

小口径下水管における複数アンテナアクセスポイントを使用した無線LAN通信特性

立花 誠也¹ 石原 進²

概要: 日本では下水管の老朽化が進み, その検査と整備が急務となっているが, 現行の下水管検査手法はコストなどの面で様々な問題を抱えている. 筆者らは, 短時間・低コストの検査が可能な新しい下水管検査手法として, 複数の浮流型観測機を用いた下水管内映像伝送システムを提案している. このシステムでは, 下水管内に投入されたカメラ付き浮流観測機が撮影した管内の映像を, マンホール下のアクセスポイント (AP) を介して無線通信を用いて回収し, その映像に基づいて検査を行う. 下水管内の無線通信の通信可能距離は, 下水管外の土砂, 下水管内の汚水や堆積物等の障害物等により, 自由空間よりも制限されることがわかっている. 一方で, 浮流無線カメラは下水管内を浮流し続け, AP の通信可能範囲に留まり続けることができないため, 浮流観測機が AP へ転送可能なデータ量も制限される. 本システムの利便性向上には, 下水管内の通信可能距離延長及びスループット向上が必要である. 本稿では, 複数アンテナを搭載した AP 利用時の MRC による電波の受信性能向上を検証するため, 2.4 GHz 帯及び 5 GHz 帯を用いる IEEE 802.11n 無線 LAN 端末のスループット測定を大学キャンパス内に埋設された実験管で実施した. 2.4 GHz 帯及び 5 GHz 帯 IEEE 802.11n 無線 LAN を用いた実験では, 複数アンテナを搭載した AP の通信可能距離は, シングルアンテナの AP に比べ大きいことを確認した. 本システムにおいて複数アンテナの AP を用いることにより, AP への転送可能データの向上が見込めることが示唆された.

1. はじめに

日本の下水管の老朽化は深刻である. 平成 31 年度末時点で, 日本の下水管の総延長 48 万 km のうち, 耐用年数 50 年を超えている下水管は, 約 1.4 万 km にものぼり, 10 年後には全体の 14% にもなる. また下水管は, 敷設後 30 年程度で破損し, 下水管の破損は排水機能の低下だけでなく, 道路陥没等を引き起こす. 日本では, 下水管の老朽化を原因とした道路陥没事故が年間 3000 程度発生している [1]. そのため, 下水管の検査は急務である. 現在の下水管検査手法では, 目視検査 [2], 管口カメラ [3], 有線ロボット [4], 船形カメラ [5] などを用いた検査を中心に実施されている. しかしながら, これらの手法は金銭的・人的に高いコストを伴うために検査の進行度が低く, 年間の検査延長は総延長の 1% 程度にとどまっているのが現状である [6]. 今後, 急増する老朽管に対して早急に検査するため, 低コストかつ短時間で検査可能な検査手法が必要である [7].

石原らは, 低リスク, 低コスト, 短時間の検査を可能とする新しい下水管検査手法として, 浮流型観測機を用いた下水管検査システムを提案している (図 1) [8]. このシス

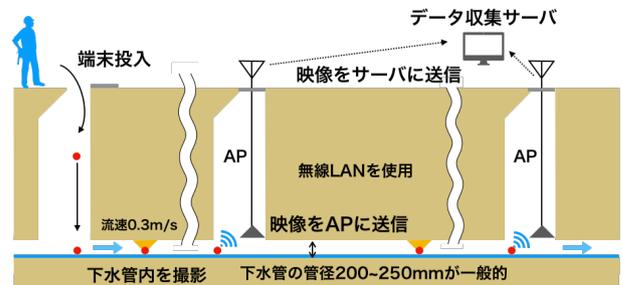


図 1 浮流無線カメラノードを用いた映像伝送システム

テムでは, 検査対象の下水管内をカメラ・センサ搭載の浮流型観測機が撮影し, 下流のマンホール下に設置されたアクセスポイント (AP) により無線通信を用いて映像データを回収する. 検査員は事前に検査範囲のいくつかのマンホールに数百 m 間隔で AP を設置し, その後, 検査範囲の上流のマンホールから $\phi 120$ mm 程度の球状の浮流型観測機を複数投入する. 浮流型観測機は管内を流れながら管内の内側の映像を撮影し, 各 AP の付近を通過する際に, 直前の AP 以降に下水管内を撮影した映像データを直上の AP へ転送する. AP は回収した映像データをセルラー通信経由でオンラインサーバへ転送し, 検査員はサーバ上の映像データをチェックして検査を行う. 浮流型観測機は検査範

¹ 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻

² 静岡大学大学院工学領域

囲の下流で回収され、AP も検査後に撤去される。

このシステムは、検査員が管内に入る必要も少ないため検査員の危険性も少なく安全であり、検査対象の下水管の止水や洗浄などの大掛かりな事前作業が必要ないため、検査に必要な時間が比較的短い。加えて、浮流型観測機が撮影した映像を浮流型観測機を下水管内から回収することなく検査実施中に確認できるため、撮影の失敗や浮流型観測機の故障を把握及び再検査実施までの検討時間短縮を実現できる。また、AP の設置間隔を広げることで、検査延長に対するマンホールの開閉回数の削減と、検査距離の延長が実現できる。このため、従来の検査手法に比べて下水管検査を安全・低コストかつ短時間で実施できると見込まれる [8]。

