

■ 論文 ■

空気注入式圧送管路における硫化物生成に及ぼすポンプ施設の運転条件の影響

伊藤 杉山

歩潤**

相澤 治郎***
海田 輝之****

要 旨：空気注入式圧送管路での硫化物生成に及ぼすポンプ施設の運転条件の影響を検討した。北上川上流流域下水道都南処理区雫石幹線の圧送管路では、理論的な必要量以上の空気を注入しているが、圧送管路開放部での気相の硫化水素濃度が50ppm以上に達する場合が頻繁に生じており、また、下水の送水停止時間が長くなると硫化水素濃度が高くなる傾向がみられた。圧送管路の流出下水は、溶存酸素濃度が0.5mg/lを下回り、全硫化物濃度が1mg/lを上回る場合がしばしばみられたが、空気注入量の増加により、溶存酸素濃度が上昇し、全硫化物濃度が0.2mg/l以下に抑えられた。一方、通常空気注入量では、送水停止時間が15分、30分、60分と長くなるにしたがい、溶存酸素濃度が低下し、全硫化物濃度が上昇することが分かった。したがって、気相の硫化水素濃度を極力低下するためには、空気注入量を増やすことやポンプの運転停止時間を短く抑えるように送水ポンプの運転条件を変更することが必要である。

キーワード：圧送管路、空気注入法、硫化物生成、ポンプ施設、運転条件

1. はじめに

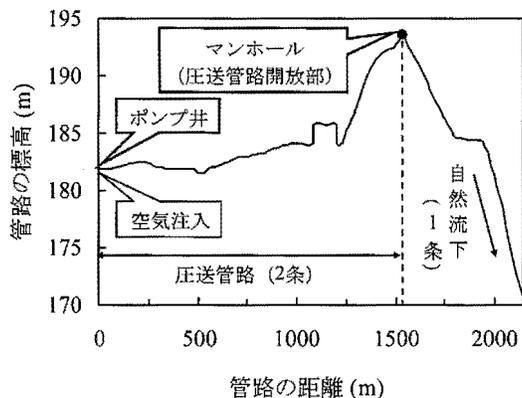
長距離圧送管路内において下水が嫌気状態になると、下水中の硫酸塩が硫酸塩還元細菌によって還元され、硫化物が生成する。圧送管路内で生成した硫化物の一部は、マンホールや着水井などの開放部において硫化水素として放散し、これが悪臭や腐食の原因となっている。このような問題を改善するために、圧送管への空気や酸素の注入による下水の好気化や薬品添加による硫化水素の発生抑制などが検討されている¹⁾。本研究で対象とした北上川上流流域下水道都南処理区雫石幹線の繋ポンプ場においても、平成8年度から空気注入による対策が行われている²⁾。その後、10年

ほど経過し、ポンプ場への下水の流入量が増加してきており、圧送管路後の自然流下区間での臭気に対する苦情も報告されている。

以上の背景から、本研究では、繋ポンプ場を対象とし、空気注入設備の運転条件を再検討する際の基礎的情報を得るために、ポンプ井と圧送管路開放部において、気相の硫化水素と下水の水質を調査し、圧送管路内での硫化物の生成とポンプの運転条件との関連性について検討した。

2. 調査場所及び空気注入の概要

図-1に繋ポンプ場から下流における下水管路の概要を示す。繋ポンプ場に流入した下水はポンプ井から間欠的に圧送され、その直後に圧送管は



図一 下水管路の概要

2条（各々φ300mm）に分岐し、それぞれの管に空気注入が連続的に行われている。圧送管路の延長は約1500mであり、圧送管路開放部のマンホールにおいて1条に合流し、その後は自然流下する。ポンプ場における汚水送水量は、平均すると約4.1m³/minであり、平成8年度の調査時での2.4m³/minに比べて増加している。空気注入量は通常2条分で0.50～0.55Nm³/minであり、平成8年度の調査時での注入量とほとんど変化していない。下水量に対する空気注入量の比率は、空気注入量を0.50Nm³/minとすると0.12m³/m³となる。汚水送水量を1条当たり2.05m³/min、管径を0.3m、管路長を1534mとし、圧送ポンプの連続稼働時での圧送管路内における下水の水理的滞留時間を以下の計算式より求めると53minとなる。

$$H = \pi \cdot D^2 \cdot L / (4 \cdot Q_m) \quad (1)$$

H：水理的滞留時間 [min]

