

◆特集：「ストック・メンテナンスの世紀」への対応◆

下水道管路施設の効率的な維持管理手法の現状

岡本辰生* 吉田綾子** 山田和弘*** 行方 馨**** 森田弘昭***** 藤生和也*****

1. はじめに

我が国の下水道普及率は平成15年度末に67%となり、これまでに整備された下水道管路総延長は35万9千km（H14年度末）に達する。今後は中小都市を中心とした更なる普及促進と同時に、整備された地域では、情報伝達やエネルギー回収ネットワーク等としての活用が期待されている。これらの新しい使命に応えるには、管路ストックを健全な状態で活用していく努力がますます重要となる。

維持管理が不十分な管路では、管路の破損による道路陥没など重大な事故が発生する可能性があり、事実、大都市を中心としてそのような事故の報告例が増えている。全国の自治体を対象に管路の改修工事の現状を調査した結果¹⁾、管路の破損症状は、腐食、クラック、管壁の破損、管断面の変形、継手のズレ、タルミ・蛇行、木の根侵入など様々であった。これらの破損症状のひとつである腐食は、圧送管路における高濃度の硫化水素生成が原因で発生する 경우가多く、圧送管路の敷設延長が増加している現在、硫化水素腐食に対する意識は高まりつつある。図-1に示すとおり、圧送管路の総延長は年々延びており、平成14年度末の敷設延長はおよそ4,700kmであり、全管路施設の1%強を占めている。下水道整備の中心が中小市町村に移った現在、効率的な下水道整備を進め

る上で管路敷設に地形の制約を受けない圧力式下水道の採用は今後もますます増加するものと予想されることから、これら圧送管路における硫化水素生成を制御する技術開発が必要といえる。

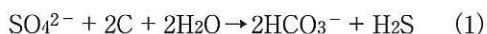
本稿では、まず圧送管路における硫化水素生成と管路腐食のメカニズムについて述べ、次に硫化水素腐食対策技術について、その現状を解説する。さらに、効率的な維持管理方法を設定するために必要となる硫化水素生成位置の予測手法として、著者らが解析を試みている下水性状（有機物組成および硫化物濃度）変化に基づく、数式モデルの手法について述べる。

2. 硫化水素腐食のメカニズム^{2)~4)}

下水道施設に特有のコンクリート腐食は、(1) 硫酸イオン存在下での嫌気状態の下水および汚泥中における硫酸塩還元細菌による硫酸塩からの硫化物の生成、(2) 液相から気相への硫化水素ガスの放散、(3) コンクリート構造物の気相部内面の結露水中での好気性硫黄酸化細菌等による硫化水素からの硫酸の生成、(4) 硫酸とコンクリート中の成分との反応によるコンクリートの劣化、の四段階からなる生物・化学反応および物理作用の複合現象である。以下に各段階で起こる反応について解説する。

(1) 硫化物の生成（生物学的作用）

下水が嫌気状態におかれると、管底の堆積物や管壁に付着した生物膜中に棲息する硫酸塩還元細菌が活性化し、下水中の硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）が硫化物（ H_2S ）へと還元される（式（1））。



硫酸塩還元細菌は硫酸イオンを酸素源（水素受容体）とし、生物分解性の高い有機物（乳酸、プロピオン酸、酢酸）を食糧源（水素供与体）として利用する。一般に下水中には上水、屎尿、洗剤等に由来する硫酸イオンが、30~80mg/L程度含

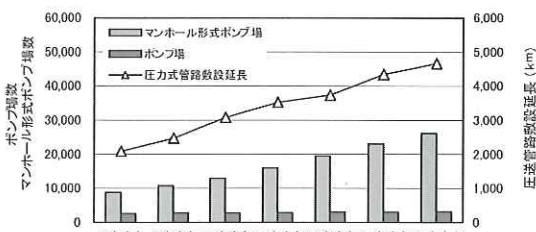


図-1 ポンプ場数ならびに圧送管路敷設延長

まれるため、硫化物生成速度の決定要因が硫酸イオンとなることは少ない。硫酸塩還元細菌は、水温が15～45℃、pHが5.5～9.0の環境で極めて普遍的に存在するが、硫酸塩還元細菌による硫酸イオンの還元は、下水中に酸素や硝酸イオンが存在する場合には生じない。

(2) 硫化水素の放散 (物理的作用)