このシステムの実現には、様々な課題が存在する。具体的には、観測機の設計や映像の撮影・解析、映像伝送プロトコルの設計、AP の設置間隔の決定がある。これら問題の一つである AP の設置間隔の決定や映像伝送プロトコルの設計においては、観測機が下水管内を浮流しながら AP の通信可能範囲に存在している間に映像データ全てを AP に送信しなければならないため、AP と端末の通信可能距離及び送信可能データ量を把握する必要がある。しかし、検査対象である下水管は、下水管外の土砂、下水管内の汚水や堆積物により、地上よりも通信の見通しが悪く、通信可能距離が著しく小さい、そのため、下水管内を撮影したデータ全てを地上のサーバに送信するために、浮流する端末と AP 間の通信可能距離延長及びスループット向上が望まれる。

先行研究では、 $\phi 250$ mm の鉄筋コンクリート製下水管（以下、ヒューム管）や $\phi 200$ mm 塩ビ管で、2.4 GHz 帯及び 5 GHz 帯 IEEE 802.11n の通信を用いた場合における下水管内の通信可能距離を調査してきた [11][12][13]。5 GHz 帯 IEEE 802.11n 通信規格を用いて単一アンテナを搭載した AP による通信が通信可能距離が最大となり、 $\phi 200$ mm 塩ビ管においては約 3 m、 $\phi 250$ mm ヒューム管においては約 8 m となることがわかっている。観測機が AP 間を移動中に撮影した映像データ全てを送信するためには、より長い通信可能距離、より高いスループットが必要である。これまでの研究では、浮流端末を想定した発信端末及びアクセスポイントを想定した受信端末ともに小型のプリント型アンテナ一本のみを搭載したものを使用しており、それらを使用しての実測実験のみ行われていた。しかしながら、本システムでは、浮流端末は $\phi 200 - \phi 250$ mm の小口径の下水管を浮流するため小型化・軽量化は必須である。対して、AP はマンホール内という下水管の本体よりも比較的広い空間に設置されるため、AP は大型 AP を使用することが可能である。発信端末と受信端末は同構成である必要がないことから、大型 AP を使用することが可能である。大型 AP には、複数のアンテナを搭載したものがあり、こ

れらは複数のアンテナを使用することにより受信性能を向上させている。そのため、受信側は複数アンテナを搭載した AP を使用することが望ましいといえる。しかしながら、先行研究では、下水管内における無線通信特性の調査において複数アンテナの AP は使用されていない。

そこで、本研究では $\phi 250$ mm のヒューム管及び $\phi 200$ mm 塩ビ管において、複数アンテナを搭載した AP を使用した際の 2.4 GHz 及び 5 GHz 帯 IEEE 802.11n 無線通信のスループットを測定し、シングルアンテナの AP のスループットとの比較により、複数アンテナの AP の使用がスループット向上及び通信可能距離延長に対して有効であることを確認した。

以下、2 章で本稿での議論に関連する研究について述べる。3 章で模擬下水管内で実施した実験の詳細について説明する。第 4 章でその結果について述べた後、5 章で考察を述べる。最後に 6 章でまとめを述べる。

2. 関連研究

2.1 無線電波を用いた管路検査

これまでに無線センサネットワークを用いた様々な管渠施設の検査手法が研究されている。Stoianov らは、水圧・pH 観測センサや超音波・音響/振動センサなどの各種センサを用いて、上水用の大口径管路や、一部の下水道の検査を行うためのシステムとして、PipeNet を提案している [14]。同システムでは、上水用管路を検査するための音響/振動センサは検査対象管の上部外側に固定され、一定の間隔でセンシングを行い、Bluetooth 通信を用いて観測データを定期的にデータ収集ノードへ転送する。下水管検査用の水圧センサと超音波センサは、それぞれ管の底と天井面に設置され、定期的に管の水位を計測し、データをデータ収集ノードへ転送する。データ収集ノードは長距離無線通信機能を備えており、センサから収集したデータをさらに分析サーバへ転送する。センサとデータ収集ノードはセンシングデータの収集と転送の機能のみを持ち、管の検査は、分析サーバが集められたデータを分析して行う。研究室内に設置された延長距離 5 m、 $\phi 32$ mm の塩ビ管内での実験が行われており、実験では誤差 30 cm で下水管の損傷箇所を特定している。

また、他にも Sewer Snort[15] と呼ばれるマンホール下に設置されたノードと浮流型無線センサノードにより下水管内の各地点におけるガス濃度を計測するシステムが提案されている。このシステムでは、浮流型無線センサノードが下水管内を上流から下流へと流れながらガス濃度の計測を行い、計測データをマンホール下のノードへ送信する。データ送信時には、Crossbow 社の IEEE 802.15.4 無線センサネットワークモジュール、MicaZ[16] を使用しており、2.4 GHz 帯を利用する。 $\phi 800$ mm のコンクリート管内における実測実験では、2.4 GHz 帯の MicaZ を用いて、通信間距