Q_m：汚水送水量 [m³/min]

D：管径 [m]

L：管路長 [m]

繋ポンプ場では通常ポンプが1台のみで運転することが多いが、下水の流量が増えた時やフラッシングの際はポンプが同時に2台もしくは3台稼働する（No.1ポンプ流量（4.1m³/min）、No.2（4.2m³/min）、No.3（2.9m³/min））。この時は通常より流量が増え、1条あたり5.6m³/min程度の値を示し、この流量での滞留時間は19[min]となる。

USEPAの設計マニュアル³⁾では、圧送管への空気注入量の経験則として、下水流量に対する空気注入量の比率を0.75～2.25m³/m³あるいは管

径（cm）当たりの空気注入量を0.7～1.3m³/hとしている。現状の繋ポンプ場では、下水と空気の流量比は前述のように0.12m³/m³、管径当たりの注入量は0.5m³/hであり、上記の経験則の値と比べると低いことが分かる。

一方、Boon⁴⁾は下水温度15℃での下水の流水による酸素消費速度（R_p）を6mg/l/h、圧送管の壁面に存在する生物膜による酸素消費速度（R_c）を700mg/m²/hとし、圧送管路内での酸素消費量を以下の計算式で示している。

$$C_0 = (6 + 2.8/D) \cdot \{ \pi \cdot D^2 \cdot L / (4 \cdot Q_h) \} \cdot 1.07^{(T-15)} \quad (2)$$

C₀：酸素量 [mg/l]

Q_h：汚水送水量 [m³/h]

T：10-20℃の範囲内での下水温度 [℃]

佐藤らの報告⁵⁾に示されているように、空気中の酸素濃度を21%（v/v）とし、式(2)の酸素消費量を下水の嫌気化を防ぐための各水温における必要空気注入量に換算すると以下ようになる。

$$Q_a = (6 + 2.8/D) \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L \cdot 1.07^{(T-15)} / 72000 \quad (3)$$

Q_a：下水温度T℃で消費される酸素量に相当する空気注入量 [Nm³/min]

ここで、雫石幹線の圧送管路について、管径を0.3m、管路長を1534m、下水温度を20℃と仮定して空気注入量を計算すると、0.13Nm³/minとなる。繋ポンプ場における送気量は、通常値として0.50～0.55 [Nm³/min]であり、この半分の量の空気が1条の圧送管に注入されていることから、下水温度が20℃程度の場合は、上記の計算値の約2倍量を注入していることになる。ただし、この計算値は、式(2)から分かるように圧送管路内における下水の滞留時間に対する消費量の推定値であり、間欠運転において下水が管路内に停滞している間の酸素消費量は考慮されていない。また、下水の停滞時は管路内に注入された空気が管路の末端部まで行き渡るとは考えにくい。従って、圧送管路内での下水の停滞時間が長くなれば、必要とされる空気量も増大し、空気注入量が十分であるとは言い難い状況も生じると考えられる。

3. 調査方法

本調査では、圧送管路開放部のマンホール内に

における気相の硫化水素濃度の変化とポンプの運転状況との関連性を調べるために、マンホール内に硫化水素メーターを設置し、2005年11月28日～12月7日では5分毎、2007年1月17日～26日では1分毎にそれぞれ硫化水素濃度を計測した。

