

鉄筋コンクリート製小径下水管内の5GHz浮流無線LAN端末の通信性能調査

島田 彩加¹ 川合 健斗¹ 武居 悠樹² 石原 進³

概要: 老朽化都市インフラのメンテナンスは都市環境保全のための重要な課題である。筆者らは浮流型センサ・カメラ端末による省力型下水管検査手法の開発に取り組んでいる。これまで、塩ビ製の簡易的な実験用下水管を用いて、下水管内における5GHz帯、2.4GHz帯無線通信性能を調査しているが、実際のマンホールが存在する環境での測定は行えていなかった。老朽化が進み検査が必要な下水管には、鉄筋コンクリート製のものが多いため、鉄筋コンクリート製の下水管内で適切に無線通信を扱う必要がある。本稿では、IEEE802.11nの5GHz帯無線LANによる下水管内からの撮影ビデオデータ転送性能を調べるため、下水道工事が保有する実下水管と同様の深さ・傾斜の鉄筋コンクリートおよび塩ビ製模擬下水管、および大学構内にある鉄筋コンクリート製実験用下水管において、無線通信端末を用いて実測実験を行った。測定の結果、実験用下水管と実下水管と同様の深さの模擬下水管で、同等のスループット特性が得られることを確認した。また、直径250mm鉄筋コンクリート製の下水管では、直径200mmの塩ビ製下水管に比べ通信可能距離が2倍以上長いことが分かった。

1. はじめに

現在、日本の下水道の総延長は約47万kmに達し、その内の約1万kmが標準的な耐用年数である50年を超えている。管路の老朽化により、道路の陥没などの事故が起こる可能性がある。平成27年度には、管渠施設の老朽化等に起因した道路陥没事故が、全国で約3,300箇所が発生している[1]。日常生活や社会活動に重大な影響を及ぼす事故の発生を未然に防ぐために下水管の定期的な検査が必要である。既存の下水道検査には、目視やファイバースコープ[2]を用いた検査手法の他に、有線接続のカメラ付きロボット[3]などがある。これらはいずれも、管内の映像がリアルタイムで見ることが出来るため、確実に検査を進めることが出来るが、金銭的コストの問題や、管内に人が入ることの危険性を伴う。以上のことから、年間の下水管検査延長は全国の下水管総延長の約1%に過ぎないため、安全で短時間、低コストで検査を行うことが出来る手法が求められている。

そこで筆者らは、小型のカプセルに電波による無線通信が可能な端末、カメラ、センサを搭載した浮流可能なノードを複数下水管に流し、何箇所かのマンホールに一時的に設置したアクセスポイント(AP)を通じて浮流ノードか

ら無線通信によって映像を回収する下水管検査のための省力型浮流型無線センサネットワークカメラシステムを提案している[4]。このシステムは、検査地点の終端まで装置を取り出さずに検査可能であり、従来の方法に比べ低コストで、短時間の検査が可能となる。しかし、下水管内での無線通信は地上の無線通信よりも通信可能距離が短くなるため、無線端末の管内での通信性能を調べる必要がある。

筆者らはこれまでに、学内の地下管底400mmに埋設した直径200mmの塩化ビニル製の実験管で実験を行ってきた[6]。しかしながら、下水管の素材は塩化ビニルだけでなく鉄筋コンクリートも多く用いられている。近年は新規に埋設される小径の下水管には塩化ビニル製の下水管(以下、塩ビ管)が多く用いられるが、かつては鉄筋コンクリート製下水管(以下、ヒューム管)が主流であった。老朽化が進む下水管の多くはヒューム管であるため、筆者らが提案するシステムの実現のためにはヒューム管内で適切に無線通信を扱える必要がある。また、実際の管底の深さは1.5m以上である。鉄筋コンクリート製のパイプ内および地中深い位置での通信は、これまでの実験環境での通信と異なる可能性がある。そこで本稿では、地中400mmに埋設した直径250mmの実験用ヒューム管、地中約2mに傾斜付きで埋設された直径250mmのヒューム管、および直径200mmの塩ビ管において行ったスループット実測実験の結果を報告する。

¹ 静岡大学工学部数理システム工学科

² 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻

³ 静岡大学大学院工学領域

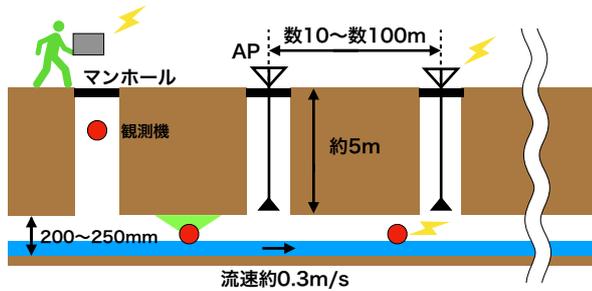


図 1 浮流型無線センサネットワークカメラシステム

2. 浮流型無線センサネットワークカメラシステム

2.1 システムの概要

筆者らが提案している下水道検査のための浮流型無線センサネットワークカメラシステムは、複数の観測機とマンホール下に設置される AP、インターネット上のデータ集約サーバで構成される。システムの概要を図 1 に表す。観測機は下水管内撮影用のカメラと照明、無線電波通信機器、バッテリー、温度計や硫化水素計測のセンサを搭載し、地上にいる作業者によって下水管内に投入される。