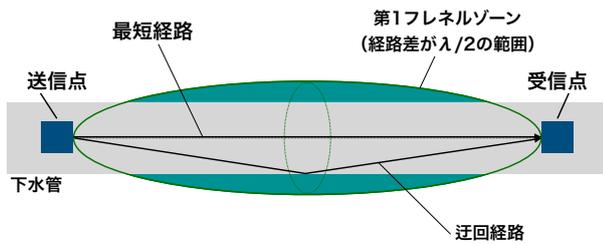


図 2 下水管に対するフレネルゾーン

離 60 m で受信信号強度が約 -11 dBm であり、60 m の通信ができることがわかっている。Sewer Snort は、下水管の管径を人が入ることが可能な比較的大きな $\phi 1500\text{--}1800\text{ mm}$ 程度を想定しており、筆者らが研究対象としている $\phi 200\text{--}\phi 250\text{ mm}$ の小口径管に比べてかなり口径が大きい。このため、電波通信での見通しに関する制約は比較的小さい。

Branch らは 415MHz 帯 LoRa ネットワークを用いた鉱山内の無線通信システムを開発している [17]。このシステムでは、人が通れるような直径 2m 以上で延長距離が数 100 m 規模の鉱山の坑道内を想定しており、そのような環境において、爆破物の起爆を作業員が全員避難した上でできるようにするために無線通信を用いている。LoRa ネットワークを使うことにより、低電力で長い距離を通信することができる。Branch らは、 $\phi 2000\text{ mm}$ 以上の実際の坑道における実験から通信間距離 80 m において、受信電力は -120 dB の場合においても、通信可能であることを明らかにしている [17]。しかしながら、LoRa はビットレートが 300 bps から 50 kbps と低い。本論文のシステムでは、下水管内を撮影したデータを送信するため、LoRa のビットレートでは低すぎるという問題がある。

2.2 下水管内における電波伝播とフレネルゾーン

下水環境のような狭く、障害物の多い空間では、無線電波通信の通信距離が制限される。障害物のある環境での無線通信の見通しに関する目安として第 1 フレネルゾーンがよく用いられる。フレネルゾーンとは、送信機から発射された波長 λ の電波が最短経路で受信機まで到達する場合の経路長と、迂回経路を通して到達する場合の経路長の差が $n\lambda/2$ 以内になる範囲のことである (図 2) [9]。楕円の単景をフレネル半径といい、フレネル半径 r は、以下の式で表される。ここにおいて、 λ は波長であり、 d_1 及び d_2 は、それぞれ送信点から楕円の中心の距離と受信点から楕円の中心の距離である。

$$r = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}, \quad (1)$$

このフレネルゾーンは、 n によって第 n フレネルゾーンと呼ばれ、特に通信においては、第 1 フレネルゾーンが重要であり、この式からわかる通りフレネルゾーンの 60% 以上を通信に対する障害物が占めている場合、電波減衰の影響

が大きくなり、安定した無線電波通信が困難になる。つまり、見通しが得られない。第 1 フレネルゾーンは、電波の周波数が低いほど広く、高いほど狭くなる。

下水管のような地中の配管内での無線電波通信では、管外の土砂により地上の自由空間よりも、通信の見通しが確保できないことによる電波減衰の影響が大きく、高い周波数帯を使用して通信した方が通信可能距離が長くなる [10]。長島や島田らの検証によれば、 $\phi 200\text{ mm}$ の塩ビ管においてこの現象は確認されている。 $\phi 200\text{ mm}$ の塩ビ管において 920MHz 帯 ARIB STD-T108 規格を使用し、単一アンテナを用いた通信では、通信可能距離は 3 m で、2.4GHz 帯 IEEE 802.11g 規格を使用し、単一アンテナを用いた通信では、通信可能距離が 3 m であるのに対し、5GHz 帯 IEEE 802.11g 規格を使用し、単一アンテナを用いた場合の通信可能距離は 6 m である [11][12]。

2.3 チャンネルボンディング

チャンネルボンディングとは、チャンネルを複数まとめて使用して、通信する技術である。使用するチャンネルの数が多くなればなるほど通信は高速になるが、その分占有する帯域幅が大きくなり、帯域幅が大きくなると、干渉が起りやすくなり、通信が不安定になる可能性がある。IEEE 802.11 無線 LAN では IEEE 802.11n よりチャンネルボンディングが仕様に取り込まれ、20MHz 幅のチャンネルを 2 つ組み合わせることで 40MHz 幅のチャンネルを利用可能としている。IEEE 802.11ac では、160MHz 幅のチャンネルボンディングが可能である。

