

# 水質浄化能力を持つ下水管の開発

庄司 仁\*<sup>1</sup>

## Development of Novel Sewer Pipe for Self-purification

Tadashi SHOJI\*<sup>1</sup>

**ABSTRACT** : A novel sewer pipe with a double-deck structure was developed for in-sewer treatment. The purification rates were ca. 10 g-BOD/(m·d). Furthermore, the performance of the novel pipe coupled with simple post-treatments was also examined. The coagulation was the most efficient: BOD was successfully decreased to below 20 mg/L by the in-sewer treatment followed by the addition of polyaluminum chloride. The novel pipe, therefore, may be promising technology for both BOD reduction (independent usage) and alternative secondary treatment (coupled with coagulation).

**Keywords** : in-sewer treatment, self-purification, sewer pipe, water reclamation

(Received October 7, 2016)

### 1. はじめに

社会基盤としての下水道は、下水管路網と末端の処理施設で構成されている。このような区分けは、下水管と処理施設の明確な役割分担—輸送機能と処理機能—を思い起こさせる。実際に、水（汚水および雨水）の速やかな排除は、下水道に課せられた最も重大な使命である。したがって、下水管を設置する際には、輸送が滞りなく行われるように、十分に大きな口径としなければならない。結果として、平常時の下水管は、内部に空間的な余裕が生じる。この空間は、管路「網」を形成していること、水が流れていること、地中に位置することなど、輸送以外の機能に活用し得る特徴を備えている。そこで、本稿の前半では、下水管の新たな用途に関する技術開発動向を紹介する。また、本稿の後半では、著者らが取り組んできた下水管内での水質浄化技術を詳しく取り上げて、下水管の多目的な利活用が下水道にもたらす意義を具体的に考察する。

### 2. 下水管の種類と管内の状況

下水管内の状況には、排除方式と流下条件が大きく影

響する。なお、本稿が主な対象としているのは「自然流下」による「分流式」の汚水管である。

#### 2. 1 排除方式：「分流式」と「合流式」

下水管が輸送の対象とするのは、家庭や事業所から排出される汚水と、道路の側溝などを介して集められる雨水である。これらを個別の管路網（汚水管と雨水管）で集める方法は分流式、単一の管路網で集める方法は合流式と呼ばれる。分流式の雨水管と合流式は、雨水への対応のため、前述の空間的な余裕がより大きい。しかしながら、流量の変動が不規則かつ大きいため、管内の利用は一部の目的に限られる。一方、分流式の汚水管は、生活周期に対応する相対的に小さな流量変動となるため、管内の利用に好適である。

#### 2. 2 流下条件：「自然流下」と「圧送」

下水の輸送は、勾配を利用した流下（自然流下）が望ましい。しかし、埋設できる深さには限りがあるので、途中でポンプで汲み上げるか、管路全体を加圧／減圧する必要がある。後者の流下条件を圧送と呼ぶ。水理学的な効率性を考慮して、自然流下は開水路（水面を持つ状態）で、圧送は管水路（水で満たされた状態）で運用される。このような区別も、管内の利活用には大きな影響を与える。

\*<sup>1</sup> : 物質生命理工学科 助教 (t-shoji@st.seikei.ac.jp)

### 3. 下水管の潜在的な価値と対応する技術の動向

#### 3.1 張り巡らされた地下空間

空間的な利活用手法の代表は、光ファイバーの敷設である。国土交通省の「下水道管きょ開放に関する状況調査」によれば、2015年度末時点で、敷設された光ファイバーの総延長は約2250 kmに達している[1]。当初は下水道施設の遠隔管理を目的としていたが、北海道泊村や岡山県新見市では、自治体の基幹情報網に発展している。最近では、管路の空間そのものを通信事業者に貸し出す事例が見られるように、すでに利用技術として確立されている。そのため、敷設費用に見合う便益が得られる地域では、さらなる普及が進むと予想される。

#### 3.2 流下する熱媒体

下水の温度は、気温に比べて季節変動が小さい。これは、排出された温水・冷水の影響もあるが、下水管が地中に埋設されている効果でもある。夏季と冬季に生じる気温との温度差は、下水管での熱交換が空調や給湯の効率化につながる可能性を意味する。制度的には、2011年の都市再生特別措置法の改正と2014年の都市の低炭素化の促進に関する法律の制定により、民間事業者が熱交換を実施できる状況となっている。技術的にも、国が詳細な技術マニュアル[2]を公表しており、低炭素社会実現の有力な手段の一つとして、期待が高まっている。

