意味している⁹⁾。このためアルミニウムと吸着したリンは、安定して水中から除去される。

表-3 リン吸着平衡試験ケース

試料	原水の $PO_4\text{-P}$ (mg/L)				
	5	10	20	60	600
穴生浄水場1	10	10	10	—	—
穴生浄水場2	—	—	60	60	60
伊佐座浄水場	10	10	10	—	—
本城浄水場(塊)	—	—	60	60	60
本城浄水場(破砕)	60	60	60	—	—
本城浄水場(吸着後破砕)	60	40	60	—	—
真砂土(対照)	60	60	60	—	—

表中の数値は試水1Lに投入した泥の乾重(g)である。

$PO_4\text{-P}$ の分析方法はJIS K0102 46.1.1とした。

(5) 連続通水実験

本実験は実施施設を想定した現地実験施設を用いることで実施施設と同様の流入水質変動、水温変動などの流入条件と浄水汚泥の圧密や目詰まり等の施設条件におけるリン吸着・除去効果及びその効果の継続性や通水速度、汚泥厚とリン除去率の関係などについて把握することを目的とした。

連続通水実験施設の概要について図-4に示す。汚濁樋管水を原水とし、ポンプで取水後、簡易沈殿槽、曝気付礫間接触酸化槽、分配槽を経て、浄水汚泥槽へ流入する。

浄水汚泥槽への通水は、径4mmの穴を開けた塩化ビニル管より滴下する散水方式とした。簡易沈殿槽及び曝気付礫間接触酸化槽は、浄水汚泥の目詰まりの原因となる懸濁物質を除去すること、浄水汚泥内が嫌気化することを防ぐために、有機物を除去することを目的としたものである。

実験条件は、既往の土壌浄化施設における計画値を参考として、通水速度を5m/日と1m/日の2ケースとした。また、浄水汚泥の厚さは0.1m, 0.5m, 1.0mの3ケースとした^{3), 11)}。実験期間は5ヶ月間とし、概ね2週間に1回の頻度で、水質分析のため採水した。採水は流入水及び各槽の流出水とし、分析項目は浄化効果を見るためにBOD, SS, T-P, $PO_4\text{-P}$ とした。

また、浄水汚泥のリン吸着能力の変化を把握するため

に、リン含有量及びリン酸吸収係数を期間中3回分析した。さらに、有機物、窒素成分¹²⁾及びアルミニウムの溶出が懸念されたため、実験を2ヶ月間延長し、流入水及び流出水のCOD, $NH_4\text{-N}$, $NO_3\text{-N}$, $NO_2\text{-N}$, Alを期間中3回分析した。水質分析は、河川水質試験方法(案)-1997年版に依った。リン含有量の分析方法は昭和63年環水管第127号とし、リン酸吸収係数の測定方法は土壌養分分析法12.7.2とした。

(6) 有害物質溶出試験

本試験は施設稼働中及びリン吸着後の浄水汚泥を再利用する際に、安全性を確認する上で必要となる重金属等の有害物質の溶出の有無を把握することを目的とした。本試験は連続通水実験終了時の浄水汚泥を対象として実施した。

分析項目は、有害物を含む産業廃棄物の処分判定基準である「金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令」のうち、埋立処分(陸上および水面埋立)に係る判定基準(平成7年10月2日改正, 総理府令51号)の汚泥に係る25項目とした。

この判定基準を超える有害物を含む産業廃棄物を内陸で埋立処分する場合は、遮断型処分としなければならない。判断基準に適合させたものは管理型処分ができる。

試験方法は「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」(昭和48年2月17日, 環境庁告示第13号, 平成10年4月24日同第16号改正)とした。

