

汚水圧送管路の 硫化水素対策に関する研究

1. 研究目的

わが国における、近年の汚水管路整備においては、地形条件や、集水区域とポンプ場・処理場の位置関係などの地理的な制約から、費用対効果・施工の難易度等を考慮し、自然流下方式を採用した場合と比較して、管路の埋設深を浅くすることが可能な圧送方式を採用する事例が多くみられるようになった。さらに整備地域が郊外地区に移行しつつあり、結果として汚水圧送管路が長距離化する傾向がある。

汚水圧送管路における問題には、管路腐食の原因となる硫化水素（臭気）の発生と、それに起因するコンクリート腐食がある。酸素の供給が絶たれた圧送管内等では、微生物活動によって汚水中の硫化物から硫化水素、硫酸が生成される。生成した硫化水素は作業環境上の問題や、臭気の問題を引き起こす。硫酸は、コンクリート中の水酸化カルシウムと反応することによって、管の機能を損なう。

現在、硫化水素の発生を抑制する種々の対策技術が実用化されているが、実施した対策の問題点、新たに得られた知見が整理・分析されるには至っていないことや、水量、ポンプ運転状況（間欠運転か連続運転か、滞留時間の長短）、管路の縦断形等により対策効果に違いが見られることなどが判明している。

本研究は以上のような問題意識を踏まえて、硫化水素抑制技術として既に実用化されている技術から、空気注入技術、酸素注入技術、硝酸塩注入技術、ポリ鉄注入技術の四技術を取り上げ、第一に個々の技術的特徴から推奨適用条件を整理すること、第二に

設計・維持管理に関する諸問題を整理・確認し、それらを解決する設計方法を提示することを研究の目的とし、技術マニュアルをとりまとめた。

2. 研究体制

本共同研究は、(財)下水道新技術推進機構と、以下の計12者との共同で行った。

(株)荏原製作所、(株)クボタ、(株)栗本鐵工所、新明和工業(株)、大平洋機工(株)、中外炉工業(株)、(株)鶴見製作所、(株)電業社機械製作所、(株)西島製作所、日鉄鉦業(株)、日本鑄鉄管(株)、(株)日立プラントテクノロジー

3. 研究内容

3.1 技術的特徴と適用推奨条件

本研究で対象とした4種類の硫化水素抑制技術の概要を表-1に示した。硫化水素抑制技術を導入する場合は、それぞれの技術の特徴を把握し、長所を生かせる条件に適用することが重要である。

ガス注入方式は微生物の活動によって消費される酸素を、圧送管内に圧縮空気や酸素を注入し、汚水と混合させることにより補うことで、圧送管内を常に好気性に維持する方式である。注入する気体に、圧縮空気を利用する空気注入技術と、PSA装置等を用いて濃縮した酸素を利用する酸素注入技術の2種類がある。

表－1 硫化水素抑制技術の概要

	ガス注入方式		薬品注入方式	
	空気注入	酸素注入	硝酸塩注入	ポリ鉄注入
原理				
	酸化剤の投入により管内を好気化 → 硫酸還元菌による硫黄の還元を防ぐ			鉄イオンと硫化水素の 化学反応により 硫化物を固定化
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・装置が簡単 ・厳密な制御が不要 ・汚水性状変化少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・溶解量大きい ・特別な溶解装置不要 ・圧損上昇が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・長滞留時間に対応可 ・腐食/副生成物が無い ・注入装置が簡単 	<ul style="list-style-type: none"> ・即効性/持続性有り ・リン除去が可能 ・注入装置が簡単

空気注入技術は、比較的装置が簡単で、厳密な制御が不要なことから、硫化水素抑制を試みる際には、最初に導入を検討すべき技術である。しかし、下り勾配部分の延長が長くなると、圧力損失の増大が懸念され、既存設備のままでは空気注入時に所要の流量が得られない等の問題が発生する可能性がある。よって、適用にあたっては、十分な事前検討が必要である。

空気注入を実施すると圧力損失の増大が懸念され対応が困難な管路に対しては、酸素注入技術が有力な選択肢である。90%以上の高濃度酸素を汚水に注入するため、汚水への溶解効率に優れており、注入ガス体積も 1/4 以下に削減することが可能であり、管路のアップダウンが多いなどの条件に対しても圧力損失の上昇を抑えることができる。ただし、管路およびポンプの運転状況（例えばポンプの運転間隔が長い状況）によっては、理論注入量に対して 2~3 倍程度の酸素量を注入しなければ十分な抑制効果が得られない場合があり、その際は、空気注入技術と同様に、圧力損失の増大に留意しなければならない。