#### 3.3 水資源としての可能性

下水処理施設が再利用可能な水（再生水）を供給する事業は、日本国内でも行われている。これに対して、水資源に対する危機感の強いオーストラリアでは、利用者が水処理を行う前提で、下水管からの下水の採取を認める枠組み（sewer mining）もある[3]。処理施設が下水管の末端・最下流にあることから、途中での採取－再利用は、輸送の面で大きな利点がある。ただし、一般的な下水から再利用向けの水を得るには、高度な処理設備が必要となる。既存の技術でも実現はできるが、費用の制約から、適用の対象は一定規模以上の需要（ゴルフ場や大規模な公園）に限られている。

#### 3.4 位置エネルギー活用の可能性

自然流下のために勾配を設けた下水管は、位置もしくは流れのエネルギーを持っている。理論的には、小水力発電でエネルギーを回収できるが、その実現可能性は低いと見られている。というのも、下水管の輸送機能との両立が難しいためである。これまでに取り上げた利用方

法は、下水管の壁面付近をわずかに占有する設備で対応できるものであった。これに対して、小水力発電は流れと接触する構造とならざるを得ないため、下水中の夾雑物の影響で、下水管の閉塞や発電装置の故障を引き起こす危険性が高くなる。

一方、直接的なエネルギー回収以外の方法として、再曝気（流れによる水面からの酸素供給の促進）の意義も検討されている。河川などと同様に、自浄作用（供給された酸素により有機物の微生物分解が促される現象）が生じるためである。このような流れのエネルギーを利用した水質浄化の可能性は、1970年代から提唱されている[4,5]。そこで次章では、水質浄化技術についての現在までの研究動向と、著者らの最新の研究成果を紹介する。

### 4. 水質浄化能力を持つ下水管の可能性と意義

#### 4.1 既存の浄化技術と課題

自浄作用の速度は、微生物量と酸素供給量に支配される。一般的な下水管を考えると、下水に浮遊している微生物と内壁に付着している微生物の量では、下水管内で浄化（有機物分解）を完結させるのに不十分である。これまで、微生物の保持を目的に、二つの方向性の技術が提案されている。

まず、浮遊微生物（下水処理施設の活性汚泥など）の継続的な投入がある[5]。浮遊微生物を大きく増やすと、再曝気のみでは酸素が足りなくなるので、外部動力による曝気装置を数多く導入する必要が生じる。これは、処理施設を下水管内に分散配置するようなものである。おそらく、管理の手間や維持費用の面で問題が多かったため、実用化や普及には至っていない。

次に、付着微生物の量を増やすような構造的な工夫がある。具体的には、たとえばコンクリート管の内壁を多孔質にすることで、微生物の付着を促進できた事例が報告されている[6]。とはいえ、水処理の分野で付着微生物を増やす方策と言え、スポンジなどの担体の導入が一般的であり、内壁の改良よりも効果的であることは容易に想像できる。しかしながら、ここで課題となるのが、3.4で述べた小水力発電と同じく、輸送機能との両立である。担体は下水と十分に接触する必要があるため、夾雑物による管路の閉塞の危険を高めるとともに、担体自体が被覆されて機能しなくなる可能性もある。また、多くの微生物を保持できるがゆえに、外部動力による曝気装置を追加する必要が生じるかもしれない。

以上をまとめると、下水管内での水質浄化を実現するためには、1) 微生物の保持、2) 流れによる酸素供給、

3) 輸送能力、という三つの条件を満たすように、何らかの技術的な工夫が求められる。

#### 4. 2 「浄化管」の原理と特徴

既存の技術の課題をふまえて、著者ら（前所属先の東京大学と、積水化学工業株式会社との共同研究）は、図1に示す「浄化管」の開発に取り組んできた[7,9]。浄化管の構造上の大きな特色は、下水管を輸送部（上段）と浄化部（下段）の二段に区切っていることである。また、生活周期に応じた流量・水位の変動を活用していることも特徴的である。以下では、輸送と浄化のそれぞれについて、実際の機能を説明する。