3. 実験結果と考察

(1) 吸着平衡試験

a) 攪拌時間とリン濃度の変化

真砂土ではリン濃度は減少しなかったが、浄水汚泥では24時間後にリン濃度は著しく減少しており、72時間後にはほぼ平衡濃度に達したものと考えられる。

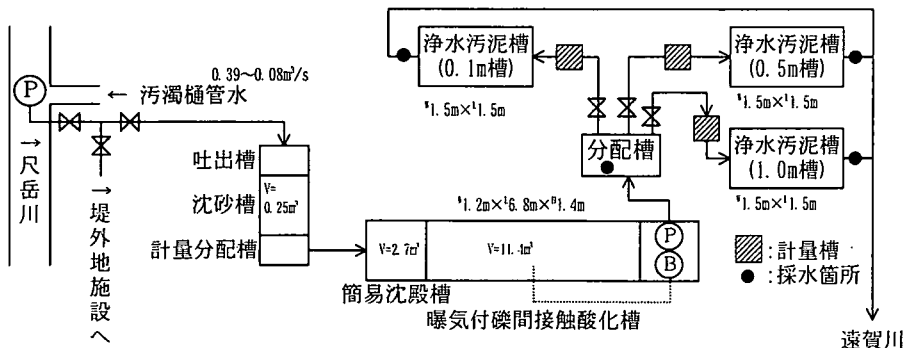


図-4 連続通水実験施設

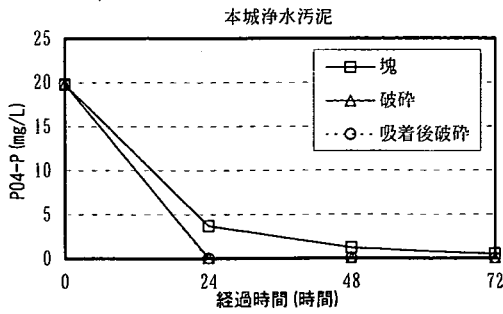


図-5 攪拌時間と濃度の関係

表-3に示した本城浄水汚泥の異なる性状3ケースにおける攪拌時間とリン濃度の関係を、原水リン濃度20mg/Lのケースについて図-5に示す。

塊のままが他のケースに比べて、リン濃度の減少が少なかった。塊より破碎した場合の方がリン吸着能力が高いこと、リン吸着能力が低下した浄水汚泥でも破碎すれば吸着能力が高まること示される。また、一度飽和に達した塊を破碎した「吸着後破碎」と「破碎」は同程度であった。

b) 飽和吸着量

浄水汚泥の平衡濃度(72時間後の濃度)及び吸着量データを両対数グラフ上に表現すると図-6に示すようにほぼ直線になることから、フロイントリッヒ型の吸着平衡が当てはまるものと考えられる。

フロイントリッヒ型の吸着平衡は式(2)で表される¹³⁾。

$$Y = kC^{1/n} \quad (2)$$

ただし、 Y : リン吸着量 (mg/g)

C : リン平衡濃度 (mg/L)

$1/n, k$: 各種素材の固有値

一方、浄水汚泥のリン吸着量は式(3)によって求められる。

$$\text{吸着量 } W(\text{mg/g}) = (C_i - C_t) \times V + a \quad (3)$$

ただし、 C_i : 最初の濃度 (mg/L)

C_t : 攪拌 t 時間後の濃度 (mg/L)

V : 水溶液 (ここでは全て1Lである)

a : 浄水汚泥重量 (g)

式(2)を各浄水汚泥について適用すると、図-6より次のようになる。伊佐座浄水場はリン平衡濃度の高い値がなく、相関係数は小さくなっている。

$$\begin{aligned} \cdot \text{穴生浄水場1} & : Y = 4.1226C^{0.441} & (4a) \\ & (R^2 = 0.974) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cdot \text{穴生浄水場2} & : Y = 4.0962C^{0.393} & (4b) \\ & (R^2 = 0.997) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cdot \text{伊佐座浄水場} & : Y = 1.0325C^{0.668} & (4c) \\ & (R^2 = 0.731) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cdot \text{本城浄水場} & : Y = 0.5317C^{0.399} & (4d) \end{aligned}$$

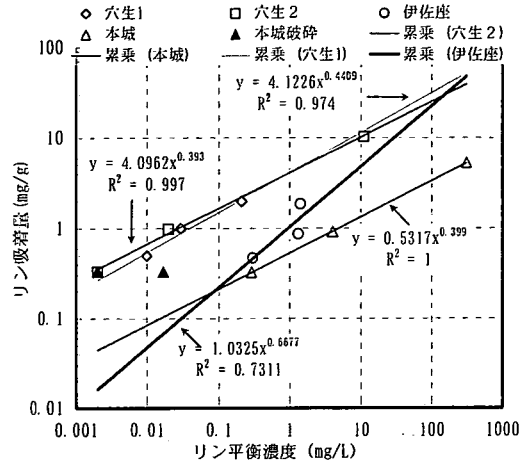


図-6 リン平衡濃度と飽和吸着量の関係

$$(R^2 = 1.000)$$

(ただし C : 平衡濃度 (mg/L), Y : 吸着量 (mg/g), R : 相関係数)

$1/n$ は吸着指数とも呼ばれ、濃度変化に対する吸着量の変化傾向を示す。吸着指数の値が同程度である穴生浄水場と本城浄水場では、(4a~4d)における k の値が、穴生浄水場は本城浄水場の8倍程度となっていることから、穴生浄水場は本城浄水場の8倍のリン吸着量をもつと判断される。

c) 飽和吸着量の影響要因

穴生浄水場が本城浄水場に比較して吸着量が多いのは、本城浄水場に比べて形状が小さく単位容量当りの表面積が広いためと考えられる。形状にもよるが、穴生浄水場の汚泥と本城浄水場の汚泥の表面積を比較すると、以下に示すように穴生浄水場汚泥の方が単位容積当りの表面積は8倍となる。このため、本城浄水場汚泥の形状を細かくすれば、本城浄水場汚泥の吸着量は増大すると考えられる。このことは本城浄水場汚泥の塊を破碎すると吸着能力が増加した実験結果と一致する。

<表面積の比較>

①形状

$$\text{本城浄水汚泥} : 5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm} = 125\text{cm}^3$$

$$\text{穴生浄水汚泥} : 2\text{cm} \times 1\text{cm} \times 0.3\text{cm} = 0.6\text{cm}^3$$