本稿で対象とするのは、直径 200mm から 250mm の塩ビ管およびヒューム管である。多くの自治体で分流型（雨水と汚水を分離して回収）の下水管システムにおける本管として、直径 200mm の塩ビ管と直径 250mm のヒューム管が多く利用されている。検査が必要な古い下水管では、250mm のヒューム管が用いられることが多い。また、このような直径の下水管は、地中 1.5m から 2.0m の深さに埋設されていることが多い。

管内に存在する土砂や木などによる観測機の詰まりを防ぐため、観測機の大きさはなるべく小型であることが望ましく、本研究ではソフトボール（直径約 10cm）よりも小さいサイズを目標としている。観測機は流れながら管内の撮影およびセンシングを行い、数 100m 程度の間隔で設置されている AP の通信範囲内に入ると、観測したデータを送信する。AP は観測機から受信したデータを有線、もしくは無線の通信によってインターネット上のデータ集約サーバに送信する。検査終了後、検査区間の終端で観測機を回収する。本システムでは、AP の設置と観測機の投入のみで作業が終わるため短時間で検査を行うことができる。また、データが検査途中で確認できるため、観測機が途中で故障してしまっても、そこまでのデータは回収可能であり、検査再開までの時間も短くなる。

2.2 システム実現への課題

本システムの実現のためには、観測機の軽量・小型化や省電力化、映像が撮影された位置の推定など、多くの課題がある。本稿では下水管内における無線通信について検討

する。小口径の下水管内では、地上に比べて無線通信の通信可能距離が著しく短い。これは、下水管のような狭い空間では、無線通信の見通しの確保が困難なためである。無線電波通信において通信の見通しを確保するためには、通信を行う 2 つのアンテナの間に、電波伝播の妨げになるものがない空間が必要とされる。この空間はフレネルゾーンと呼ばれ、空間の大きさはアンテナ間の距離に応じて大きくなり、通信周波数が低いほど大きくなる [5]。下水管内では、通信端末間の距離が大きくなるにつれて、フレネルゾーン内で管外の土砂や管内を流れる汚水が占める割合が高くなり、通信の見通しが確保しづらくなるため、地上に比べて通信可能距離が短くなる。

筆者らの提案システムでは、観測機は浮流しながら AP にデータを送信するため、通信時間は通信可能な距離によって左右される。観測機は限られた時間の中で必要なデータを AP へ送信しなければならない。そのため筆者らは通信プロトコルの制作に取り組んでいるが、プロトコルの設計・評価にあたっては、実際の下水管環境での通信特性の把握が必要である。塩ビ管の管内はプラスチックで構成されているため導体は存在しないが、ヒューム管には、コンクリート内部に導体となる直径 5mm 程度の鉄筋が網目状に組まれている。

これまで筆者らは、大学構内に埋設した管底の深さが 400mm 塩ビの簡易実験管で実験を行ってきた。大学構内の塩ビ製簡易実験管には 1m ごとに縦穴があるため実際の環境とは異なる。そのため、ヒューム管を使い、実際の深さで通信の性能を確認しておく必要がある。

3. 5GHz 浮流無線端末を用いた鉄筋コンクリート製下水管路内の通信性能評価

実際の下水管と同様の深さ・傾斜でヒューム管内の通信性能を調べるため、アサヒエンジニアリング株式会社敷地内に埋設された実験用模擬下水管（以下、模擬管）において、二台の無線通信端末を使用し、スループットの測定を行った。比較のため、静岡大学浜松キャンパス内に埋設した鉄筋コンクリート製の簡易実験管（以下、簡易実験管）でもスループットの測定を行った。

3.1 測定環境と使用機材

模擬管の構成を図 2 に示す。模擬管は管底の深さが約 2m になるように埋設され、3% の傾斜がついている。模擬管は直径 200mm、長さ 15m の塩ビ管と、直径 250mm、長さ 10m のヒューム管で構成される。二つの管の間にはマンホールが設置されており、塩ビ管の上流とヒューム管の下流にもマンホールがある（図 4）。大学内の簡易実験管の構成を図 3 に示す。簡易実験管は管底約 400mm に全長 8m で直径 250mm のヒューム管が水平に埋設されている。簡易実験管には 5 つの縦穴が設置されており、一番端の縦