薬品注入方式は、硫化水素の発生を抑制する効果のある液体状の薬品を汚水に加える技術である。ガス注入方式に比較すると、少量の薬品で効果を期待できることから、相対的に硫化水素発生量が多い場合や、ガス注入方式では、圧力損失の問題で対応が難しい場合、供用初期の経過措置として導入する場合等に適した技術である。一方で、継続的な薬品の補給が必要であることや、ガス注入方式に比較して維持管理費用が高くなる場合が多いことなどの点に

留意して、適用先を検討する必要がある。

硝酸塩注入技術は、汚水中の微生物が利用する酸素の優先順位が、溶存酸素 (O_2) > 硝酸イオン (NO_3^-) > 硫酸イオン (SO_4^{2-}) の順であることを利用している。硝酸塩を汚水に追加することで、硝酸塩の還元が起こりにくい環境が保持される。圧送距離や管内滞留時間が長い条件において、抑制効果を長く維持することができ、特にその利点を発揮する。また、硝酸塩水溶液を酸素源としているため、添加量をポンプの能力の範囲で自由に増減することができる。また、添加した硝酸イオンは脱窒菌の働きで窒素ガスになるため、適切な量を注入している限りは副生成物がなく水質の変化も小さい。

ポリ鉄注入技術は他の 3 技術と異なり、抑制原理を主に鉄イオンと硫化物の化学反応によっている。そのため、上流からの硫化物の流入が多い場合や、即効性を求める場合など、既に発生している硫化水素の抑制が主目的となる場合に、選択されるべき技術である。また、ポリ鉄注入の副次効果として、下水中のリン除去がある。ポリ鉄中の鉄イオンは、汚水中の溶解性リンとも反応し、リン酸鉄としリンを不溶化する。圧送管路内で不溶化されたリンは水処理施設において主に初沈汚泥、一部は余剰汚泥に移行し、水処理へのリン負荷の低減を期待できる。

以上の技術的特徴を基に、適用を推奨する特に適した条件と避けるべき条件を表－2 にまとめた。以下に、適用を避けるべき条件とその理由について述べる。

空気注入技術は、圧損上昇が見込まれる管路およ

表-2 推奨条件

空気注入技術	
特に適した条件	避けるべき条件
・小規模ポンプ施設 (マンホールポンプ施設等)	・下り勾配部が多い ・管径が600mmを超える
酸素注入技術	
特に適した条件	避けるべき条件
・下り勾配部が多い ・滞留時間が長い	・ポンプ稼働率が低い 等の為、滞留時間が長い
硝酸塩注入技術	
特に適した条件	避けるべき条件
・供用間もない等の為 滞留時間が長い	・滞留時間が短い (30分以下)
ポリ鉄注入技術	
特に適した条件	避けるべき条件
・既に発生している 硫化物が多い	・所要注入率が200mg /Lを超える

び、管径が大きく600mmを超える場合は汚水と空気の混合が充分に行われな場合があるので、適用を避ける。酸素注入技術は、ポンプの稼働率が低く、滞留時間が長い場合などには、注入率を高くする必要が生じ、空気注入に対する利点（注入ガス体積が小さく、汚水に酸素が溶解することで、圧力損失上昇が少ない点）が失われるので、適用を避けた方がよい。

硝酸塩注入技術は、その抑制原理上、硫化水素抑制効果の発現には注入後30分程度の遅れを生じる。そのため、ポンプ井および管内の滞留時間が短い条件には適用を避ける。ポリ鉄注入技術は、所要の注入率が200mg/lを超える場合に、沈殿物の生成等が懸念されるので、適用を避ける。

3.2 課題の解決

全国8ヶ所の自治体の協力を得て、実際に様々な条件で注入運転を行う「実地試験」を行い、4技術それぞれが持つ課題の確認と、その解決に取り組んだ。検討した課題の一覧を表-3に示した。なお、硫化水素濃度の抑制目標は測定期間における平均値で10ppm以下とし、抑制に必要な理論的数量に対する倍率を「経験的係数」（空気注入技術は安全率で設定）とし調査した。

(1) 空気注入

①課題：空気注入技術は原則的に汚水ポンプの運転

表-3 実地試験による解決を検討した課題

抑制技術	課題
空気注入技術	・間欠注入時における抑制効果
酸素注入技術	・注入率算出における経験的係数 ・理論値以上の注入をした場合の圧損上昇
硝酸塩注入技術	・長滞留時間条件での注入量
ポリ鉄注入技術	・注入率算出における経験的係数