②1個当りの表面積

$$\text{本城浄水汚泥} : 5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 6\text{面} = 150\text{cm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{穴生浄水汚泥} : & 2\text{cm} \times 1\text{cm} \times 2\text{面} + 0.3\text{cm} \\ & \times (2\text{cm} + 1\text{cm}) \times 2 = 5.8\text{cm}^2 \end{aligned}$$

③単位容積当りの比表面積

本城浄水汚泥を単位容積と考える。

$$125\text{cm}^3 \div 0.6\text{cm}^3 = 208\text{個}$$

$$5.8\text{cm}^2 \times 208\text{個} \div 150\text{cm}^2 = 8\text{倍}$$

表-4 浄水汚泥分析結果

試料	リン含有量 (mg/g)			リン酸吸収係数 (mgP ₂ O ₅ /100-g)		
	開始時	中間時	終了時	開始時	中間時	終了時
汚泥厚・深度	0日目	40日目	131日目	0日目	40日目	131日目
0.1m 上層	11.4	13.6	22.4	3.440	3.140	3.030
0.5m 上層	2.23	8.28	15.2	3.290	3.210	3.190
0.5m 下層	-	-	13.2	-	-	3.250
1.0m 上層	2.23	10.1	10.8	3.290	3.190	3.240
1.0m 中層	-	-	9.70	-	-	3.250
1.0m 下層	-	-	6.66	-	-	3.260

(2) 連続通水実験

a) 浄水汚泥分析結果

本実験期間中の浄水汚泥の分析結果を表-4に示す。

0.1m槽は約半年間通水した汚泥を用いているため、開始時のリン含有量が高くなっている。1.0m槽をみると、上層からリンが吸着されていることがわかる。

リン酸吸収係数はほとんど変化しておらず、5ヶ月間通水した後もリン吸着能力が高いことが示された。

b) 水質分析結果

PO₄-Pの流入、流出水質レベルと除去率を図-7に示す。流入水質レベルは10mg/L前後であり、流入水中のT-PのうちPO₄-Pの占める割合は90%以上であった。

流入水質レベルは10mg/L前後であった。流出水質と除去率を見ると0.5m、1.0mと汚泥厚が厚くなるにつれて、PO₄-Pの除去効果は顕著に高くなっている。

1.0m槽で通水開始1ヶ月間は80%以上の除去率であり、良好なPO₄-P除去能力を示した。一方、0.1m槽は通水開始から20%前後と低い値を示した。

これは0.1m槽の浄水汚泥のみ前年度の実験からの継続であるためと考えられる。

通水開始後約3ヶ月で1.0m槽は80%前後から60%前後に、0.5m槽は70%前後が40%前後に、0.1m槽は20%前後から10%前後に各々低下した。しかし通水速度を5m/日から1m/日に遅くすると除去率は再度上昇する傾向が見られた。

これらのことは通水を続けるとリン吸着除去能力が低下すること、また通水速度は遅い方が除去能力が持続することを示している。

リン以外の項目の分析結果については、表-5にまとめて示す。BOD、SSは流入水の水質が低い時は除去率が低下するが、流出水質は概ね良好であった。CODは、流出水質が流入水質を上回ることにはなかった。無機態窒素は、NH₄-Nは浄化効果が見られるが、NO₃-Nは増加した。無機態窒素(I-N)は、流入水質が低い時は悪化するものの、流入水質が高い時は浄化しており、無機態窒素については、浄水汚泥が濃度の平準化に寄与しているものと考えられる。また、NH₄-Nが減少することから、硝化反応が生じていると判断される。アルミニウムは通水初期に流出水が高い値を示したが、このときはSSも高くなっていることから、浄水汚泥中の微細粒子が流出したためと推定

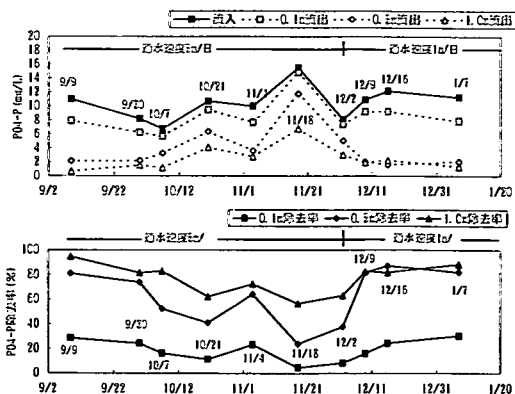


図-7 PO₄-Pの除去効果

表-5 リン以外の項目の分析結果

水質項目	流入水 (mg/L)	流出水 (mg/L)	除去率 (%)
BOD	20.9 ~ 59.	3.9 ~ 33.1	0 ~ 89
SS	2. ~ 27.	1. ~ 4.	0 ~ 91
COD	10.7 ~ 34.1	2.7 ~ 7.4	38 ~ 92
NH ₄ -N	.29 ~ 20.8	.03 ~ 6.33	70 ~ 90
NO ₃ -N	4.18 ~ 53.5	15. ~ 60.5	-601 ~ -12
NO ₂ -N	.07 ~ 3.3	.01 ~ .37	-14 ~ 97
I-N	4.71 ~ 77.6	15.1 ~ 67.2	-319 ~ 18
Al	.11 ~ .75	.02 ~ .27	-145 ~ 97