下水の水質を把握するために、2005年11月28日、12月7日、2006年10月11日、11月13日、12月20日、2007年1月17日の計6回調査を行い、ポンプ井と各圧送管路の開放部（合流前）において採水を行った。2005年11月と12月の調査では、1日に2回ランダムに採水した。2006年10月の調査では通常通りの運転条件下でポンプ稼働開始直後から稼働中において経時的に採水した。2006年11月の調査では、2条の圧送管のうち右側（山側）の圧送管への空気注入を止め、全ての空気を左側の圧送管に注入し、10月と同様に採水した。

2006年12月と2007年1月の調査に関しては右側の圧送管の送水を強制的にそれぞれ15分間、30分間及び60分間止め、その後送水を開始して経時的に採水を行った。

測定項目は、水温、pH、ORP、DO（ウィンクラーアジ化ナトリウム変法）、COD（ニクロム酸カリウム法）、全硫化物（メチレンブルー吸光度法）及び硫酸イオン（比濁法）とした⁶⁾。

4. 調査結果及び考察

(1) ポンプの運転状況とマンホール内の硫化水素濃度との関係について

ポンプの運転状況と圧送管路開放部のマンホール内の硫化水素濃度の変化について、2005年12月4日と2007年1月18日を例として図-2に

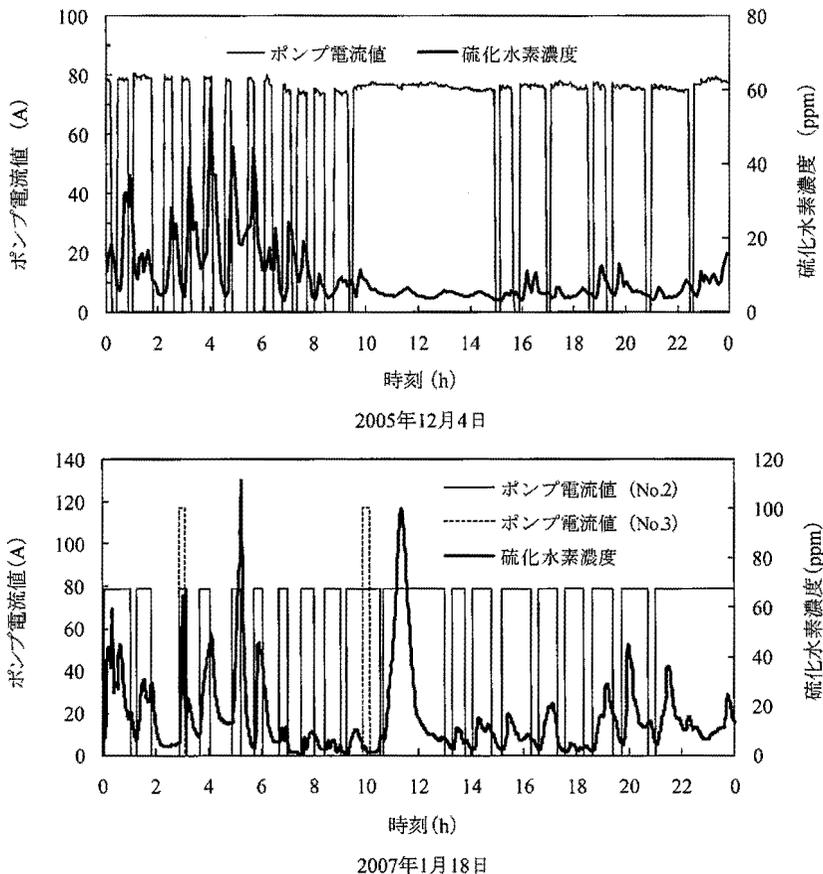


図-2 ポンプの運転状況と硫化水素濃度の変化の例

示す。図中の硫化水素濃度は、2005年12月4日では3～75ppm、2007年1月18日では0.5～130ppmと幅広く変動していることが分かる。これらの日以外でも硫化水素濃度は頻繁に変動し、一時的に高い値を示した。ポンプの電流値が0になっている部分は、ポンプの運転停止（送水停止）を表している。間欠的なポンプ稼働時毎の硫化水素濃度の変化は、ポンプの稼働開始後に増加し、例外もあるがポンプの稼働中に減少する傾向がみられた。この傾向は佐藤ら⁵⁾や伊藤⁷⁾の報告と一致している。一方、ポンプが連続運転している日中の数時間は硫化水素濃度が低く、その変化もあまりみられなかった。なお、2005年度の水質調査において検知管で溶存硫化物を測定したところ、圧送管路開放部において1mg-S/l以上を示す場合がみられた。溶存硫化物濃度が1mg-S/lの場合、平衡状態での気相の硫化水素濃度はヘンリー法則を適用すると124ppmになり⁸⁾、マンホール内における気相の硫化水素濃度がこのような濃度に達するポテンシャルは十分にあると言える。