武居ら [13] は、 $\phi 200\text{ mm}$ 塩ビ管内において 5GHz 帯の IEEE 802.11n の規格を使用し、チャンネルボンディングにより、20MHz 幅のチャンネルを 2 つ合わせてチャンネル幅を 40MHz 幅にした通信のスループットを測定している。チャンネルボンディングを用いた通信は、端末間距離が 1–4 m においてはチャンネルボンディングを用いなかった場合よりも高いスループットを達成できるが、端末間距離が 4 m 以上では、チャンネルボンディングを使用しなかった場合に対し、スループットが大幅に低下する結果となることがわかっている。これはチャンネルボンディングの使用によって OFDM の各サブキャリアの本数が倍増する一方で端末一台あたりの出力をチャンネルボンディング後の同じとするためサブキャリアごとの送信電力が半減していることによる。

2.4 MIMO 伝送と MRC

IEEE 802.11n から利用可能になった通信高速化技術の 1 つに、MIMO (Multiple Input Multiple Output) がある。MIMO ではデータを複数のストリームに分離し、複数のアンテナによりデータを送信/受信する空間多重化により通信容量を拡大可能である。送信側の複数のアンテナは各ストリームのデータを同一の周波数で送信する。異なるアン

テナから送信された信号が合成されて受信側のそれぞれのアンテナに届く。受信側は事前に測定した送受信アンテナ間のチャンネル状態情報に基づいて受信した合成波から各ストリームのデータを復元する。また、MIMO は電波の反射や回折等により引き起こされるフェージングへの対策としても有効である。MIMO による空間多重を使った場合、通信路容量を送信アンテナ数とともに増やすことができる。しかしながら、送信アンテナ数が増加するにつれて、送信時の演算が複雑になり、演算処理に必要な消費電力が増加するというデメリットが存在する。

汚水や障害物が多く、また狭い空間である下水環境では、電波の回折や反射が起こりやすいため MIMO の技術を用いることは効果的であると考えられる。本システムでの浮流無線カメラは、下水管内を流れる水が少量であっても浮流可能であるために小型化を目指している。MIMO を使用することにより消費電力が大きくなってしまうと、浮流無線カメラに搭載するバッテリーの大型化、複数のアンテナ使用による筐体の大型化の懸念がある。

フェージングによる無線伝送の損失を防ぐための技術として、最大比合成法 (MRC:Maximal Ratio Combining) が挙げられる。空間多重化には送信・受信側双方の複数アンテナ化が必要だが、MRC は送信アンテナもしくは受信アンテナを複数にするだけで実装可能な技術である。MRC は複数の受信波のうち、最大の信号対雑音比 (SNR: Signal to Noise Ratio) を有する受信波を選択及び合成する技術である [19]。最大比合成法は、すべての受信波の位相が同位相になるよう位相調整した後、合成波の SNR が最大となるように、各受信波にその包絡線を乗算して合成する。このとき、合成波の SNR は各受信波の SNR の和となることが知られている。MRC は IEEE 802.11n 標準規格に含まれている [19]。

MRC はアンテナ数の増設が受信側のみで良いため、本下水管検査システムに MRC を導入した場合、送信機、つまり浮流無線カメラはアンテナ数を増やす必要がなく、AP だけを複数アンテナ搭載のものにすれば良い。また、MRC を使用することによる浮流無線カメラ側の送信処理は、MRC を使用していない時と変わらないため、消費電力の増加もなくバッテリーの容量を増やす必要もない。浮流無線カメラが小型でありながらスループット向上及び通信可能距離延長が見込める MRC は、本システムが想定している小型の浮流無線カメラ実現に適しているといえる。しかしながら、下水管内における無線通信において、MRC を使用した通信の特性を調査する研究はまだ行われていない。

そこで、本研究では、IEEE 802.11n の MRC を用いた通信の下水管環境でのスループット向上及び無線通信可能距離延長効果について、 $\phi 250$ mm ヒューム管及び $\phi 200$ mm 塩ビ管での無線通信実験に基づき検証を行った。



図 3 学内に埋設された実験管
(左 $\phi 250$ mm ヒューム管と右 $\phi 200$ mm 塩ビ管)

3. 下水管内における無線通信のスループット及び RSSI 測定実験

IEEE 802.11n の技術である MRC を使用した通信の下水管環境におけるスループット向上効果を検証するため、大学構内に埋設された実験管においてスループット測定実験を行った。送信側端末は単一アンテナの端末を使用し、AP 側は単一アンテナの端末、複数アンテナ AP を数種を用いた。

3.1 実験環境

本実験は、図 3 のような大学構内に埋設された実験用簡易下水管 (以下、実験管) を用いて行った。実験管は、鉄筋コンクリート製下水管 (以下、ヒューム管) と塩ビ管の 2 種が主に用いられている。ヒューム管は、延長距離 14 m、 $\phi 250$ mm である。ヒューム管には 5 ヶ所の縦穴が開けられており、両端には貯水ますがある。貯水ますから 5 ヶ所の縦穴までの距離はそれぞれ 1.5 m、2.5 m、4.5 m、8.5 m、9.5 m である。塩ビ管は、延長距離 22 m、 $\phi 200$ mm である。管には実験作業のため 1 m ごとに縦穴が配置されている、実験中は縦穴に蓋をした上へ砂嚢を置き、管外へ電波が漏れ出ないようにした。この 2 種の実験管は管の上に 200 mm の土盛りが有り、水平に埋設されている。図 3 の左側が $\phi 250$ mm ヒューム管であり、右側が $\phi 200$ mm 塩ビ