注：I-N=NH₄-N+NO₃-N+NO₂-N

される。溶解性アルミニウムの流出は、ほとんどないことが確認された。

(3) 通水速度とリン除去量の関係

リン除去効果継続実験から算出した各汚泥厚における通水速度1m/日と5m/日のD-PO₄-P除去率と除去量の関係を図-8に示す。

除去率でみると通水速度が遅いほうが高いが、除去量でみると通水速度が早いほうが多い。

また、各槽とも流入水質が増加すると除去率は低下し、除去量は上昇する傾向が見られた。このことから、浄水汚泥によるリン吸着量は、流入水質濃度に依存するものの、今回得られた流入水質の範囲では比例関係にはないことがわかった。

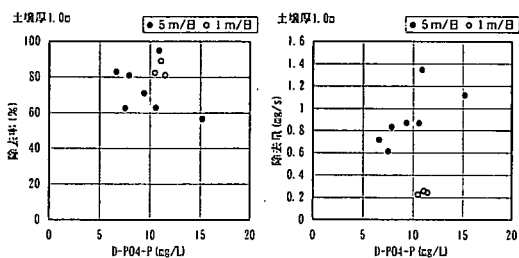


図-8 通水速度とリン除去率、除去量の関係

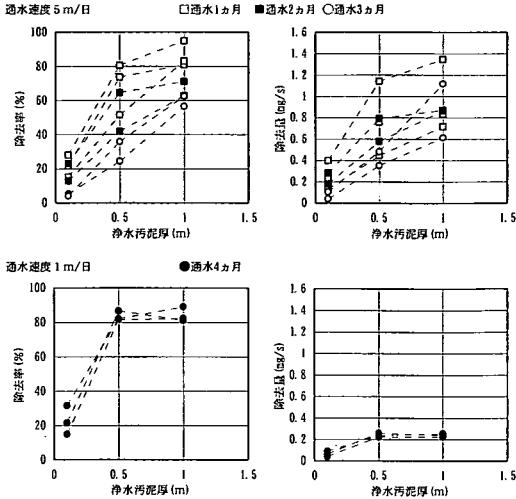


図-9 浄水汚泥厚とリン除去効果の関係

(4) 浄水汚泥厚とリン除去量の関係

浄水汚泥の厚さとD-PO₄-P除去率及び除去量の関係を図-9に示す。

通水速度 5 m/日のケースでは、汚泥厚が増加するほど除去率、除去量とも増加する傾向にある。通水速度 1 m/日では汚泥厚が0.5mで除去率、除去量ともに上限に近くになってきていることから、今回の流入水質の範囲では、汚泥厚を0.5m以上に増やしても、リン除去率及びリン除去量はほとんど変化しないと考えられる。

(5) 滞留時間とリン除去率の関係

浄水汚泥中の滞留時間とPO₄-P除去率を整理すると、図-10に示すとおりである。滞留時間は式(5)に示すとおりである。

$$T_a = H/V \quad (5)$$

ここに、 T_a : 滞留時間 (日)

H : 汚泥厚 (m)

V : 通水速度 (m/日)

滞留時間が10時間程度を越えると、リン除去率は85%程度で一定となる。なお、図-10では浄水汚泥厚によって記号を変えている。滞留時間2.4時間のデータを見ると、汚泥厚0.5mより汚泥厚0.1mの方が除去率が低い、これは汚泥厚0.1mの方が通水期間が長いためである。

(6) 有害物質溶出試験結果

有害物質溶出試験結果を表-6に示す。試料1の「鉛又はその化合物」の項目が0.06mg/Lと検出されたほかは、各項目とも定量下限値未満であった。したがって、浄水汚泥から有害物質が溶出して、リン除去後の浄化水が汚染されることはないものと考えられる。

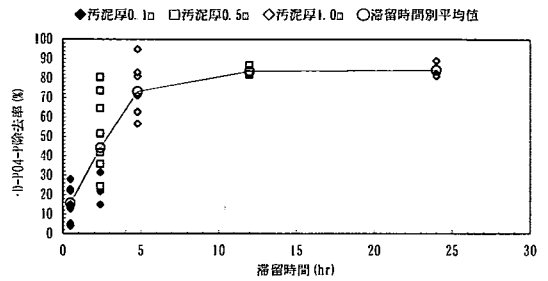


図-10 浄水汚泥のD-PO₄-P除去率と滞留時間の関係

表-6 浄水汚泥における有害物質の検出濃度

単位: mg/L (含水率を除く)