調査期間中における1回毎の送水停止時間（図-2に示した1回あたりの電流値ゼロの継続時間）と、送水開始後における気相の硫化水素濃度の最大値（図-2に示したポンプ稼働開始から次のポンプ稼働までの間に生じた硫化水素濃度のピーク値であり、2つ以上のピークがある場合は最も大きいピークを採用した）との関係を図-3に示す。なお、2007年1月19日～23日の間は毎日0時から14時過ぎまでのポンプのデータが欠損していたため、2006年度では

その分のデータは含んでいない。

図を見ると、送水停止時間は10～20分の範囲に集中しており、その際の最大硫化水素濃度は2～110ppmと幅広く分布している。この結果から、本圧送管路では空気注入による硫化物生成の抑制が必ずしも十分に行われていないことが分かる。一方、停止時間が長くなると、硫化水素濃度が低い値を示す場合もあるが、高い値を示す傾向がみられた。これは、管路内に停滞している下水中のDOがより多く消費されて下水が嫌気状態となり、硫化物の生成が進み易くなり、圧送管路開放部における硫化水素の放散が増加したためと考えられる。

(2) 水質について

1) ポンプ井

ポンプ井における水温は、2006年度を例に述べると、10月が約23℃、11月が約22℃、12月が約19℃、1月が22℃であった。水質は、6回の調査日（採水回数の合計:11回）を合わせて、pHが6.6～7.6（平均:7.0）、ORPが-26～269mV（平均:152mV）、DO濃度が0.3～2.7mg/l（平均:1.4mg/l）、全硫化物濃度が0.11～0.86mg/l（平均:0.24mg/l）、硫酸イオン濃度が33～92mg/l（平均:65mg/l）、COD_{Cr}濃度が150～500mg/l（平均:300mg/l）であった。繫ポンプ場は繫温泉施設の廃水を受容しており、硫酸イオン濃度の平均値が一般的な報告例¹⁾と比べて若干高めではあるが極端に高いわけではなかった。

