

管路内浄化システムに関する 共同研究

研究第二部 研究員
石井 祐充



1 研究目的

近年、既存下水道管きょに新たな機能を加えることで、管きょ内で下水の処理を実施する手法である管路内浄化システムについて研究がなされています。そこで、本研究では、京都市内の実際の下水を用いて、管路内浄化システムの適用性や性能評価を行うとともに、その評価結果を分析することで、導入により得られる効果について検討しました。



図-1 研究体制

2 研究体制

2.1 研究体制

京都市、東京大学、(公財)日本下水道新技術機構

2.2 研究期間

令和2年2月20日～令和4年3月31日

3 研究内容

3.1 管路内浄化システムに関する既存の研究成果

東京大学では、平成27年度から市川市の菅野終末処理場内に実験施設を設置し、着水井後の原水を用いて研究を開始しました。また、酸素供給メカニズムとして、「間欠接触酸化法」(図-2)に注目しました。

・微生物担体が下水に浸漬しているとき

微生物は下水中の有機物を非酸化的に摂取し、一時的に体内に貯蔵する。

・微生物担体が空気に干出しているとき

微生物は空気との接触により供給される酸素を用い

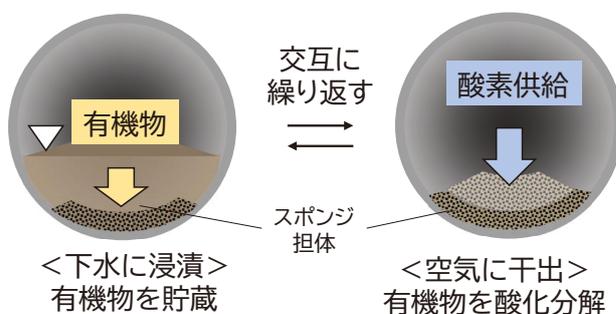


図-2 間欠接触酸化

て、下水浸漬時に一時的に体内に貯蔵した有機物を酸化分解する。

3.2 管路内浄化システムの性能

過去の管路内浄化に関する研究成果から把握できる内容を、以下のように取りまとめました。

- ・管路内浄化は間欠接触酸化法を活用した浄化システムであり、稼働にエネルギーが不要である。
- ・5 gO/m・dでの浄化能力を有し、最大でCODを半減できる程度の効果を示す(gO/m・dは1日で管きょ1m当たりで浄化のために消費される酸素重量を示す単位。5 gO/m・dは、1人分の下水を10m程度の下水道管路で処理できる程度の性能)。

3.3 管路内浄化システム導入に向けた課題

管路内浄化システム導入に向けた課題を表-1に取りまとめました。

3.4 本共同研究の特徴

これまでは東京大学においてラボスケールの実験装置を用いた基礎研究が進められてきましたが、本共同研究は実際に敷設されている下水道管路を模した単層管構造の実証実験を行うものであり、このような実証実験は世界初の試みとなります。

3.5 実験装置の構築

実証実験の実施に向けて、流量・流速の調整が行いやすい場所を選定し、鳥羽水環境保全センター吉祥院支所内に、延長約9mのL字型の管路（φ150）を持つ実験装置を製作しました。処理場に流入する下水（沈砂池通過後、最初沈殿池通過前）を揚水ポンプで約36L/分くみ上げ実験装置内に流下させ、管内の気相を密閉し、酸素濃度を計測することで浄化性能をモニタリングする仕組みとしました。

3.6 実証実験に向けた検討

① 計測・遠隔監視

実験装置を監視するには、計測機器の数値情報および映像による目視確認の実施が望ましいことから、WEBカメラによる監視に加え、ワンボードマイコンの一種であるArduinoを用いて計測機の制御および計測データの保存を行うこととしました。

② 流量の変化（装置の稼働・停止）

浄化メカニズムである間欠接触酸化を引き起こすには、管内の流量変動が必要ですが、本実験装置では電動流量調整弁等を設けていないことに加え、揚水ポンプも一定容量で、流量を変動させられないことから、スマートプラグを活用して、夜間時に揚水ポンプを停止させて、「空気に干出している状況」を作り出すこととしました。