項目	試料名	試料1	試料2	試料3	基準値
1. アルキル水銀化合物		0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	不検出
2. 水銀又はその化合物		0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.005以下
3. カドミウム又はその化合物		0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.3以下
4. 鉛又はその化合物		0.06	0.01未満	0.01未満	0.3以下
5. 有機リン化合物		0.1未満	0.1未満	0.1未満	1以下
6. 六価クロム化合物		0.02未満	0.02未満	0.02未満	1.5以下
7. 虫薬又はその化合物		0.01未満	0.01未満	0.01未満	0.3以下
8. シアン化合物		0.1未満	0.1未満	0.1未満	1以下
9. PCB		0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.003以下
10. 1,1,1-トリクロロエチレン		0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.3以下
11. 1,1,2-トリクロロエチレン		0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.1以下
12. ジクロロメタン		0.02未満	0.02未満	0.02未満	0.2以下
13. 四塩化炭素		0.002未満	0.002未満	0.002未満	0.02以下
14. 1,2-ジクロロエタン		0.004未満	0.004未満	0.004未満	0.04以下
15. 1,1-ジクロロエタン		0.02未満	0.02未満	0.02未満	0.2以下
16. 2,2,1,1-ジクロロエタン		0.04未満	0.04未満	0.04未満	0.4以下
17. 1,1,1-トリクロロエタン		0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.3以下
18. 1,1,2-トリクロロエタン		0.006未満	0.006未満	0.006未満	0.06以下
19. 1,3-ジクロロプロパン		0.002未満	0.002未満	0.002未満	0.02以下
20. チオラム		0.006未満	0.006未満	0.006未満	0.06以下
21. シマジン		0.003未満	0.003未満	0.003未満	0.03以下
22. チオベンカルブ		0.02未満	0.02未満	0.02未満	0.2以下
23. ベンゼン		0.01未満	0.01未満	0.01未満	0.1以下
24. セレン又はその化合物		0.01未満	0.01未満	0.01未満	0.3以下
25. 含水率		80.0%	56.5%	72.7%	85%以下

注1) 基準値: 「金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準」(平成7年10月2日改正、総理府令51号)
 注2) 「不検出」は定量下限値を下回ることを示す。

4. 実施設への展開

(1) 実施設の諸元検討

a) 浄水汚泥の厚さ (汚泥厚)

汚泥厚は厚いほどリン吸着量が多くなり、交換頻度が少なくなる。しかし、あまり厚いと自重により圧密が生じ、通水性が低下してくると考えられる。

連続通水実験では、既往の土壌浄化施設の事例を踏まえて汚泥厚を0.1m, 0.5m, 1.0mの3段階、通水速度を5m/日と1m/日の2段階で通水したが、約4ヵ月の実験期間中に通水能力の低下は生じなかった。

一方、浄水汚泥の交換を行う場合は、地盤高からの作業性を考慮すると、汚泥厚1m程度が妥当と考えられる。これより、浄水汚泥の厚さは1.0mとする。

b) 通水速度

目標リン除去率を70%とすると図-10より、必要滞留

時間は0.2日となる。汚泥厚1.0m、滞留時間0.2日とすると、通水速度は5m/日以下となる。

一方、浄水汚泥の持続日数は、式(6)に示すように通水速度に反比例する。したがって、浄水汚泥の交換頻度を設定すれば、通水速度が決定される。

通水速度 : V (m/日)

汚泥厚 : H (m)

流入水量 : Q (m³/日)

削減負荷量 : L (g/日)

浄水汚泥量 : S (m³)

通水面積 : A (m²)

飽和吸着量 : P (g/m³)

持続日数 : D (日)

$$D = S / (L/P)$$

$$S = A \times H = (Q/V) \times H$$

$$D = Q \cdot H \cdot P / (L \cdot V) \quad (6)$$

(2) 尺岳川に流入する汚濁樋管を対象とした施設諸元の設定

処理水量0.05m³/s、PO₄-P濃度10mg/Lとして、尺岳川に流入する汚濁樋管を対象としたリン除去施設の諸元を設定する。汚泥厚は1mである。

流入水のPO₄-Pを10mg/Lとし、遠賀川河口堰の水質保全のために必要なPO₄-P除去率を70%とすると処理水質は3mg/Lである。浄水汚泥の仮比重は実測値より1.205g/cm³であるので、式(4a)を適用すると、浄水汚泥のリン飽和吸着量は8,030g/m³となる。

以上より式(6)は式(7)のとおりとなる。

$$D = 1,147 / V \quad (7)$$

一方、通水速度は通水面積と反比例の関係にあり、浄化用地面積に制約がある場合は、通水速度を速くする必要がある。しかしながら、通水速度5m/日としたときは図-7に示したように通水1ヶ月後にリン除去率が低下する傾向にあったが、1m/日では安定したリン除去率が持続した。そこで、本施設は、浄化用地が十分にあること、長期的に安定した通水速度及びリン除去率を確保するためには遅いほうがよいことから、通水速度を1m/日とした。このとき、(7)式より浄水汚泥の交換頻度は3年に1回程度となる。