一般的な下水の場合、全硫化物の大部分 (70～90%) は溶存硫化物で占められる (図-2)。

溶存硫化物の各形態 (H₂S、HS⁻、S²⁻) の間には可逆反応が成り立ち、その存在比率は常にpHに応じた平衡状態を保つ (図-3)。

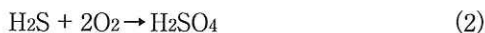
下水中に存在する硫化物の中で、分子態硫化物である硫化水素分子 (H₂S) は揮発性が高く、流れの乱れなどがあると容易に大気中へ放散する。このため、マンホール部の段差や圧送管の吐出口等では、大量の硫化水素 (H₂S) が下水中から大気中に放散される (図-4)。

大気中の硫化水素濃度は、気体の圧力と液体に溶解する気体質量との間の比例関係 (ヘンリーの法則) に基づいて、平衡状態となるところで大気

中の硫化水素ガス濃度の上昇が停止する。大気中の硫化水素濃度と溶存硫化水素濃度の気液平衡関係の例を図-5に示す⁵⁾。水温が高いほど、また溶存硫化水素濃度が高いほど硫化水素ガス濃度は高くなる傾向にあり、水温20℃～30℃、下水中の溶存硫化水素濃度が4mg/L程度で、大気中の硫化水素ガス濃度は、容易に致死濃度の1000ppmを超えることがわかる。

(3) 硫酸の生成 (生物学的作用)

気相中の硫化水素 (H₂S) は、管壁の結露に溶解込み、硫黄酸化細菌の生物作用により硫酸 (H₂SO₄) へと変質する (式 (2))。



硫黄酸化細菌は独立栄養細菌であり、硫酸 (H₂SO₄) を生成する際に有機物は必要ないが、気相中の酸素 (O₂) を必要とする。硫黄酸化細菌の生育環境は概ね10～35℃の間であり、30℃前後に至適温度を持つものが多い。また、乾燥に対しては弱いので、結露が生じる場所で活発に活動す

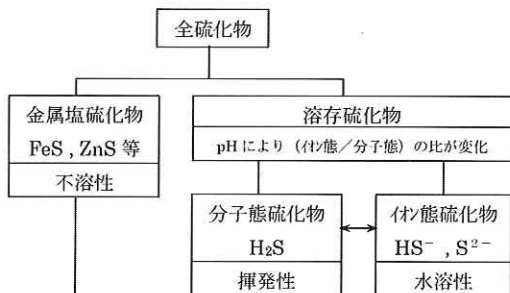


図-2 下水中の硫化物形態

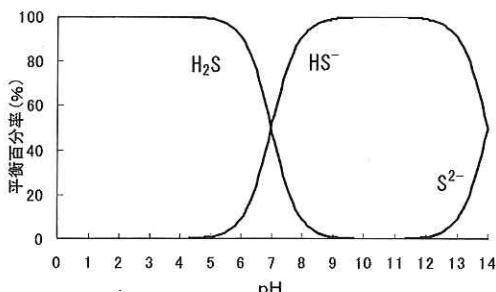


図-3 pHによる硫化水素平衡⁶⁾

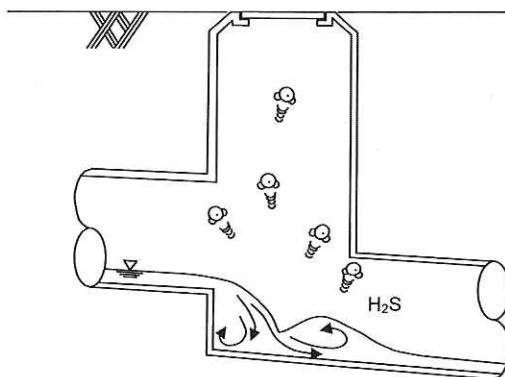


図-4 硫化水素発生イメージ

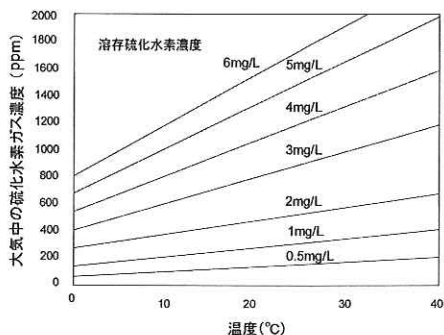


図-5 大気中での平衡硫化水素ガス濃度

る。酸に対しては強い耐性を持つものがあり、硫酸濃度が7%になっても活性を保持している一方、アルカリに対してはpH10以上の環境で生育できない。施工直後のコンクリート表面は、pH12～13の強いアルカリ性を示すため、硫黄酸化細菌は生育できず、管壁での硫酸生成は生じない。しかし、下水道施設のコンクリートは、通常の大気中よりも高い濃度の二酸化炭素雰囲気暴露されているため、コンクリートの中性化が進行し、表面のpHが中性領域になると、硫黄酸化細菌による硫酸の生成が生じる(図-6)。