2) 空気注入の効果

図-4に2006年10月11日と同年11月13日

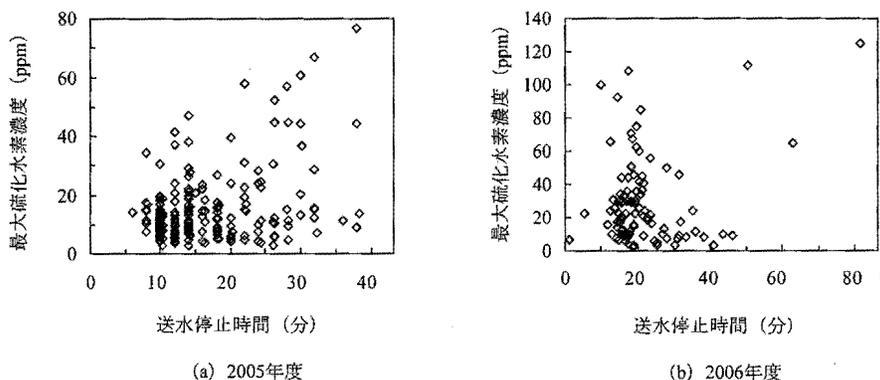


図-3 ポンプ停止時間と最大硫化水素濃度との関係

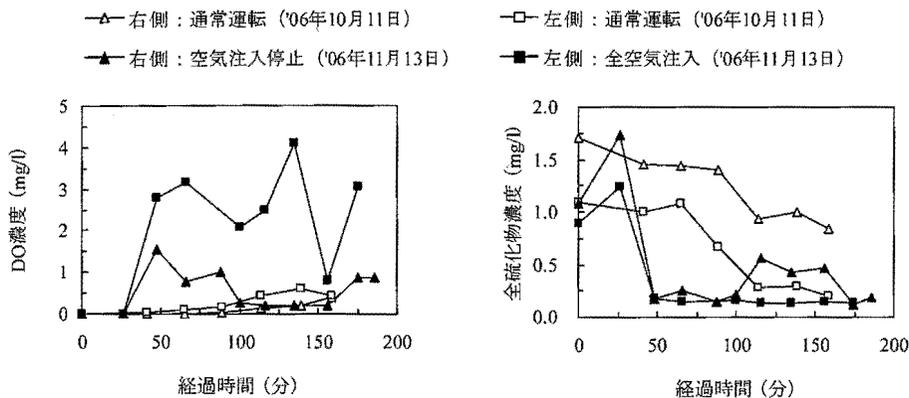


図-4 空気注入の有無における下水の水質の経時変化

に行った圧送管路開放部での下水の水質調査結果を示す。なお、横軸の経過時間は、間欠運転におけるポンプの稼働開始直後からの連続稼働時間を示しており、その間のポンプの停止はなかった。10月の調査では通常運転での採水を行い、11月の調査では右側の圧送管への空気注入を止めて供給されている空気を全て左側に注入した。なお、グラフの初期値は、ポンプの稼働直後の値を示している。

通常運転で採水した10月の調査では、左右どちらも溶存酸素濃度が1 mg/l以下の低い値を示した。一方、11月の調査では全体的に10月より高い値を示したものの、左右で大きな違いがみられた。空気注入を止めた右側は1.6 mg/l以下であったが、通常より多く空気注入が行われた左側では最大で4.1 mg/lを示した。同条件で左右を比較した10月の調査においても左右で多少の濃度の差はあったものの、11月の結果をみると、明らかに差が生じており、空気注入量を増加した効果がみられた。

全硫化物濃度は、10月では溶存酸素濃度が低かった右側において全体的に高い値を示した。11月では右側で溶存酸素濃度が低下した116分～156分の間で全硫化物濃度が増加したが、溶存酸素が供給されている左側では全硫化物濃度は増加せず、空気注入の効果が確認できた。10月の通常運転と11月の空気注入停止で経過時間50分以後での全硫化物濃度を比較すると、10月の方が高くなっているが、これは10月の方がDO濃度