以上より、処理水量0.05m³/s、PO₄-P濃度10mg/Lを対象としたリン除去施設を通水速度1m/日、浄水汚泥厚1mと計画すると施設面積及び容量は以下のとおりとなる。

$$0.05\text{m}^3/\text{s} \times 86,400\text{s} \div 1\text{m/日} = 4,320\text{m}^2$$

$$4,320\text{m}^2 \times 1\text{m} = 4,320\text{m}^3$$

(3) 本施設の概要

尺岳川浄化施設の基本諸元を表-7に示す。また、尺岳

表-7 施設の基本諸元

浄化対象河川	尺岳川
浄化手法	礫間接触酸化法 吸着法(下向流、散水式) 浄水汚泥(浄水場発生土)
前処理槽	
接益材	
リン吸着槽 吸着材	
処理水量	0.05m ³ /s (3m ³ /min)
処理前水質	前処理槽 BOD 9mg/L SS 20mg/L
	リン吸着槽 T-P 10mg/L
処理所要時間	前処理槽 1.3時間
	リン吸着槽 1m/日(通水速度)
処理後目標水質	前処理槽 BOD 2.3mg/L (75%削減) SS 5mg/L (75%削減)
	リン吸着槽 T-P 3mg/L (70%削減)
取水方式	ポンプ取水
施設概要	礫間浄化施設
前処理槽	槽長×槽幅×有効水深×槽数 20m×11.6m×3.2m×1槽
	1系列(2槽)×5系列 (槽長×槽幅×浄水汚泥厚×槽数)×系列数 (96m×5m×1m×2槽)×5系列 (計10槽、うち1槽は予備)
リン吸着槽	

川浄化施設の概要図を図-11に示す。

本施設は、取水施設、前処理施設(礫間接触酸化槽)、リン吸着槽、放流施設から構成されている。本施設は現地の状況よりポンプ取水としており、計画処理水量は0.05m³/sである。

連続通水実験より、吸着槽の目詰まり防止及びBOD低下防止のため、BOD及びSSを低下させておく必要があることが確認されたので、礫間接触酸化槽を前処理として設置した。

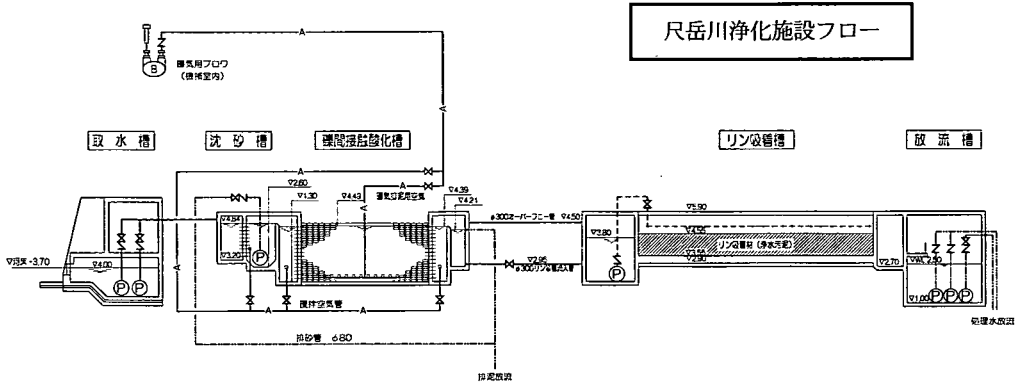
5. 本施設における運用結果

(1) リン除去効果

この尺岳川浄化施設は、平成12年4月から暫定稼働を行っている。リン削減効果を評価するために、取水口、リン吸着槽流入、放流口の3地点で定期水質調査が実施されている。PO₄-Pの除去結果を図-12に示す。

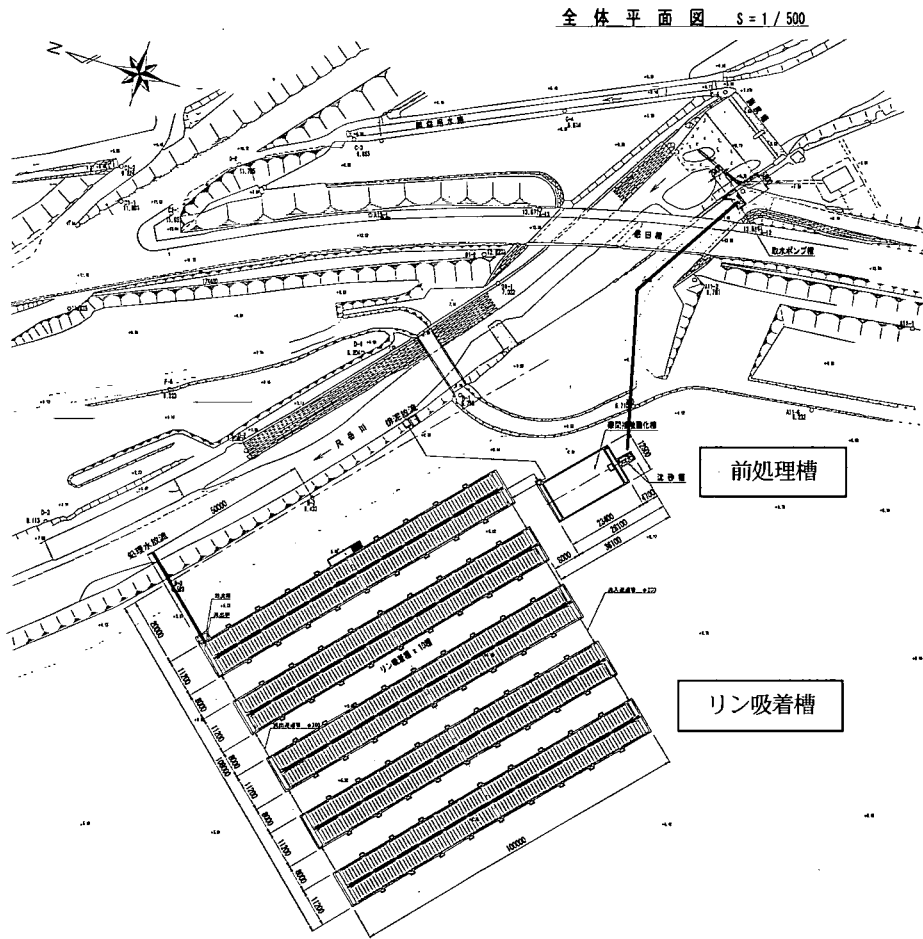
流入水のPO₄-Pは2~10mg/L程度であり、放流水のPO₄-Pは概ね2mg/Lであった。放流水のPO₄-Pは通水から約1年経過して上昇したが、その後再び低下した。約2年経過したが、目標値である3mg/Lを満足した結果となっている。