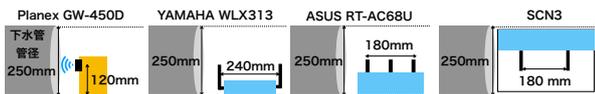


図 4 ヒューム管の管径に対するアンテナ



図 5 下水管に対する AP の配置

管である。

小型 Linux コンピュータ (Raspberry Pi Model B) に IEEE 802.11n 対応の USB 無線 LAN ドングル Planex 社製 GW-450D を接続した端末を発信用端末とした。通信用アンテナはドングル内蔵型の無指向性単一アンテナである。送信電力は 10 mW であり、通信には中心周波数 2.412 GHz 及び 5.18 GHz を使用し、チャンネル幅 20 MHz のチャンネルを使用した。

本実験では、MCS7 と MCS4 に設定した。

本実験では、比較のため受信端末には 4 種類を使用した。そのうち 1 台は上述した送信端末と同じ構成の端末を使用した。他の 2 台の受信端末には、複数アンテナを搭載した AP を LAN ケーブルにより接続した Raspberry Pi Model B を使用した。使用した AP は、ASUS 社製 RT-AC68U と YAMAHA 社製 WLX-313 である。また、実際の下水管においての使用を考慮した AP である Scenargie Comm Node 3[20] のカスタマイズ版 (以下、SCN3) も実験に使用した。実験に使用した下水管の種類及び AP の種類の組み合わせは表 1 に示した。また、 $\phi 250$ mm ヒューム管に対する AP の配置及びアンテナ配置は図 4 と図 5 の通りである。SCN3 は、図 4 及び図 5 の左の写真のように配置する。図 5 の SCN3 の写真の真ん中及び右の写真は管径に対する SCN3 の内部のアンテナの配置である。

3.2 測定方法

送信端末をアンテナが管断面の中央と同じ高さになるように調節して管内に配置し、受信端末を貯水ます内にアンテナの先端が管の中央と同じ高さになるように設置した。両者のスループットはネットワーク測定ツール iPerf を用いて測定した。各測定は以下の手順で行った。(1) 端末を

表 1 測定に使用した AP の種類

	$\phi 250$ mm ヒューム管	$\phi 200$ mm 塩ビ管
2.4GHz	Planex GW-450D YAMAHA WLX313 ASUS RT-AC68U Scenargie Comm Node 3	Planex GW-450D ASUS RT-AC68U
5GHz	Planex GW-450D YAMAHA WLX313 ASUS RT-AC68U	ASUS RT-AC68U

表 2 各機器の端末設定

	Planex GW-450D	YAMAHA WLX313	Scenargie Comm Node 3	ASUS RT-AC68U
アンテナの数	1	2	2	3
アンテナ	逆 F (無指向性)	ダイポール (無指向性)	ダイポール (無指向性)	ダイポール (無指向性)
中心周波数	2.412 GHz / 5.18GHz			
無線規格	IEEE 802.11n			
チャンネル幅	20 MHz			
送信電力	10 mW			
スループット測定方法	iPerf3 on UDP			
送信データレート	65.0 Mbps MCS7 (64-QAM 変調, 符号化率 5/6) 39.0 Mbps MCS4 (16-QAM 変調, 符号化率 3/4)			

設置し、縦穴の蓋と土嚢で縦穴を閉じる。(2) 12 秒間 UDP により通信した。(3) (1) - (2) を 10 回行いスループットの平均を測定した。この測定実験を 3 回実施した。本実験では管内に水は存在しない。測定に使用した機器の設定を表 2 に示す。

4. スループット測定実験結果

まず、 $\phi 250$ mm ヒューム管におけるスループット測定結果を示す。中心周波数 2.412 GHz のスループット測定の結果を図 6 に示し、中心周波数 5.18 GHz のスループット測定の結果を図 7 に示す。

2.4 GHz の MCS7 の場合には、GW-450D は端末間距離が 1 - 5 m では 40 Mbps 以上を維持しており、6 m 以上ではスループットは急落した。対して、RT-AC68U は端末間距離が 1-5 m まで 50 Mbps を維持し、6 m ではスループットが 30 Mbps となった。WLX313 は端末間距離が 3 m まででは 50 Mbps を維持しているが、4 m 以上はスループットが急落した。2.4 GHz の MCS4 の場合、GW-450D は端末間距離が 4 m 以上では、わずかにスループットが減少し、6 m 以上でスループットが急落したのに対し、RT-AC68U は端末間距離が 1 - 6 m において、スループットは減少せず維持された。アンテナが 2 本である WLX313 及び SCN3 とアンテナが 3 本である RT-AC68U の両者には、大きな差が見られなかった。