状況とは無関係に常時連続で注入運転をすることを基本としている。しかし、抑制能力に余裕がある場合は、空気注入運転を間欠的にすることで、抑制能力を損なわない範囲で消費電力の低減が期待できる。本研究では、間欠注入時の抑制効果について確認した。

②試験結果：無注入時に平均67ppmであった硫化水素が、空気注入によって平均1ppm以下まで低減した。図-2に示したように、間欠注入の場合は最大濃度が顕著に上昇するものの、平均濃度は0.49ppmと1ppm以下に抑えられ、十分に硫化水素抑制能力を保持できることを確認した。

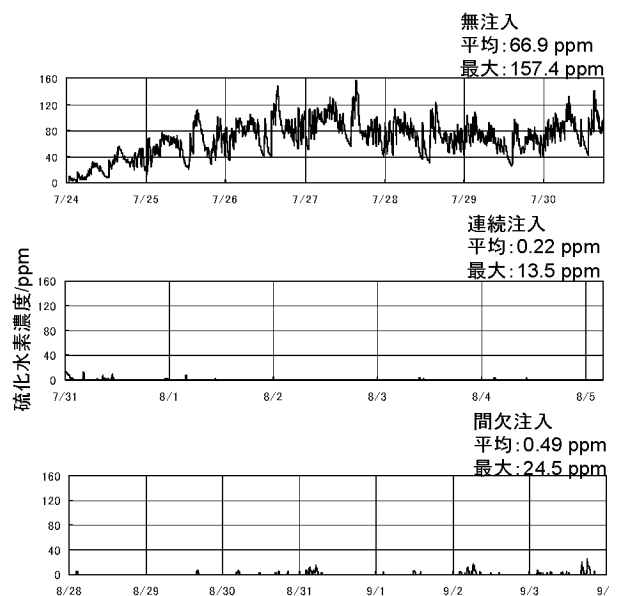


図-2 間欠注入による硫化水素抑制効果

③得られた知見：供用済の空気注入設備で硫化水素濃度を十分に低く抑えられている実績のあるポンプ場、あるいは、冬季などの硫化水素発生が少ないことが確認されている場合には、注入空気量の

削減だけでなく、抑制能力を確認しながら間欠運転の実施を行うことで、消費電力の削減を図ることが有効である。

(2) 酸素注入

①課題：酸素注入技術の注入率は、基本的に管内の浮遊バイオマスおよびバイオフィームによる酸素の消費量Wを概算する式(1)に従って決定される。

$$W = \left(Rr + 4 \frac{Re}{D} \times 10^{-3} \right) \quad (1)$$

ここで、Rr は浮遊バイオマスの酸素消費量、Re は、バイオフィームの酸素消費量、Dは管径である。ただし、理論式における注入率では、ポンプの発停間隔が長い場合などに、抑制効果が十分ではない場合があることが分かっている。また、過剰に酸素を注入すると、空気注入の場合と同様に、圧力損失の増大（ポンプ吐出量の低下）を招く恐れがある。空気注入では理論注入率に掛ける倍数である「経験的係数」と、経験的係数が1以上の状況における圧力損失上昇状況について調査した。

②試験結果：図-3に圧送管路長が1km程度のポンプ場における試験結果、図-4に圧送管路長が4km程度のポンプ場における試験結果を示した。特に圧送管路長が長い図-4では冬季には通常注入（理論値：経験的係数=1, 6.4m³N/h）で十分に効果が得られている場合でも、夏季には理論式の2.3倍（15m³N/h）を注入しても抑制目標（平均値で10ppm以下）を達成できない場合があった。一方で図-5に示したように、15%程度の圧力損失の増加が見られた。

③得られた知見：特に圧送管延長が長い場合には、酸素の過剰注入を当初から検討することが必要であり、経験的係数が2を超える条件においては、圧力損失の上昇が見られる場合もあるので、その

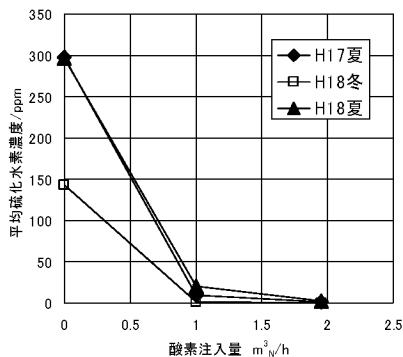


図-3 酸素注入の抑制効果 (L=1km)
(経験的係数=1 : 1.9m³N/h)