(4) コンクリートの硫酸腐食(化学的・物理的作用)

硫黄酸化細菌により生成された硫酸(H₂SO₄)は、コンクリート表面でそのアルカリ成分である水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)と反応し、硫酸カルシウム(二水石膏)(CaSO₄・2H₂O)を生成する(式(3))。生成した硫酸カルシウムは、続いてアルミン酸カルシウム(3CaO・Al₂O₃)と化学反応し、エトリンガイト(3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O)が生成される(式(4))。エトリンガイトの生成反応時には、結合水が取り込まれ、体積が3～4倍に膨張するため、コンクリートを崩壊させる。

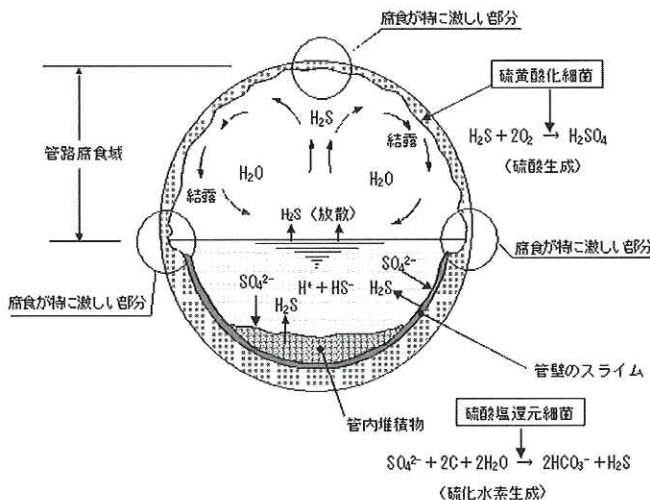
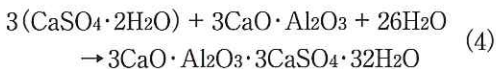
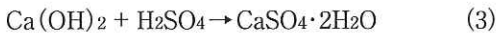


図-6 下水道管路の硫化水素腐食モデル

3. 硫化水素腐食の危険箇所

硫化水素問題の発生が懸念されるのは、一般的に高濃度の溶存硫化物を含む下水と、空気相が共存する場所であり、下水道施設のなかで以下のような場所が考えられる。

① 圧送管吐出部や伏越し上下流部

圧送管や伏越しでは酸素の供給がないため下水が嫌気化する。特に下水量が少なく圧送ポンプの停止する時間が長くなるような圧送管路や、長大伏越しでは、嫌気化した下水が長時間管内に滞留することになるため、硫化物生成量が多くなる。

② 特殊排水流入箇所の上下流部

ビルピット排水、温泉水、工場(パルプ、皮革、化学など)排水には高濃度の溶存硫化物が含まれている場合があり、このような排水の流入箇所付近ではたとえ好気的な状態であっても硫化水素が発生すると考えられる。また、このような特殊排水には、硫酸イオンを多量に含んでいる場合も多く、下水の硫化物生成ポテンシャルが高くなる。

③ 下水の滞水が生じる箇所

管内貯留やポンプ井など長期間下水が滞水する場合、気相中から供給される酸素量よりも下水中やスライム中に存在する好気性微生物による酸素消費量が大きくなるため、下水が嫌気化しやすく、硫化物が生成する可能性が高い。

④ 供用開始初期の少流量管路

供用開始当初は流入下水量が少なく、設計流速が確保できないことが多いので、下水が滞留しやすく、堆積物も溜まりやすい。堆積物は硫酸塩還元細菌の格好の住処となるため、硫化物生成量が多くなる。

⑤ 処理場施設

下水処理場内の殆どの施設は硫化水素問題を生じる危険性を有している。特に汚泥処理系では高濃度の硫化水素が発生するため注意が必要である(消化ガス中には通常0.01～0.03%程度の硫化水素が含まれる)。他に、着水井や最初沈殿池などにおいても流入下水中に含まれる硫化物や、沈殿汚泥から発生した硫化物が、落差やせきによる流れの乱れにより放散するため、硫化水素問題を生じ易い。