5 GHz の MCS4 の場合には、GW-450D は端末間距離が 1 - 10 m において、スループットは高く安定していた。アンテナ 2 本の RT-AC68U についても端末間距離が 1 - 10 m

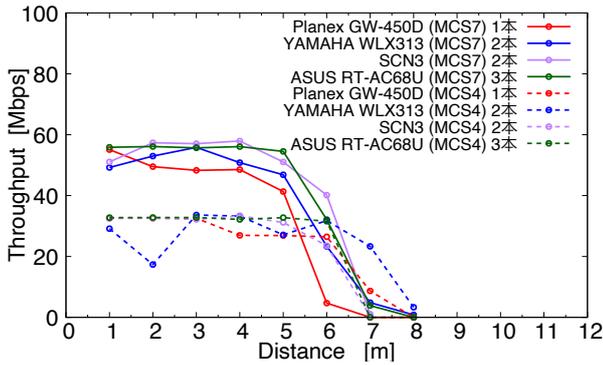


図 6 $\phi 250$ mm ヒューム管のスループット (2.4GHz)

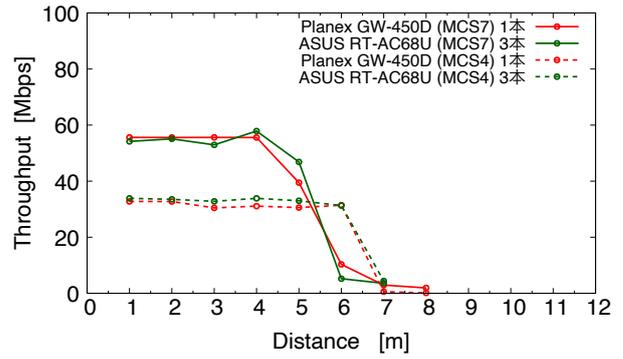


図 8 $\phi 200$ mm 塩ビ管のスループット (2.4GHz)

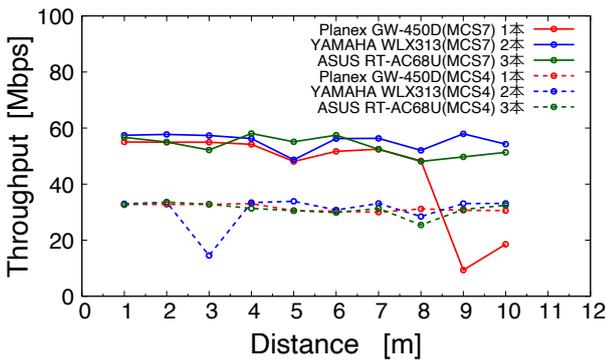


図 7 $\phi 250$ mm ヒューム管のスループット (5GHz)

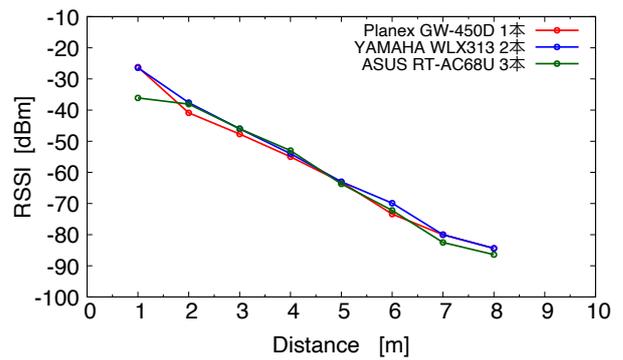


図 9 $\phi 250$ mm ヒューム管の RSSI (2.4GHz)

において、スループットが高く安定する結果していた。アンテナ3本のWLX313も端末間距離が1-10mにおいてスループットが高く安定しているが、端末間距離が3mにおいて急激にスループットが減少した。3機種のスループットに大きな差は見られなかった。5GHzのMCS7の場合には、アンテナ2本のRT-AC68Uについては端末間距離が1-10mにおいて、スループットが高く安定した。アンテナ3本のWLX313も端末間距離が1-10mにおいてスループットが高く安定した。GW-450Dは端末間距離が1-8mにおいて、スループットは高く安定したが、RT-AC68UとWLX313とは違い、端末間距離が8m以上になると、スループットが急落した。アンテナ2本のRT-AC68Uとアンテナ3本のWLX313を比較した場合、端末間距離が1-6mについては大きな差は見られないが、端末間距離が6m以上では、WLX313の方が、スループットは高かった。

$\phi 200$ mm 塩ビ管の結果について、中心周波数 5.18 GHz の MCS4 及び MCS7 の結果を図 8 に示す。ASUS RT-AC68U の方が、単一アンテナである Planex GW-450D よりも端末間距離 5 m の時のみ、より高いスループットを維持した。しかしながら、 $\phi 200$ mm 塩ビ管における複数アンテナの AP の使用によるスループット向上効果はわずかでしかなく、 $\phi 200$ mm 塩ビ管においては、単一アンテナを用いた時と複数アンテナを用いた時はスループットに大きな差は見られないといえる。