③ スポンジ構造の違い

設置するスポンジを大きくすれば、より高い浄化効果を得られる一方で、流下阻害の発生や維持管理の手間が増加することが想定されます。これらの作用を確認するため、5cmと10cmのスポンジ幅の比較実験を行った結果、より高い浄化効果が発揮された10cm幅のスポンジを採用しました。また、素材の調達しやすさから、厚さは10mmのものを用いました。

表-1 導入に向けた課題

項目	課題
浄化性能	○長期間使用での浄化性能 ○雨天を想定した場合の浄化性能の変化 ○日間の流量・水質の変動による影響 ○スポンジの種類・設置方法による変化
耐久性能	○長期間使用による劣化状況 ○下水中に含まれるゴミ等による劣化
維持管理性能	○汚泥の発生状況と清掃頻度 ○スポンジ表面に付着した汚泥の清掃方法
流下能力の確保	○流下阻害の発生状況 ○流下阻害とならないようなスポンジの設置方法
設置手法	○実際の下水道管路を想定した場合のスポンジの設置方法



写真-1 構築した実験装置

④ 維持管理の頻度の検討

揚水ポンプに詰まり等の異常が発生すると実験装置の水位低下が想定される一方で、ゴミが堆積すると水位上昇が想定されます。異常の発生傾向を確認した結果、揚水ポンプの詰まり解消を2週間に1度程度、実験装置本体の堆積物の確認を1カ月に1回程度の頻度で行うこととしました。

⑤ 装置運転条件の確立

接触酸化の効果をできるだけ大きく確認できるようにするため、揚水ポンプ停止後にエアポンプで酸素を供給した後の酸素濃度の推移を確認しました。その結果、揚水ポンプ停止時間が長期間になるほど、酸素消費が進行していることが確認できました。揚水ポンプ停止時間を1日もしくは半日で試行した結果、半日では酸素消費が少ない場合が多かった一方、1日では安定して酸素消費が確認されました。

以上の検討の結果、表-3に示す条件で実証実験を実施していくこととしました。

4 研究結果

4.1 浄化能力の確認

実験開始から、実験装置内で酸素が減少していることは確認できた一方、スポンジが存在しなかった場合にどの程度の酸素消費が発生するかは不明でした。そこで、既存の実験系列のスポンジを撤去し、酸素消費量を確認することとしました。2021年6月16日から7月6日まで、スポンジを撤去した状態で実験を行いました。

測定結果の一例として、スポンジ撤去前の5月20日16時から24日16時の計測結果を抜粋します。また、スポンジ撤去中の6月29日16時から7月3日16時の測定結果を抜粋し、図-3に示します（縦軸は実験装置内の酸素濃度（%）、横軸は時刻）。スポンジ有りの条件時とは対照的に、スポンジ無しの条件では酸素消費が僅少でした。両ケースにおいて、エア供給の始まる16時を基準とすると酸素濃度は、スポンジ有りの条件では5月20日16時から48時間で約5pt、5月22日16時から48時間で約10pt減少した一方で、スポンジ無しの条件では6月29日16時から48時間で、酸素濃度の減少幅は僅少でした。以上のように、スポンジの有無によって、酸素消費量に大きな差を確認し、スポンジ担体における有機物分解作用を確認することができました。

4.2 雨天時の処理能力の確認

実験装置の設置されている処理場の処理区域は合流式であり、雨天時には実験装置へ流入する下水が雨水により希釈されます。このような流入下水の濃度の差が、浄化能力にどのような影響を与えるのか確認しました。

雨天時（流入水が雨水の影響を受けています）のデータとして、8月14日16時から、16日8時までの計測結果を抜粋します。また、同時期の晴天時（流入水が雨水の影響を比較的受けていない）のデータとして、8月7日16時から、9日8時までの計測結果を抜粋し図-4に示します。雨天時の8月14日16時から15日16時の24時間において酸素濃度は約3pt減少していたのに対して、晴天時の8月7日16時から8日16時の24時間において酸素濃度は約7pt減少していました。雨天時と晴天時では、酸素の減少幅に差があることが確認