4. 硫化水素腐食対策手法

硫化水素によるコンクリート腐食機構は、嫌気性条件下での硫酸塩の還元（硫化物の生成）→下水中硫化水素の大気中への放散→気相中での硫化水素の酸化（硫酸の生成）→硫酸による腐食の四段階からなり、これら全てが発生する場合にコンクリートの腐食が生じる。硫化水素による腐食に対しては、これら四段階のいずれかを防止すればよく、表-1に示す対策手法が提案され、現場で実施されている。硫化水素対策は、現場条件によってその適用性、経済性などが大きく異なるため、選定にあたっては綿密な検討が必要である。ここでは、実施において多く採用されている下水の嫌気化防止を目的とした対策手法について概説する。

硫酸塩還元反応は、酸素も硝酸もない条件でしか起こらない。よって、管路内で消費される酸素量と同等の酸素源を、強制的に管路内に補給してやれば硫化水素の生成は抑制される。このような考えに基づき、圧縮した空気や酸素（分子態酸素）、あるいは硝酸塩（結合型酸素）を管路内に注入する硫化水素対策手法が実用化されている。

管路内で消費される酸素量を補給するために必要となる空気注入量は次式により求めることができる^{3),4)}。

$$Q_{A(T)} = (R_{r(15)} + 4R_{e(15)}) / d \times \pi D^2 L / 72000 \times \Theta^{(T-15)} \quad (7)$$

$Q_{A(T)}$: 下水温度 T °C 時の必要空気量 (Nm³/min)

$R_{r(15)}$: 浮遊バイオマスによる酸素消費速度 (=6g/m³/h)

$R_{e(15)}$: バイオフィームによる酸素消費速度 (=0.7g/m²/h)

d : 管径 (m)

L : 管路長 (m)

T : 下水温度 (°C)

Θ : 温度補正係数 (通常 1.07 が用いられる)

空気注入による硫化水素対策では、管内の流動様式が気液二相流となり、圧力損失が満流時とは異なる。よって、管路設計やポンプ性能などに関しても十分な事前検討が必要である。

図-7は空気注入手法の導入による硫化水素抑制事例⁸⁾である。当該管路は口径400mm、管路

表-1 硫化水素対策手法⁷⁾

対策の目的		対策手法
硫化物生成の抑制	下水の嫌気化防止	空気注入/酸素注入/硝酸塩注入/過酸化水素水注入
	硫化物の固定化	塩化第二鉄注入/硫酸第一鉄注入
	殺菌および活性抑制	塩素注入
	生物膜の除去	高速流の洗管/ピグ洗管
硫化水素放散の抑制	生成硫化物の酸化	生物酸化+気相中硫化水素処理(管路出口部)
硫酸生成の抑制	細菌の活性抑制	耐菌性コンクリート使用
コンクリートの腐食防止	コンクリート耐酸性向上	耐食性被覆または塗料の使用/耐食性コンクリート使用