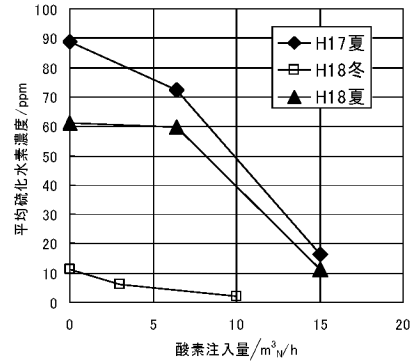


図-4 酸素注入の抑制効果 (L=4km)
(経験的係数=1 : 3.0, 6.4m³N/h)

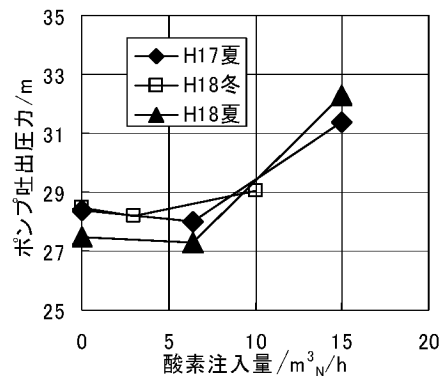


図-5 酸素注入の圧損上昇 (L=4km)
(経験的係数=1 : 3.0, 6.4m³N/h)

点を十分に考慮した設計・運用が必要である。

(3) 硝酸塩注入

①課題：硝酸塩注入においては管内滞留時間が長い場合に、既存の経験式による注入率との乖離が大きくなることがわかっており、その点の定量的な調査を行った。

②試験結果：図-6は4km以上の長い圧送管を持つポンプ場での調査結果である。経験式（予測値の0.55で硫化水素抑制）から得られる注入率は120~200kg/日程度であるが、夏冬ともに、必要な注入量が、その4~6割程度となることがわかった。

③得られた知見：24時間を越える滞留時間を持つ場合は、経験的係数(0.55)を修正し0.4を採用する必要がある。

(4) ポリ鉄注入

①課題：ポリ鉄注入技術は、表-1にも示したように、鉄(III)イオン(Fe³⁺)と硫化物イオン(S²⁻, HS⁻)の中和反応によって、汚水中の硫化物を固定化するものである。よって、ポリ鉄注入率の決定は、基本的に汚水中硫化物イオン濃度に対して化学量論的に行う。

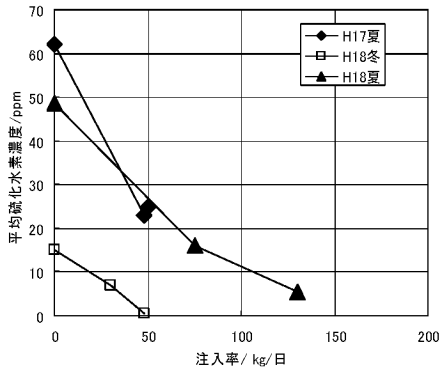


図-6 硝酸塩注入の抑制効果(L=4km)
(経験的係数=0.55、120~200kg/日)

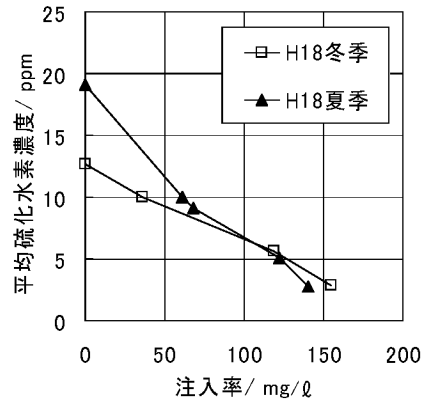
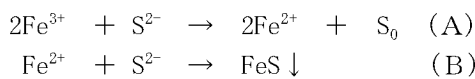


図-8 ポリ鉄注入の抑制効果2



式(A), (B)より硫化物イオン 1mol に対して, 2/3mol の鉄イオンを添加すれば良いことがわかるが, 汚水中には硫化物イオン以外にも鉄イオンを消費する物質が多く存在しているため, 理論量を注入しているだけでは, 鉄イオンが不足し, 硫化水素抑制効果が小さくなる。よって, ポリ鉄注入技術では理論注入量に対する倍数「経験的係数」をどの程度とすれば抑制効果が十分であるのかを定量的に検討した。