表-3 実験装置運転条件

	火曜日	水	木	金	土	日・月
0時	汚水流入	接触酸化	汚水流入	接触酸化	汚水流入	接触酸化
16時	酸素供給		酸素供給		酸素供給	
18時	接触酸化		接触酸化		接触酸化	

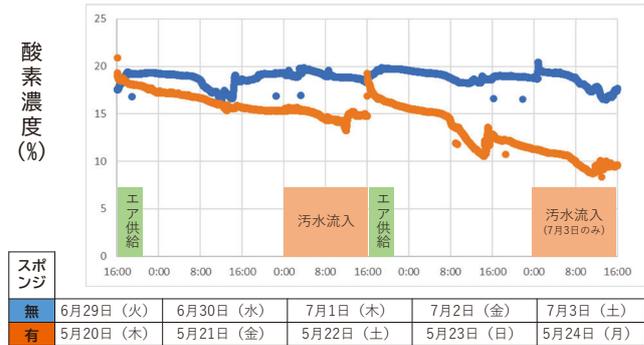


図-3 浄化能力の確認

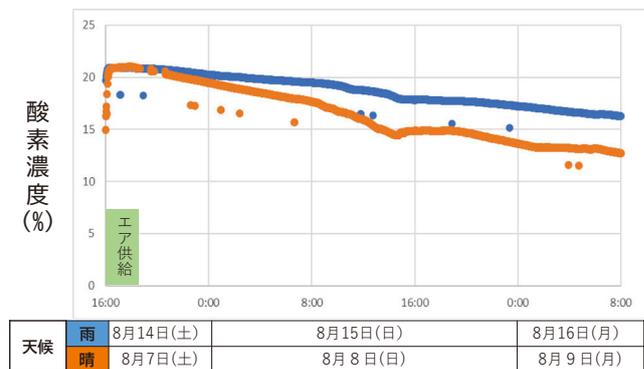


図-4 雨天時の処理能力の確認

できました。

8月12日から8月15日は京都市において大雨が記録されており、8月16日に流入した下水は雨水の影響を強く受けていたと考えられ、流入下水に雨水の影響があると管路内浄化システムの処理効果は発揮されにくいことが分かりました。

4.3 季節変動に関する比較（気温）

季節による温度変化の高低によって、浄化能力にどのような差が見られるのか確認しました。ただし、実験装置は地上部に設置されており、直射日光や外気温の影響を強く受けるため、地中にある下水道管きょよりも、管内温度が上下しやすいことに留意する必要があります。

温度の高い夏季のデータとして、8月7日（土）16時から8月10日（火）16時の計測結果を抜粋します。

また、温度の低い冬季のデータとして、12月18日（土）16時から21日（火）16時の計測結果を抜粋し、それぞれ図-5に示します。

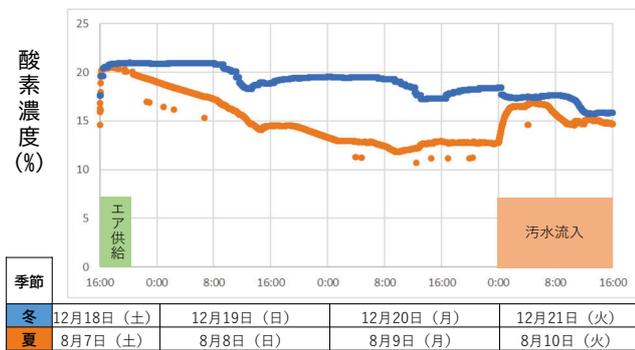


図-5 季節変動に関する比較

下水の流入終了後、8月のデータでは、順調に酸素濃度が減少し、24時間後には酸素濃度が約6pt減少しました。一方12月のデータでは、酸素流入後も酸素濃度の減少幅は僅少で、日中の酸素濃度の減少は数pt程度でした。日中に若干酸素濃度が減少するのは、直射日光の影響で実験装置内の温度が上昇し微生物の活性が上がったためと考えられます。