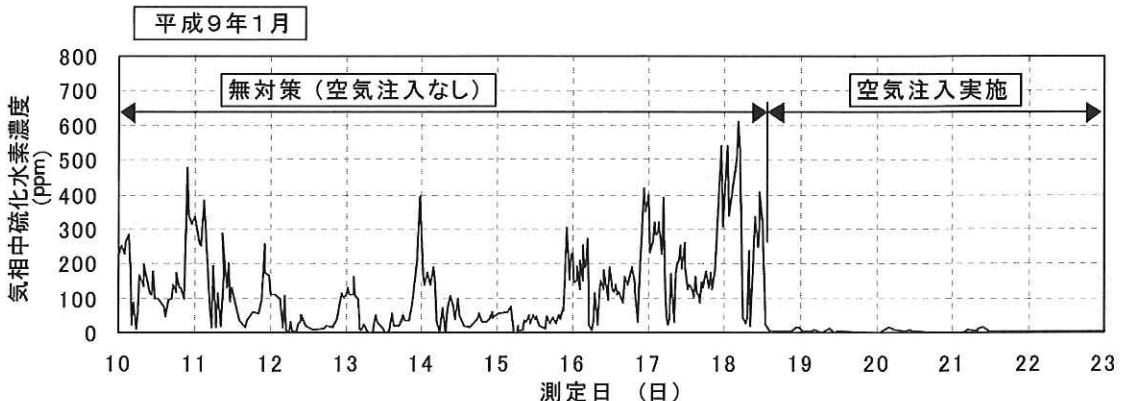


図-7 空気注入による硫化水素抑制効果

延長6,228mの下水処理場へと通ずる圧送管路である。空気注入実施前の下水処理場着水井室内においては、最大600ppm程度の高濃度硫化水素が発生していた。これに対し、空気注入実施後には硫化水素濃度が15ppm以下に抑えられ、空気注入による硫化水素抑制効果が確認できる。

5. 下水性状変化の予測技術の開発

空気注入による硫化水素対策は、薬品を用いた硫化水素対策のように、下水を化学的に変質させるものではないが、空気注入量の多寡は生物学的反応に基づく下水性状の変化に大きく影響する。また、このような性状変化は、空気注入の有無に関わらず管路内で恒常的に起きているものでもあり、性状変化を的確に把握することは、施設の維持管理手法を検討する上で重要な問題といえる。

著者の研究室では、嫌氣的及び好氣的条件下に

おける管路内での下水性状（有機物および硫化物）変化を調査することにより、その変質プロセスの把握、更には数学モデル化による下水性状変化のシミュレーション技術の開発について研究を行っている^{9),10)}。

一般的に下水中の有機物量を表す指標として生物化学的酸素要求量（BOD）や化学的酸素要求量（COD）が用いられる。しかし、下水中には生物分解性の異なる各種の有機物が含まれており、BODやCODのような指標では下水中で生じている様々な生物学的下水性状変化を理論的に検討することはできないため、新たな新たな有機物指標が必要となる。そこで本研究では、下水中の全有機物（全COD_{Cr}）を図-8に示すように生物分解性（生物にとっての分解のし易さ）に基づき細分化している。さらに、下水道管路内における有機物、硫化物の変質を図-9のように11反応（図中の反応①～⑪）のプロセスとしてモデル化する。このプロセスにおいては、好気/嫌気状態によって進行する反応が異なるため、消費・生成される物質も異なってくる。

空気注入を行った場合、管内では好気プロセス（図-9実線矢印）が進行し、硫化物の生成が抑制されるとともに、微生物増殖による有機物（易分解基質）の消費が促進される。下水処理場における二次処理（微生物を利用した生物学的な有機物除去）の観点からみると、管路内である程度の有機物が分解されることは、処理場の負荷低減と考えることができる。しかし、閉鎖性水域での富栄養化の原因となる窒素、リンの微生物を利用した

生物学的除去の観点からは、易分解基質は微生物にとって重要な栄養源であり、この不足による処理効率低下が懸念される。一方、空気注入を行わない場合、管内では嫌気プロセス（図-9破線矢印）が進行し、硫化物の生成が促進され、管路腐食の要因となる。このように、管内で進行する嫌気・好気プロセスによる下水性状の変化を把握することは、管路施設のみならず、処理施設を含めた下水道システムを適正かつ効率的に維持管理していく上で、非常に重要で