次に、PO₄-P除去率の推移を図-13に示す。通水初期は90%以上の高い除去率で推移した。



尺岳川浄化施設フロー

尺岳川浄化施設平面図



全体平面図 S=1/500

前処理槽

リン吸着槽

図-11 尺岳川浄化施設概要図

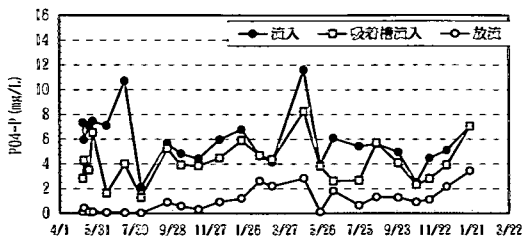


図-12 本施設における PO_4 -P除去結果

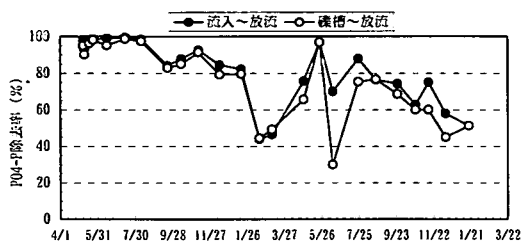


図-13 本施設における PO_4 -P除去率の推移

しかし、通水後5ヶ月目から除去率の低下が見られ、約1年後には除去率50%程度まで低下した。2年目の5月に一時的に除去率が高くなっているのは、当初の8槽から9槽に増設したためと推定される。その後一時低下したものの、20ヶ月経過後にあっても60%の除去率となっており、ほぼ計画除去率を満足している。

(2) 実施設で明らかとなった課題

除去率の低下がみられた1年目の2月に吸着槽内の浄水汚泥のリン酸吸収係数を測定したところ、 $3,300\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{mg}$ 前後であり、リン吸着能力は十分であると判断された。一方、吸着槽内は一部湛水している状況が観測され、目詰まりが生じていると推定された。そこで、詳細に調査した結果、一部でみずみちが生じ、短絡流が発生していることが分かった。短絡流の発生がリン除去率低下の原因と判断し、みずみちを応急的に塞いだ。短期間のうちに再びみずみちが生じた。

目詰まりが生じた原因は、浄水汚泥中に細粒分が多く混入したことから推察される。連続通水実験期間中は目詰まりは生じなかったことから、細粒分の増加要因を推定すると、散水による侵食、出水による冠水時のシルト分の施設内への流入、浄水汚泥搬入時の締め固め等による破碎等が考えられる。浄水汚泥を入れ替える時には、これらの要因に応じた対応を取り、目詰まりを生じさせないことが必要である。

(3) 遠賀川における浄水汚泥活用の意義

尺岳川におけるリン除去施設は、河川水からリンを除去する過程において、廃棄処分されていた浄水汚泥に価

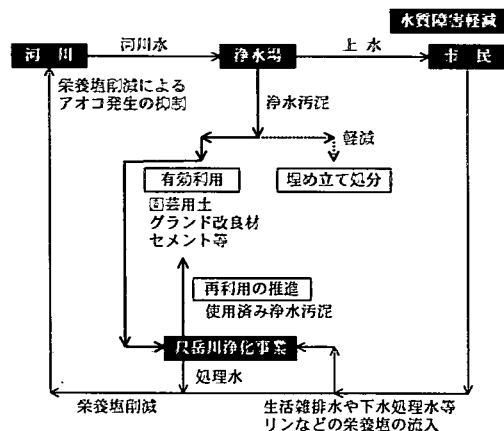


図-14 浄水汚泥を介しての資源循環・連携

値を見いだしたばかりでなく、将来、本浄化施設で有効活用後の浄水汚泥が園芸用土等として再利用されることとなれば、図-14のように浄水汚泥を介して官民・異業種間での連携が深まり、建設副産物等のユニークな資源循環システムを構成する一つのモデルとなることから、今後の社会資本整備の形として、非常に有意義なシステムであるといえる。