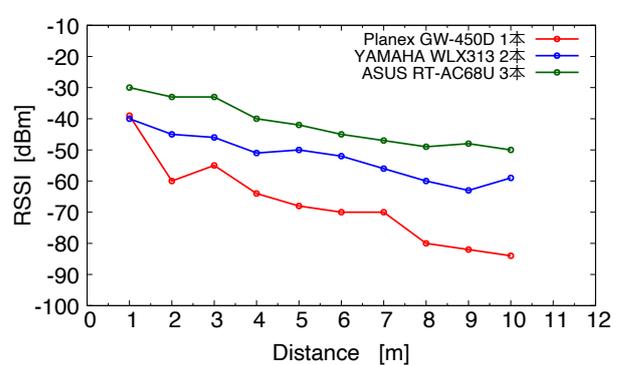


図 10 $\phi 250$ mm ヒューム管の RSSI (5GHz)

5. 考察

$\phi 250$ mm ヒューム管における中心周波数 5.18GHz の条件で、GW-450D が端末間距離が 8 m 以上ではスループットが低下したのに対し、複数アンテナの 2 機種がスループットが低下しなかった原因として、複数のアンテナ使用による MRC により、単一アンテナでは、受信電力が弱くなり通信が困難になる端末間距離 8 m においても、複数アンテナの AP は受信電力が安定したため、スループットを維持したことが考えられる。

$\phi 250$ mm ヒューム管における 2.4 GHz 帯通信において複数アンテナの AP の通信可能距離が伸びなかった理由を検討するため、同じ実験環境、実験設定で RSSI (受信信

号強度)を測定した。その結果を図9及び図10に示す。2.4GHz帯の通信のRSSIは、単一アンテナ及び複数アンテナ2機種では大きな差は見られなかった。この結果から、複数アンテナのAPを使用しても受信電力の向上ができないことが考えられる。そのため、複数アンテナのAPと単一アンテナのAPの通信可能距離に差が見られなかったと考えられる。

2.4GHz帯の通信において単一アンテナと複数アンテナのAPのRSSIが変わらなかった原因を考察する。式1により計算すると、2.4GHz帯通信における通信距離8mを実現するためのフレネルゾーンの60%を満たすフレネル半径は、約290mmである。このため、今回実験に使用したφ250mmヒューム管の直径では、フレネルゾーンの60%を確保できず、端末間距離5m以上において電波減衰が激しくMRCを用いても、大きな受信電力の向上ができなかったと考えられる。また、φ200mm塩ビ管における5GHz帯通信の通信可能距離が伸びなかった原因も同様であると考えられる。

5GHz帯の通信のRSSIの測定結果(図10)によると、複数アンテナのAPの2台は端末間距離が10mの時点でRSSIを-60dBm以上を維持している。単一アンテナの端末のRSSIが-60dBm以上を維持している端末間距離は3mから4mであることを考慮すると、APに複数アンテナを使用することでより長い通信可能距離が実現できると考えられる。

本実験の測定結果からφ250mmヒューム管内における転送可能データ量を考察する。単一アンテナのAPは5GHz帯通信かつMCS4(39Mbps)を用いた際が最も通信可能距離が長く、通信可能距離はAPの前後20mである。複数アンテナのAPは5GHz帯通信かつMCS7(65Mbps)を用いた際が最も通信可能距離が長く、通信可能距離はAPの前後20mである。下水管内の流速は平均的に0.3m/sであることがわかっている[8]。したがって、単一アンテナ及び複数アンテナどちらもAPと観測機の通信可能時間は、約67秒程度である。

単一アンテナのAP及び複数アンテナのAPの通信可能時間と今回のスループットの測定結果から、それぞれの送信可能データ量を計算すると、単一アンテナのAPの送信可能データ量は約251MBである。複数アンテナのAPの送信可能データ量は約470MBである。単一アンテナのAPに比べ、複数アンテナのAPの送信可能データ量は約1.9倍である。

Apple社製スマートフォンiPhoneXSで実際にMP4動画(圧縮規格:H.264)を撮影した場合、フレームサイズ1920×1080フレームレート30fps動画の容量が60秒60MBほどであった。このことから、単一アンテナの1つのAPとの通信時に送信可能なデータ量である251MBを計算すると、251秒程度となり、流速0.3m/sで計算する

と、下水管延長距離約75m分のデータとなるのに対し、複数アンテナの場合、470MBは470秒分となり、約141m分の映像が送ることができる。

6. まとめ

本研究では、下水環境において複数のアンテナのAPを用いることにより、IEEE802.11n通信におけるMRCがスループット向上及び通信可能距離延長に有効であるかを検証するため、大学構内にある下水実験管であるφ250mmヒューム管及びφ200mm塩ビ管において実施したスループット測定実験について報告した。測定の結果、φ250mmヒューム管における2.4GHz帯通信では複数アンテナのAPは、単一アンテナのAPと比べ通信可能距離が1m増大し、また近距離においてもわずかながら複数アンテナのAPの方がスループットは増大した。φ250mmヒューム管における5GHz帯通信では、複数アンテナのAPは単一アンテナのAPよりも通信可能範囲が2m増大する結果となった。φ200mm塩ビ管における5GHz帯通信では、複数アンテナのAPは単一アンテナに比べわずかではあるもののスループットが向上する結果となった。複数アンテナのAPを本システムに取り入れることにより下水管内の通信可能距離延長が可能であり、APへの転送可能データ量の向上が可能であることがわかった。