以上のように管内温度の高い8月の計測結果の方が、酸素消費量が多くなっており、管路内浄化システムの処理能力が高くなることが分かりました。

4.4 浄化性能の考察

本実験によって得られた浄化性能を、実験装置1m当たりの1日における酸素消費量（グラム）として算出します。実験に用いた管の1m当たり存在する酸素量は、微生物による酸素消費が開始される前の状態では、管内の体積に大気中の酸素濃度20.9%を乗じて4.48g/mと求まります。また、酸素消費量の標準的なデータとして、5月22日の16時から5月23日の16時までの24時間で、実験装置内の酸素濃度は、およそ12%へ減少しました。これより、実験装置1m当たりの酸素消費量（浄化性能）は、

$$4.48\text{g/m} \times (20.9\% - 12\%) \div 20.9\% = 1.907\text{gO/m} \cdot \text{d}$$

と算出でき、以上より、本実験によって得た浄化性能を約2gO/m・dとしました。

本実験装置と同様のメカニズムの実験をラボスケールで実施した佐藤らの既往研究^{*1}においては、実験値では本実験と同様に2gO/m・dの浄化性能が多く記録され、将来的には5gO/m・dでの浄化能力を達成で

きる可能性があるとして記述されています。

本実験においては、既存のラボ実験と同等程度の浄化性能を、より実施に近い実験装置において達成することができたと言えます。

4.5 スポンジ素材による浄化性能の比較

実験装置内に設置しているスポンジ担体の素材について、より浄化性能の向上に寄与する素材が無いか確認するために、実験装置内に当初から設置しているスポンジと、孔の大きさの異なるその他のスポンジについて、浄化性能の比較実験を行いました。

実験装置内に5種のスポンジの断片を設置し、1か月ほど設置し続け、スポンジ断片を覆うように汚泥を付着させた後、それぞれを個別の容器内に格納し、単位時間当たりの酸素消費量を比較することで、浄化性能の差を算出しました。

11月18日より写真-2の通り、5cm四方のスポンジ片5種類を、実験装置の最上流部に設置しました。（それぞれのスポンジの材質（写真-2左から順に））

- ①実験装置内に設置している種類のスポンジ
：イノアック CFH-13 1.95mm/孔1つ当たり
- ②A社製：0.85mm/孔1つ当たり（推定値）
- ③B社製（細）：0.56mm/孔1つ当たり
- ④B社製（中）：1.15mm/孔1つ当たり
- ⑤B社製（粗）：1.81mm/孔1つ当たり

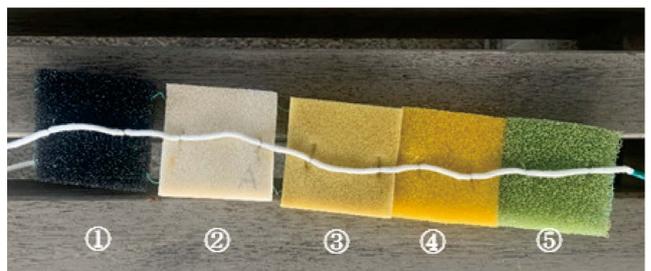


写真-2 実験装置内に設置した5種類のスポンジ

特に酸素消費量が多かったのは、①実験装置内に設置したスポンジと③B社製（細）となりました。

一般に、スポンジの孔が大きければ酸素を取り込みやすくなることから酸素消費量は多くなると考えられます。一方で、スポンジの表面積の点では孔が細かいほうが有利ですが、目詰まりが発生してしまうため、表面積が大きくとも酸素がスポンジの中まで届かず、表面積の大きさは浄化性能へは直結しません。しか

し、B社の3種類のうち、スポンジの目が細かいものが最も酸素消費量が多いという結果になりました。

なお、5つのスポンジ断片のうち、④と⑤については、スポンジが汚泥で完全には覆われず、スポンジが露出していた箇所があったため、これらについては、酸素の消費が完全ではなかったと考えられます。汚泥付着量によって酸素消費量が左右されますが、各スポンジに付着した汚泥量の計測は困難であり、条件が等しいか確認することが困難でした。

上記の理由より、本実験では各種類1つずつに対して優劣の評価には至りませんでした。今回の実験で採用したスポンジの浄化性能は、他のスポンジと比べて特に性能が劣るものではないことが確認できました。

4.6 耐久性能および維持管理性能の確認

実験終了後に、実験に使用したスポンジ（設置期間：令和3年5月17日～令和4年2月10日〈合計270日〉）と、同素材の未使用状態のスポンジを用いて、スポンジの劣化状況を定量的に測定するために、写真-3の通り、引張試験を行いました。