6. まとめ

本研究では、浄水汚泥中の水酸化アルミニウムがリン酸態リンを吸着することに着目し、浄水汚泥を河川水からのリン除去に適用した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) リン吸着平衡試験より、浄水汚泥によるリン吸着はフロイントリッヒ型の吸着平衡が当てはまるものと考えられ、浄水汚泥は形状が小さいほど、リン飽和吸着量が増加した。また、リン酸吸収係数は約 $3,300\text{mgP}_2\text{O}_5/100\text{mg}$ であった。連続通水実験からは、浄水汚泥中の滞留時間が長いほどリン除去率が増加するが、流入水のリン濃度が高いほどリン除去率は低下する傾向にあった。また、流入水質が PO_4 -P濃度で 10mg/L 程度の場合、滞留時間が10時間を超えるとリン除去率は85%であった。
- 2) リン以外の項目の浄化効果はBOD、SS、CODでみられたが、無機態窒素は流出水質が流入水質を上回る時があった。増加したのは NO_3 -Nであった。また、溶解性アルミニウムの流出はほとんどなかった。浄水汚泥の有害物質の溶出試験においては鉛が検出されたが、すべて基準値以下であった。
- 3) 本技術を適用した実施設の諸元を検討した。処理水量 $0.05\text{m}^3/\text{s}$ 、流入水の PO_4 -P濃度を 10mg/L とし、浄水汚泥

の厚さは1.0m, 通水速度は1m/日とした。

- 4) 実施設では, 流入水の $PO_4\text{-P}$ が2~10mg/Lであるのに対して, 放流水の $PO_4\text{-P}$ は概ね2mg/Lであり, 稼働開始後約2年が経過したが約60%の除去率であった。
- 5) 実施設において, 浄水汚泥の細粒による目詰まりが生じた結果, 短絡流が発生し, リン除去率が低下する現象が見られた。浄水汚泥搬入時の破砕防止などの目詰まり防止策が必要である。

謝辞: 本研究を進めるに当たり, 浄水汚泥をご提供頂いた北九州市水道局に謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省九州地方建設局 遠賀川工事事務所:「遠賀川水質保全事業」パンフレット。
- 2) 小島貞夫:水道・下水道・水行政… 21世紀の視点・論点!! 富栄養化(アオコ)対策の発想転換, 水道公論, Vol. 35, No. 1, pp. 22-24, 1999。
- 3) 建設省中国地方建設局 八田原ダム工事事務所:「芦田湖水質浄化施設」パンフレット。
- 4) 厚生省生活衛生局水道環境部水道整備課監修:水道統計平成10年度, (社)日本水道協会, 2000。

- 5) 内田駿一郎:汚泥の処理・処分の現状, 工業用水, No. 449, pp. 2-13, 1996。
- 6) 油谷昭夫:大阪市における汚泥の処理・処分, 工業用水, No. 449, pp. 66-73, 1996。
- 7) 後藤逸男:浄水場発生土を生かす 有効な農業利用を図るには, 水道協会雑誌, Vol. 64, No. 11, pp. 2-9, 1995。
- 8) 寺蘭勝二:リン吸着材によるリン削減について, ダム技術, No. 85, pp. 54-62, 1993。
- 9) 國松孝男, 菅原正孝編著:都市の水環境の創造, pp. 151-152, 技報堂出版, 1988。
- 10) 厚生省監修:水道施設設計指針・解説 1990年版, pp. 171-172, (社)日本水道協会, 1990。
- 11) 建設省関東地方建設局 渡良瀬川工事事務所:「袋川浄化施設」パンフレット。
- 12) 柳田友隆, 江 耀宗:浄水ケーキの有機物, 全窒素, リン酸吸着能力に及ぼす加熱・過酸化水素処理の影響, 用水と廃水, Vol. 40, No. 2, pp. 155-159, 1998。
- 13) 河添邦太郎:新化学講座V-b, 吸着, 日刊工業新聞社, 1958。

(2002. 2. 28 受付)

PHOSPHORUS REMOVING TECHNOLOGY ON UTILIZATION OF GENERATED SLUDGE IN WATER TREATMENT PLANT

Shuji UNNO, Masami OKAMOTO and Masao NAGABUCHI

As a measure against decreasing eutrophication in reservoirs with shallow water depth, the reduction of phosphorus loading is one of the effective measures, and in view that, numbers of phosphorus removal facilities have been constructed and they are in operation in Japan. This paper introduces the method of utilization of sludge generated in the water treatment process for reducing phosphorus of river water by which application of the said removal facilities has been confirmed through test plant as effective and stable method, and actual plant was constructed and in operation now.