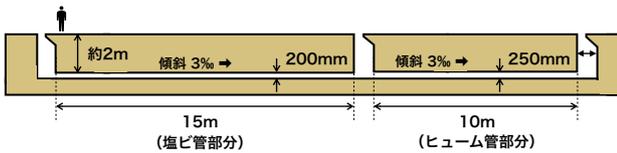


図 2 模擬管（ヒューム管）と模擬管（塩ビ管）の構成

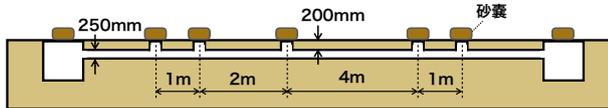


図 3 簡易実験管の構成



図 4 模擬管（ヒューム管）と模擬管（塩ビ管）



図 5 簡易実験管

穴から他の縦穴までの距離は 1m, 3m, 7m, 8m である (図 5)。なお今回の実験では、管内に水は流していない。

無線通信機器には、小型 Linux コンピュータ Raspberry Pi Model B に IEEE802.11n 対応の無線 LAN ドングル Planex GW-450D を取り付けたものを使用した。送信電力は 10mW に設定し、通信には中心周波数 5.18GHz、幅 20MHz のチャンネル (W52 帯, 36ch) を単独で使用した。

二台の無線通信端末のドングルの先端が向かい合わせになるよう管内に配置し、iPerf[7] を使用してスループットの測定を行った。片方の端末をマンホール内の管の入り口に



図 6 管入り口に固定した端末



図 7 管内に固定した端末

固定し (図 6)、もう一方はカゴに入れ、紐でひいて位置を調整し固定した (図 7)、マンホールの蓋を閉じて 12 秒の UDP 通信を 10 回行いスループットを測定した。大学構内の簡易実験管でも同様の実験を行った。こちらでは縦穴の蓋の上に砂嚢を置いて外と通信できない環境を再現した。測定はどちらも 1m ごとに行った。また IEEE802.11n の変調方式と符号化率の組み合わせにより、実験では送信データレートが 65.0Mbps (64-QAM 変調, 符号化率 5/6. 以下, MCS7) と、39.0Mbps (16-QAM 変調, 符号化率 3/4. 以下, MCS4) の二通りに設定した。MCS7 は設定できる最大のビットレートである。MCS4 は先行研究 [8] により、通信可能距離とビットレートのバランスが最も良いことが分かった設定である。

3.2 測定結果と考察

模擬管（ヒューム管）および模擬管（塩ビ管）で行ったスループット測定の結果を図 8 に示す。MCS7 の場合、塩ビ管の方のスループットが 4m で急激に落ちているのに対し、ヒューム管のスループットは 8m まで 50Mbps 以上のスループットを保っている。同様に、MCS4 の場合も、塩ビ管では 7m 地点でスループットが大きく減少しているの

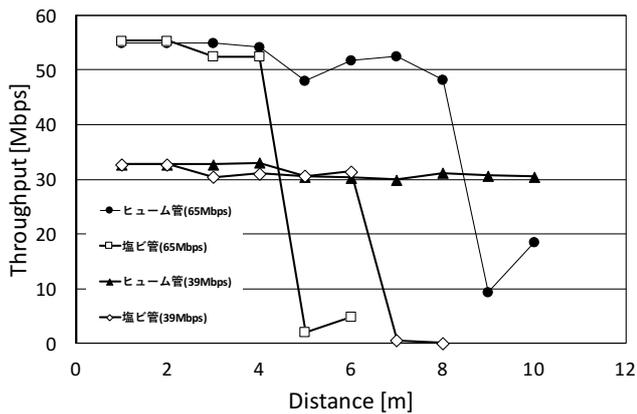


図 8 模擬管 (ヒューム管) および模擬管 (塩ビ管) でのスループット

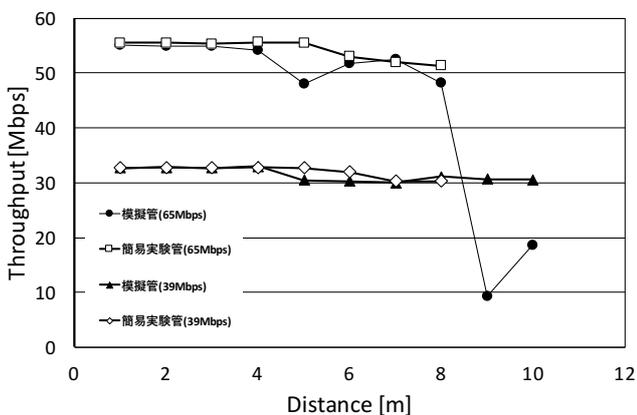


図 9 模擬ヒューム管と簡易実験管でのスループット

に対し、ヒューム管では 10m 地点でも送信レートの設定値に近い値のスループットを記録している。塩ビ管とヒューム管の直径は 50mm の差がある。また、塩ビ管は管壁がプラスチックで構成されているのに対し、ヒューム管の管壁内には導体である鉄筋が存在する。これらの要素によって、二つの管の通信可能距離に差が生じたと考えられる。