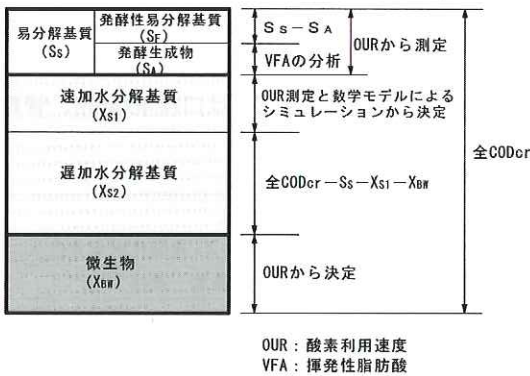


図-8 下水中有機物の分類

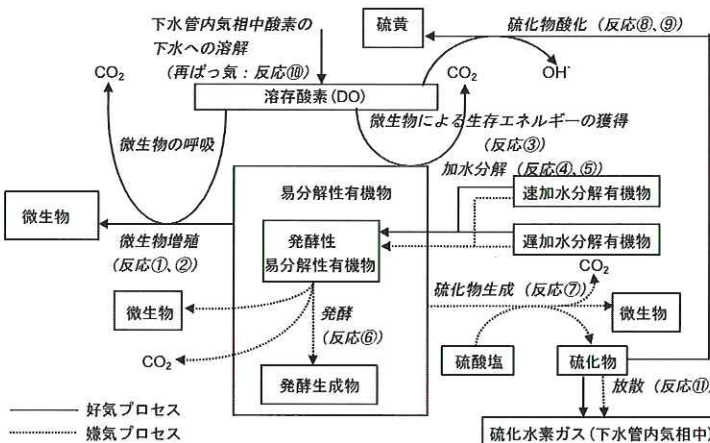


図-9 下水道管路における有機物、硫化物変質プロセス

あると考えられる。

嫌気・好気プロセスを数学式で表し、各基質の増減をシミュレーションする技術の開発により、腐食の原因となる硫化物の生成を許容範囲内に抑制しつつ、下水処理に必要となる易分解基質も保持できる適正な空気注入量の設定が可能となる。さらには、管路の段差部における気相中への硫化水素放散や下水中への酸素溶解といった自然流下管路で生じるであろうプロセスをモデルに追加していくことにより、硫化水素の影響がどの範囲にまで及ぶか予測可能となる。このような技術は、管路腐食対策を含めた効率的な維持管理を実施する上で、大きな役割を果たすことが期待される。

6. おわりに

硫化水素による腐食問題は発生に至るまでに生物学的、化学的、物理的作用と多様な作用が関連するため、複雑かつ特殊な問題であるように思われがちであるが、硫化水素問題は特殊な条件での出来事ではなく、下水が嫌気状態に置かれる場合(管内貯留、ポンプ井、伏せ越し管路、圧送管路等)には、事の大小はあれ必ず生ずる問題である。一方で、硫化水素問題の多くは、適切な対策を講じることができれば避けられる問題でもある。

現在提案されている硫化水素対策手法には、それぞれ長所短所があるため、各現場での導入効果、設備費ならびに維持管理費、他施設への影響など総合的に比較検討し、効率的かつ有効な手法を選定することが求められる。このような場面で、本稿で紹介した下水性状変化の予測技術が大きな役割を果たすことが期待される。

参考文献

- 1) 行方 馨、吉田綾子、藤生和也、高橋正宏、森田弘昭、下水管路の改修に関する一考察、下水道協会誌 投稿予定
- 2) 日本下水道事業団技術評価委員会：下水道構造物に関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—硫酸によるコンクリート腐食の機構と総合的対策の方針—、2001年3月
- 3) 三品文雄：微生物腐食の4段階メカニズム、月刊下水道、Vol.22, No.13, pp.61-64, 1999
- 4) 三品文雄：コンクリートの腐食スピード、月刊下水道、Vol.22, No.14, pp.58-61, 1999
- 5) US EPA, "Design Manual, Odor and corrosion control in sanitary sewerage systems and treatment plants," 1985
- 6) (社)日本下水道協会：下水道管路施設腐食対策の手引き (案)、2002.5
- 7) 堀江 崇、越智孝敏：硫化水素対策、『下水道管渠学』、環境新聞社、2001
- 8) 泉 宏導：圧送方式の維持管理の事例、月刊下水道、Vol.22, No.2, 1999
- 9) 森田弘昭、越智孝敏、森 一夫、行方 馨：下水管渠における硫化物の挙動再現に関する WATS モデルの適用性について、下水道協会誌、vol.41 (No.497), pp.134-145, 2004
- 10) 越智孝敏、森 一夫、行方 馨、吉田綾子、森田弘昭：下水管渠における硫化物酸化に関する研究、下水道協会誌、vol.41 (No.506), pp.129-140, 2004

岡本辰生*



国土技術政策総合研究所
下水道研究部下水道研究室
交流研究員
Tatsuo OKAMOTO

吉田綾子**



国土技術政策総合研究所
下水道研究部下水道研究室
研究員
Ayako YOSHIDA

山田和弘***



国土技術政策総合研究所
下水道研究部下水道研究室交
流研究員
Kazuhiro YAMADA

行方 馨****



国土技術政策総合研究所
下水道研究部下水道研究室
研究員
Kaoru NAMEKATA

森田弘昭*****



日本下水道事業団技術開発
研修本部技術開発部先端研
究員
(前 国土技術政策総合研
究所下水道研究部下水道研
究室長)
Hiroaki MORITA

藤生和也*****



国土技術政策総合研究所
下水道研究部下水道研究室長
Kazuya FUJII