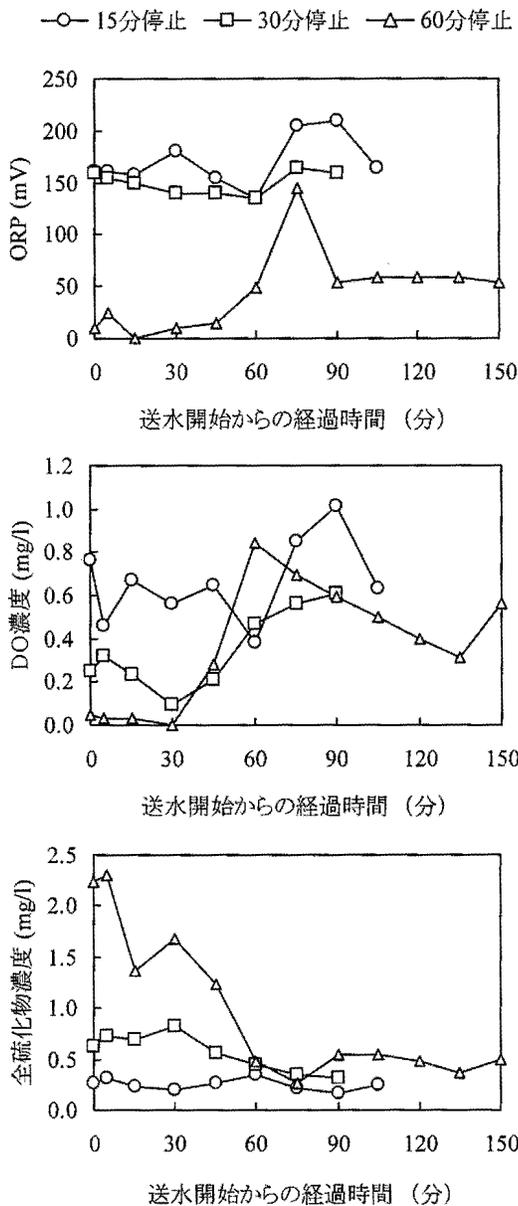
が低く、嫌気的な状態であったためと考えられる。

3) 送水停止時間が下水の水質に与える影響

図-5に2006年12月～2007年1月に行った圧送管路開放部での下水の水質調査結果を示す。データは、凡例に示した送水停止時間の経過後に連続送水を行った場合の値を示している。なお、圧送管路内での下水の滞留時間は上述のように53分であり、図中の経過時間60分以降は圧送管内で停滞せずに常に流れていた下水の水質を反映していると考えられる。

まず、ORPに着目すると、送水停止時間15分や30分に比べて60分の時に、最も下水が還元状態にあったことが分かる。次に、DO濃度の変化に着目する。ポンプ井のDOは15分停止の場合で0.4 mg/l、30分停止の場合で1.2 mg/l、60分停止の場合で0.3 mg/lであった。送水開始直後のDOは、15分停止の場合で一番高い値を示し、一方、停止時間60分では0.05 mg/l以下となりDOの消費が顕著であった。これは、長時間にわたり停滞した下水において、より多くのDOが消費されたためと考えられる。経過時間30～60分にかけてDOが増加しているのは、送水停止中も空気注入を行っているため、酸素の供給を受けている部分の下水が送水開始後に流出したと推測される。

全硫化物の濃度は、送水開始直後に15分停止の条件で0.26 mg/lと低い値を示し、30分停止では0.62 mg/l、60分停止では2.2 mg/lとなり、停止時間が長くなるにつれて高い値を示した。圧送管路に停滞していない60分以降についての値は