今後の課題として浮流観測機からのデータ転送の高音頼化、下水管内のAPから下水管外のサーバーへのデータ転送などがある。鉄製のマンホールを閉じた状態で、セルラ無線でマンホール内から外部に送信することは容易ではない。このため、専用のマンホールアンテナが製品化されている。これらと連動させたシステムの実現を検討する予定である。

謝辞

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表す。

参考文献

- [1] 国土交通省, “下水道の維持管理” http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/seweraage/crd_seweraage_tk_000135.html. (2020/4/30 確認).
- [2] 広島市下水道局, “広島市下水道管路施設の点検・調査マニュアル 管きょ・マンホール編” (2015).
- [3] 管清工業, 株式会社日水コン, 八王子市 “管口カメラ点検と展開広角カメラ調査及びプロファイリング技術による管渠マネジメントシステム” <https://www.mlit.go.jp/common/001228052.pdf> (2020/4/30 確認)
- [4] 株式会社キュー・アイ: “長距離走行型デジタル伝送 TVカメラ装置 PV-2300.” <http://www.qi-inc.com/index>.

- php?e=57 (2020/04/30 確認) .
- [5] 関根勇: “ストリーム・カメラシステムによる幹線管きよの TV カメラ調査について,” 月間下水道, Vol. 34, No. 3, pp. 55–58 (2011).
- [6] 高島英二郎, “下水管ストックマネジメントの最新動向 国土技術政策総合研究所資料,” No.759, pp.45–64 (2017).
- [7] 国土交通省国土技術政策総合研究所, “下水道革新的技術実証事業” http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000450.html (2020/04/30 確認).
- [8] 石原進, 武居悠樹, 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, 分散システムとマルチメディア通信研究会, Vol.2017–DPS–172, No.4, pp.1–8 (2017).
- [9] 高田潤一: “電波伝搬の基礎理論,” in prof. Microwave Workshops and Exhibition (2005).
- [10] 山口芳雄, 阿部武雄, 関口利男: “トンネル内の基本モードの伝搬特性,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. 65, No. 4, pp. 471–476 (1982).
- [11] Nagashima, T., Tanaka, Y., Ishihara, S.: “Measurement of Wireless LAN characteristics in sewer pipes for sewer inspection systems using drifting wireless sensor nodes,” *IEICE Trans. on Communications*, Vol. E99-B, No. 9, pp. 1989–1997 (2016).
- [12] 島田彩加, 川合 健斗, 武居 悠樹, 石原進, “250mm 径鉄筋コンクリート製下水管内における 5GHz 浮流無線 LAN 端末の通信性能調査,” 第 81 回全国大会講演論文集, Vol. 1, No. 3, pp. 77–78 (2019).
- [13] 武居悠樹, 住山真, 西島達哉, 劉志, 石原進, “直径 200mm 下水管内における浮流無線 LAN 端末の詳細位置推定,” マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2018 論文集, vol.2018, pp166–171 (2018).
- [14] Stoianov, I., Nachman, L., Madden, S., Tokmouline, T., Csail, M., “in prof.PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring,” 2007 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, pp.264–273 (2007).
- [15] Kim, J., Lim, J. S., Friedman, J., Lee, U., Vieira, L., Rosso, D., Gerla, M. and Srivastava, M. B.: SewerSnort: A drifting sensor for in-situ sewer gas monitoring, 2009 6th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, pp. 1–9 (2009).
- [16] Crossbow Technology, “MICAz datasheet,” http://www.openautomation.net/uploadsproductos/micaz_datasheet.pdf. (2020/4/30 確認)
- [17] P. Branch and T. Cricenti, “A LoRa Based Wireless Relay Network for Actuator Data,” in prof.2020 International Conference on Information Networking (ICOIN), Barcelona, Spain, pp. 190-195 (2020)
- [18] 府川和彦, 電子情報通信学会, “7 章 MIMO 伝送, 知識ベース”, (2009), http://www.ieice-hbkb.org/files/04/04gun_01hen_07.pdf. (2020/4/30 確認).
- [19] 府川和彦, 電子情報通信学会, “6 章 ダイバーシチ技術, 知識ベース”, (2009), http://www.ieice-hbkb.org/files/04/04gun_01hen_06.pdf. (2020/4/30 確認).
- [20] Space-time engineering, “Scenargie Comm Node,” https://www.spacetime-eng.com/jp/products?page=Products_Scenargie_Comm_Node_jp. (2020/4/30 確認).