対象となる部材は、実験装置上流部に設置したスポンジ、下流部に設置したスポンジ、それぞれの使用後および未使用状態のもの計4種類としました。

それぞれ4回の測定の結果、表-2の通り、いずれにおいても、未使用状態のものより、実験で使用したスポンジの方が、強度が低下していました。

なお、実験装置の下流部に設置したスポンジと、実験装置の上流部に設置したスポンジは、同モデルの色違いですが、未使用状態でも色の違いによって強度に差がありました。ただし、冬季においては、実験装置内の気温が氷点下となった日も存在し、実験装置内に残存している下水が凍結してしまった影響でスポンジの強度が下がった可能性も考えられます。

4.7 流下阻害の懸念について

実験装置内の流速を計測し、マンニング則から実験装置内の粗度係数を算出しました。その結果、スポンジ有りの時の粗度係数は $n=0.05$ 、また、スポンジ無しの時の粗度係数は $n=0.018$ と求まりました。

実験装置は硬質ポリ塩化ビニル管であり、この粗度係数の標準値は0.010で、標準値に近い値の粗度係

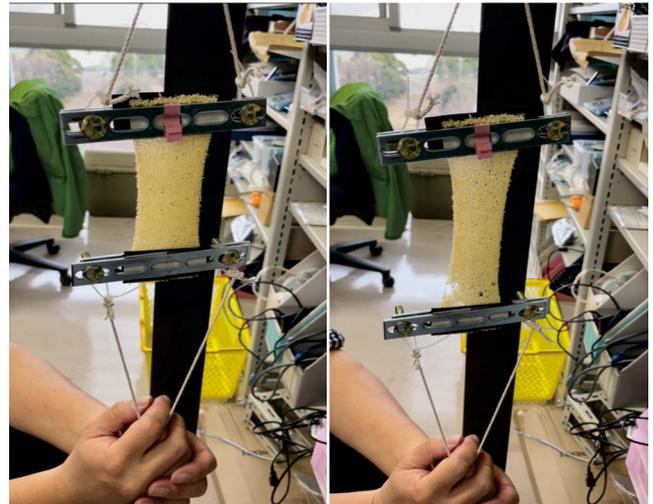


写真-3 引張試験の実施状況

表-2 引張試験結果

4 回 の 平 均	下流に設置（黄色）		上流に設置（黒色）	
	①未使用状態 のスポンジ	②実験で使用 したスポンジ	③未使用状態 のスポンジ	④実験で使用 したスポンジ
	4.65kg	4.48kg	5.60kg	4.27kg

を得ることができました。

なお、実験装置内には90度の屈曲部が存在するため、流速・流量はその影響を受けやや実際よりも低い数値が算出されたと考えられます。

スポンジ有りの場合、粗度係数は約2.8倍(0.05/0.018)、流速比では、35% (1/2.8) に低下する試算となりましたが、本実験においては2割水深程度の流量での評価であり、満管レベルの流量での評価ではないことに留意する必要があります。

5 まとめ

管路内浄化システムは、雨水の混ざる下水や気温の低くなる冬季等においては浄化性能が発揮されにくい傾向にあります。実証実験によって示された浄化性能は2gO/m・dであり、一定の浄化性能が示されました。

管路内浄化システムでは、電力を消費せずに有機性汚濁物質を除去でき、その結果、終末処理場への有機物負荷が減るので終末処理場で発生する汚泥が減少します。現状では実装に課題がありますが、管路内浄化技術をさらに向上させれば、例えば過疎化の進行に伴

い効率性が低下していく中山間部の下水道の持続可能性を高めることができると考えられます。一方で、管路の維持管理にかかる負担が増える可能性もあります。今後も、処理性能を確認しつつ維持管理の負担を明らかにするなど、浄化技術の性能の向上のため、さらなる研究の実施が望まれます。

参考文献

- ※1 佐藤弘泰, Sotelo T. J., Lyu R.(2019) ラボスケール単層式管路内下水浄化装置の性能評価, 第55回下水道研究発表会講演集, pp1055-1057.