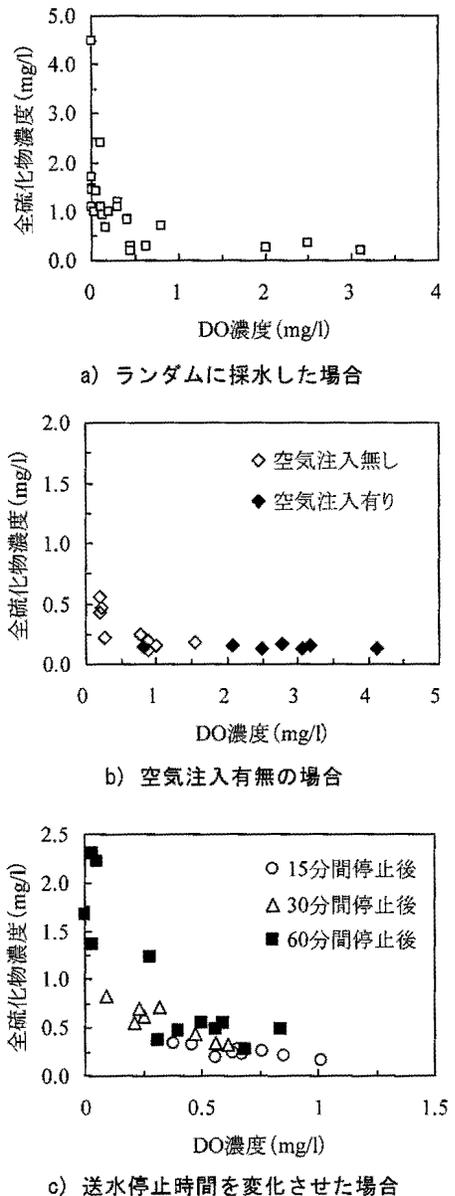
図一五 送水開始後における下水の水質の経時変化

すべて0.6mg/l以下であった。

以上の結果から、繋ポンプ場では連続的な空気注入が行われているにもかかわらず、下水が圧送管路内で長時間停滞することで、硫酸塩還元細菌による硫化物の生成量が増加することが示された。

(3) 考察

図一六に圧送管路開放部における下水のDO



図一六 DO濃度と全硫化物濃度との関係

濃度と全硫化物濃度との関係について、a) ランダムに採水した場合 (2005年11月及び12月と2006年10月), b) 管路右側に空気注入を行わず、左側に全空気を注入した場合 (2006年11月), c) 送水停止時間を変化させた場合 (2006年12月と2007年1月) をそれぞれ示す。

全体的には、溶存酸素濃度の低下に伴い全硫化

物濃度が増加する傾向がみられた。溶存酸素濃度が0.5mg/l以上になると、全硫化物濃度が0.5mg/l以下の低レベルとなる頻度が増し、これまでに報告されている傾向⁸⁾と一致している。

ランダムに採水した場合をみると、前述のようにDO濃度が0.5mg/l以下となるケースがしばしばみられ、その際には全硫化物濃度が1mg/l以上となり、雫石幹線では空気注入の効果が常にみられるとは言い難い結果であった。空気注入有無の場合をみると、空気注入量の増大により、DO濃度が全て0.8mg/l以上の値を示した。送水停止時間を変化させた場合では、停止時間が長い場合に全硫化物濃度が高くなる傾向がみられた。

佐藤ら⁵⁾は宮城県柴田郡川崎町に位置する約3500mの圧送管路(管径:350mm)において、空気注入による硫化水素の抑制効果について検討しており、空気注入により管路の始点から約1000mの地点と末端部との間では溶存酸素濃度が2mg/l以上を維持しており、全硫化物濃度は0.2mg/l以下であったことを報告している。この圧送管路に対する必要空気注入量は式(3)を用いて計算すると0.26 Nm³/min(下水水温:15℃)となるが、実際にはこの量の半分(0.13 Nm³/min)でも上述のような水質結果であった。

一方、泉⁹⁾は福井県九頭竜川流域下水道における約6,200mの圧送管路(呼び径:400mm)での空気注入効果を検討している。この場合の必要空気量の計算値は0.79 Nm³/min(下水水温:20℃)であり、実際には1.02 Nm³/min(計算値の約1.3倍)に設定することにより、管路末端での溶存硫化物濃度を0.1mg/l以下に制御できることを報告している。

上述の報告例と通常時での繋ポンプ場における必要空気注入量の計算値に対する実際の値の倍率を比較すると、繋ポンプ場の場合が最も大きい値(2倍)になるが、管路末端部において気相の硫化水素濃度が50ppm以上になる場合やDO濃度が0.5mg/lを下回る場合がしばしばみられた。この原因としては、雫石幹線の圧送管路では流水や生物膜の酸素消費速度が上記の定数をかなり上回る場合があることや注入された空気中の酸素が有効に使われていないことなどが考えられる。