輸送の主体となる上段は、低水位時には通常の下水管と同じように機能する。水位が一定以上になると、両側に設けた孔から下段に落下する。このとき、夾雑物や土砂の下段への落下、あるいは夾雑物による孔の閉塞が生じると、輸送の障害となる。しかしながら、セパレータの曲面形状により、密度の大きな土砂はセパレータの中央部に集められる。また、孔径を適切に設定すれば、下段への夾雑物の落下も抑えられる。そして、下水管（汚水管）の持つ空間的な余裕のため、容積の一部を輸送以外の目的に割くことは全く問題ない。したがって、一見すると複雑な二段構造でありながら、輸送を妨げる要因が効果的に排除されている。

浄化の主体となる下段には、微生物を保持するためのスポンジ担体が設置されている。そして、下水が孔から落下する際には、通常の流れよりも効率的に（著者らの実験では約3倍の酸素移動効率で[7]）再曝気が行われる。さらに、下水の水位変動によって、担体が下水と空気とに交互に曝されることも重要である。このような生息環境では、有機物の蓄積能力を持つ微生物が選択的に集積される。すなわち、下水に接している状況では、下水中の有機物の摂取と蓄積まで（酸素が不要な代謝）を優先的に行い、空気に接している状況では、蓄積した有機物の酸化分解を行いながら増殖する。つまり、下水中の溶存酸素に加えて、空気との接触という酸素の供給経路を持つことになる。以上により、微生物の保持と、外部動

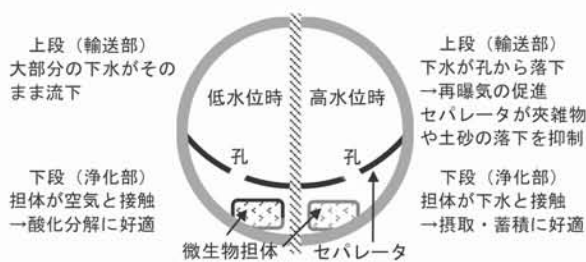


図1 浄化管の構造と機能（出典[8]）

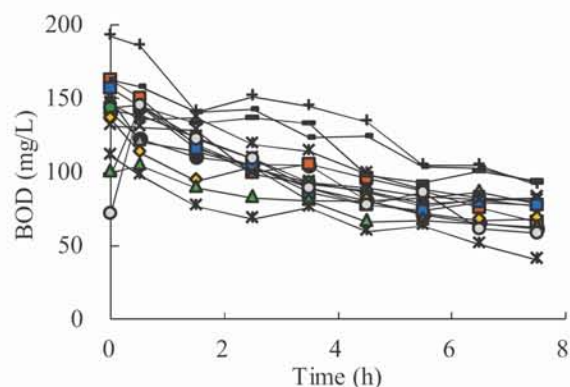


図2 浄化管による有機物（BOD）濃度の低減

力に頼らない酸素供給の促進が両立できる。

#### 4. 3 「浄化管」の実証試験

浄化管の諸特性は、実際の生活排水を用いて検討されている。たとえば長期的な維持に関しては、1 km規模の実証設備で1年半以上の運転実績があり、輸送の問題を起こすことなく、現在も継続中である[9]。浄化能力に関しては、32 mの浄化管に対して、異なる運転条件下で下水を循環させた際の有機物（生物化学的酸素要求量：BOD）濃度の挙動を図2に示した。本稿は、浄化能力に対する運転条件の影響を議論するものではないので、個別の条件（凡例）の説明は省略する。重要なのは、運転条件や下水の組成・水温が多様だったにもかかわらず、有機物の直線的な低減が常に確認されたことである。直線の傾きを浄化速度に換算すると、1 mの浄化管が1日で処理できるBODは約10 gとなった。この数値と、標準的なBOD排出量原単位（50～60 g/(人・日)）を比べると、1人分の生活排水の有機物は、およそ5～6 mの浄化管で浄化可能な量に相当する。

#### 4. 4 下水管内での水質浄化の意義

浄化管は、下水管の空間的な余裕を活かして、外部動力なしで水質浄化を実現する技術である。特に後者は、これまで困難だったエネルギー面の潜在価値（3.4）の利用であり、同様の状況にある水資源としての潜在価値（3.3）を高めるものである。通常の下水であれば、再利