- ②試験結果: 図-7に, 調査期間中の平均 BOD:280mg/l程度, 図-8に調査期間中の平均 BOD:180mg/l程度のポンプ場における結果を示す。硫化水素の低減目標である平均硫化水素濃度 10ppm に対応する, 注入率は図-7, 図-8より, それぞれ 25~75mg/l, 40~70mg/l となった。
- ③得られた知見: これらの 10ppm 以下に抑制するために必要な注入率と, 式(A), 式(B)から理論的に導かれる注入率の関係を図-9に示す。経験的係数は 4~6 の範囲に概ね収まっていることがわ

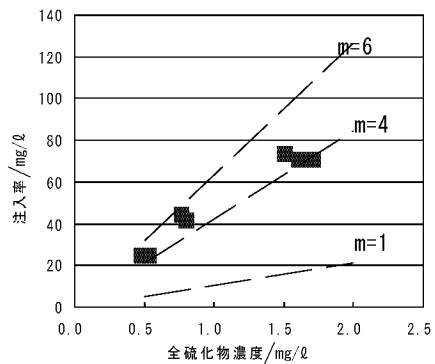


図-9 ポリ鉄の経験的係数の検討

かった。

4. 技術マニュアルの構成

マニュアルは, 本編と資料編からなり, 構成は以下のとおり。

第1章 総 則

- 第1節 目的・適用範囲
- 第2節 用語の定義

第2章 汚水圧送管路における腐食対策の概要

- 第1節 汚水圧送管路における
コンクリート腐食
- 第2節 汚水圧送管路における
コンクリート腐食対策技術の概要
- 第3節 汚水圧送管路における
硫化水素抑制技術の概要

第3章 設備の概要

- 第1節 ガス注入方式
- 第2節 薬品注入方式

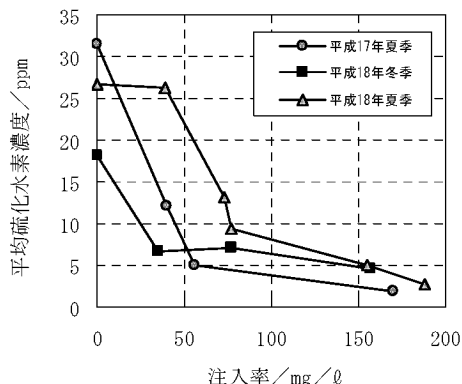


図-7 ポリ鉄注入における抑制効果1

第 4 章 設備の計画

- 第 1 節 設備計画の基本方針
- 第 2 節 計画検討

第 5 章 空気注入技術

- 第 1 節 空気注入設備の設計
- 第 2 節 空気注入設備の施工
- 第 3 節 空気注入設備の維持管理

第 6 章 酸素注入技術

- 第 1 節 酸素注入設備の設計
- 第 2 節 酸素注入設備の施工
- 第 3 節 酸素注入設備の維持管理

第 7 章 硝酸塩注入技術

- 第 1 節 硝酸塩注入設備の設計
- 第 2 節 硝酸塩注入設備の施工
- 第 3 節 硝酸塩注入設備の維持管理

第 8 章 ポリ鉄注入技術

- 第 1 節 ポリ鉄注入設備の設計
- 第 2 節 ポリ鉄注入設備の施工
- 第 3 節 ポリ鉄注入設備の維持管理

資料編

1. 参考資料
2. 設計事例
3. 実地調査結果
4. アンケート調査結果
5. 納入実績
6. 圧送式下水道関連製品事例
7. 積算資料(案)
8. 資料の問い合わせ先

5. まとめ

本研究により、従来からの問題点を解決し、汚水圧送管路における効率的な硫化水素抑制対策が行える技術マニュアルを作成することができた。技術マニュアルが、圧送管路における硫化水素発生問題を解決し、効率的な維持管理に役立つことを期待する。

●この研究を行ったのは

- 研究第二部長
- 研究第二部総括主任研究員
- 研究第二部総括主任研究員
- 研究第二部研究員

- 松浦 將行
- 目黒 享
- 依岡 克幸
- 守屋 由介

●この研究に関するお問い合わせは

- 研究第二部長
- 研究第二部副部長
- 研究第二部総括主任研究員
- 研究第二部研究員

- 松島 修
- 目黒 享
- 依岡 克幸
- 守屋 由介