塩ビ管、ヒューム管ともデータレートを下げた場合の方が通信可能距離が長い。これは、端末間距離の増大に伴って受信信号強度が低下するため、変調が高く、符号化率の低い設定の通信は、変調が低く符号化率の高い設定の通信に比べ、信号の復元が困難になるためである。

模擬管 (ヒューム管) および簡易実験管でのスループット測定結果を図 9 に示す。実験の結果、データレートの設定がどちらの場合でも、模擬管と簡易実験管でほぼ同等のスループットが得られた。端末間距離を 1m から 8m に設定して通信する場合、簡易実験管は模擬管とほぼ同等の環境を再現していると言える。

4. まとめと今後の課題

本稿では、鉄筋コンクリート製実験用下水管、実下水管と同様の深さ・傾斜の鉄筋コンクリートおよび塩ビ製模擬下水管において、無線通信端末を用いてスループットの実

測実験について報告した。250mm 鉄筋コンクリート製のヒューム管では、200mm 塩ビ管よりも少なくとも 2 倍以上の通信可能距離が得られることが分かった。これより、より容量の大きなビデオデータの転送が可能となり、筆者らの提案する下水道検査システムにおける AP 間距離をより長くできる見込みが得られた。

ヒューム管において無線通信のデータレートを 39Mbps に設定した場合、端末間距離が 10m になるまで通信が可能であった。この結果から、一つの観測機が一つの AP へ送信可能なデータ量は 200Mbyte 程度が見込まれる。模擬管において、傾斜のある管内で下水管内の水流を再現し、流速を計測したところ、0.3m/s となることがわかっている。今回の実験の結果から、MCS を 4 に設定すれば、AP の前後 20m において 30Mbps で通信が可能である。観測機は流速と同じ速度で移動するため、一つの AP を 66 秒間に渡って通信ができる見込みである。したがって、一つの観測機が一つの AP へ送信可能なデータ量は 200Mbyte 程度であると見込まれる。

実下水管と同様の深さの模擬管と、それよりも浅い簡易実験管で同等のスループットを観測出来た。これより、筆者らが従来使用してきた管底の深さ 400mm の簡易実験管は、下水管を想定した通信実験環境として適切であることが確かめられた。

今後は今回使用した以外の無線通信端末でも測定を行い、デバイスによる違いを確認するため、下水管内で通信実験を行う予定である、また、下水管内に水を流した場合の通信実験もを行う予定である。

謝辞 アサヒエンジニアリング株式会社敷地内に埋設された模擬管の使用にあたっては、同社および須山建設株式会社に多大なご協力をいただいた。また、本研究は総務省戦略的情報通信開発推進事業 (SCOPE) の助成の下で実施されたものである。ここに記して、謝意を示す。

参考文献

- [1] 国土交通省, 下水道: 計画的な改築・維持管理, http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html. (2018/10/18 確認) .
- [2] 株式会社カンツール: 管内検査カメラシステム: ソロプロ+, <https://www.ipros.jp/product/detail/2000282774?hub=19+701>. (2018/10/18 確認) .
- [3] 東芝テリー株式会社: 管内検査用カメラ: VCM561L, <http://www.toshiba-teli.co.jp/products/inspection/camera/vcm561l.htm>. (2018/10/18 確認) .
- [4] 石原進, 武居勇樹, 劉志, 前田拓磨, 澤野弘明: 下水管路検査用浮流型無線ネットワークカメラシステムの実現技術, 情報処理学会研究報告, Vol. 2017-DPS-172, No. 4, pp. 1-9 (2017).
- [5] 高田潤一: 電波伝搬の基礎理論, Microwave Workshops and Exhibition (2005).
- [6] Taiki Nagashima, Yudai Tanaka, Susumu Ishihara: Measurement of Wireless LAN Characteristics in Sewer Pipes

for Sewer Inspection Systems Using Drifting Wireless Sensor Nodes, IEICE TRANS COMMUN, Vol. E99-B, No. 9, (2016).

- [7] iPerf, <https://iperf.fr>. (2018/10/18 確認).
- [8] 長島大貴, 田中悠大, 石原進: 複数の無線ノードを用いた下水管内検査システムのための下水管内無線伝送品質の測定~920MHz帯と5GHz帯, 信学技報, Vol. 114, No. 418, ASN2014-136, pp. 139-144 (2015).