5. ま と め

雫石幹線における圧送管路への空気注入量は式(3)より求めた必要量よりも多いにもかかわらず、圧送管路開放部のマンホールでは気相の硫化水素濃度が50ppmを超える場合があり、送水停止時間が長くなると、送水開始後の硫化水素濃度が高くなる傾向がみられた。また、圧送管路開放部からの流出下水のDO濃度が0.5mg/lを下回る場合がしばしばみられ、送水停止時間が長くなるにつれて全硫化物濃度が増加する傾向がみられた。しかしながら、空気注入量を増加することにより、DO濃度の低下は改善された。従って、今後、気相の硫化水素濃度を極力低下するためには、空気注入量を増やすことやポンプの運転停止時間を短く抑えるように送水ポンプの運転条件を変更することが必要である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、当時岩手大学工学部建設環境工学科環境衛生工学研究室の4年生であったエズディアナ アフニ氏と鈴木 貴之氏の多大な協力を得た。ここに記して謝意を表します。

〈参 考 文 献〉

- 1) 日本下水道事業団 技術評価委員会 (2001) 下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術の評価に関する報告書
- 2) 咲山直民, 山崎公広, 奈良信一 (1997) 空気注入による圧送管内の硫化水素抑制に関する実験報告, 第34回下水道研究発表会講演集, pp.322-324
- 3) USEPA (1985) Design manual, Odor and corrosion control in sanitary sewerage systems and treatment plants, EPA/625/1-85/018
- 4) Boon, A. G. (1995) Septicity in sewers: causes, consequences and containment, Water Science and Technology, Vol.31, No.7, pp.237-253
- 5) 佐藤典敬, 能勢正樹, 越智孝敏, 堀江崇 (1999) 空気注入による硫化水素抑制手法に関する

- 調査事例, 下水道協会誌, Vol.36, No.446, pp.148-160
- 6) (社)日本下水道協会 (1997) 下水試験方法 上巻- 1997年版-
- 7) 伊藤岩雄 (2002) 管路施設における健全度診断技術および劣化評価方法, 下水道協会誌, Vol.39, No.477, pp.52-55
- 8) 越智孝敏, 田中修司, 田中直也, 三品文雄, 森田弘昭 訳 (2004): 下水道管渠内反応-生物・化学的処理施設として, 技報堂出版
- 9) 泉宏導 (1999) 圧送方式の維持管理の事例, 月刊下水道, Vol.22, No.2, pp.57-60 (20.7.14 受付)



* (いとう あゆみ)
岩手大学大学院工学研究科
フロンティア材料機能工学専攻



*** (あいざわ じろう)
岩手大学技術部工学系技術室



** (すぎやま じゅん)
(株)岩手県下水道公社



**** (うみた てるゆき)
岩手大学工学部建設環境工学科

Abstract

Influence of Operating Conditions in a Pump Facility on Sulfide Generation in Force Mains with Air Injection

Ayumi Ito, Jun Sugiyama, Jiro Aizawa, Teruyuki Umita

The influence of operating conditions in the pump facility on sulfide generation in the force main was investigated in the Shizukuishi trunk sewer. In the manhole at the end of the force mains, hydrogen sulfide concentrations in a gas phase were often higher than 50ppm and they tended to be increased by longer intervals of the pump, although air exceeding theoretical requirement is being injected. Sewage discharged from force mains often had dissolved oxygen concentrations less than 0.5mg/l and total sulfide ones higher than 1mg/l. However, an increase in air injection volume resulted in increases in dissolved oxygen and decreases in total sulfide. Longer intervals of sewage supply to the force mains were found to cause lower dissolved oxygen and higher total sulfide under conventional air injection volume. It is suggested that alteration of operating conditions such as air injection volume and interval of sewage supply is necessary to control the release of hydrogen sulfide into the manhole.