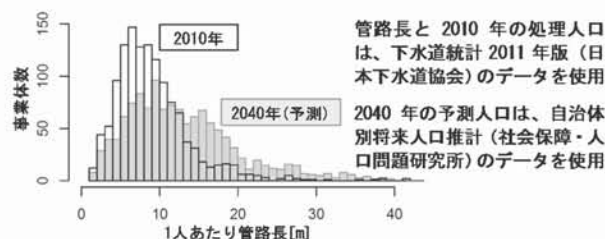


図3 現在・将来の人口あたり下水管路長（出典[8]）

用のための設備が下水処理施設と同等の高度なものになる。一方、浄化管を流下した下水であれば、凝集沈殿のような簡易な処理を施すだけで、再利用可能な水質が得られる[7]。このような特徴から、循環型水利用という社会的な要請に対して、浄化管の果たし得る役割は大きいと考えられる。また、下水管路網が処理機能の一部を担えば、末端に位置する処理施設への有機物負荷が減る。この特徴も、既存の処理施設の運転費用の削減など、大きな利点をもたらす得る。

それでは、浄化管の理論的な利点は、どの程度の実現可能性を持っているのだろうか。一つの目安として、下水道の運営事業者ごとに人口あたりの管路の長さを算出して、図3に示した。4.3において、1人分の生活排水の有機物は、およそ5～6mの浄化管で浄化可能だと述べた。多くの事業者、特に大都市以外の地域、そして過疎化の影響が大きい地域では、浄化に要する長さの2～3倍以上の管路長に達しているか、将来的に達すると予想される。したがって、現在の浄化管が持つ性能は、輸送機能を維持しつつ、処理機能の大半を担うことも可能な程度だと言える。

## 5. おわりに

処理人口の普及率が77.8%（2015年度末）に達した現在、下水道分野に対する社会的な関心は、必ずしも高くないだろう。しかしながら、下水管＝輸送という先入観にとらわれず、下水管の持つ潜在的な価値に着目することで、社会基盤としての有用性を大きく高めることができる。浄化管を一例として、さらなる技術開発の進展に期待したい。

## 謝辞

本稿の後半で述べた浄化管の研究は、著者の前所属先である東京大学大学院 新領域創成科学研究科(佐藤弘泰准教授・味埜俊教授)と、積水化学工業株式会社 環境・ライフラインカンパニー(松原善治氏・玉木聡史氏・松坂勝雄氏)との共同研究の成果である。また、実験の際には千葉県流山市駒木台第二自治会と株式会社ダイシンクリアの協力を得た。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 一般社団法人 日本下水道光ファイバー技術協会, ウェブサイト「H27 下水道光ファイバーの敷設状況」,

<http://www.softa.or.jp/06C-11fusetsu-H27.htm>,  
2016年10月閲覧

- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部, 「下水熱利用マニュアル(案)」, 2015年7月
- 3) Sydney Water, "Sewer Mining: How to set up a sewer mining scheme", July 2013
- 4) R.D. Pomeroy and J.D. Parkhurst, "Self-purification in sewers", Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Water Pollution Research, pp. 1-16, 1972
- 5) C.M. Koch and J. Zandi, "Use of pipelines as aerobic biological reactors", Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 45, pp. 2537-2548, 1973
- 6) Y. Tanji, R. Sakai, K. Miyanaga, and H. Unno, "Estimation of the self-purification capacity of biofilm formed in domestic sewer pipes", Biochemical Engineering Journal, Vol. 31, pp. 96-101, 2006
- 7) T. Shoji, Y. Matsubara, S. Tamaki, K. Matsuzaka, H. Satoh, and T. Mino, "In-sewer treatment system of enhancing self-purification: performance and oxygen balance in pilot tests", Journal of Water and Environment Technology, Vol. 13, pp. 427-439, 2015
- 8) 庄司 仁, 「In-sewer treatment system of enhancing self-purification: performance and oxygen balance in pilot tests」([7]の解説), 水環境学会誌, Vol. 39A(8), pp. 298, 2016
- 9) 玉木 聡志, 松原 善治, 松坂 勝雄, 佐藤 弘泰, 庄司 仁, 「管路内での間欠接触酸化による下水処理技術の開発(第3報)」, 下水道研究発表会講演集, Vol. 53 pp. 980-982, 2016