

# 映像伝送を目的とした下水管内IEEE802.11n無線LANにおけるチャンネルボンディングと複数チャンネル並列通信の適用

武居 悠樹<sup>1</sup> 田中 悠大<sup>1</sup> 石原 進<sup>2</sup>

**概要:** 日本では下水管の老朽化が深刻化しており, その検査と整備は急務である. 現行の検査手法は, 金銭的コストが高い, 検査時間が長いなどの問題を抱えている. 筆者らは, 短時間・低コストな下水管検査手法として, 浮流観測ノードを用いた検査システムを提案している. このシステムでは, カメラ付き浮流ノードが撮影した管内の映像を無線通信によって回収し, その映像を元に検査を行う. 多くの電波減衰要因が存在する下水管環境では, 無線通信距離が短くなるため, 高画質な検査用映像の伝送には高いスループットを持った無線通信が必要である. 本稿では, 実験用下水管でIEEE802.11nでの通信のスループットを実測し, チャンネルボンディングを使用した通信と, 2つのインタフェースを同時に使用して通信を行う2チャンネル並列通信の, それぞれのスループット向上効果を調査した. この結果, チャンネルボンディングの通信性能向上効果が見られるのは端末間距離が短い場合に限定されていることがわかった, 2チャンネル並列通信による200m径下水道管内の無線通信の性能向上は認められなかった.

## Effect of channel bonding and parallel data transmission with multiple interfaces of IEEE802.11n Wireless LAN for video transmission in sewer pipes

Yuki TAKEI<sup>1</sup> Yudai TANAKA<sup>1</sup> Susumu ISHIHARA<sup>2</sup>

### 1. はじめに

今日, 日本では, 下水管の老朽化が深刻な問題となっている. 国内の下水管の総延長47万kmのうち40%以上が耐用年数である30年を超えて設置されている[1][2]. また, 老朽化下水管を原因とした道路陥没事故が年間3000件以上発生している[3]. こうした中で, 早急な検査と危険個所の補修・交換が必要とされている. 現在の下水管検査は目視検査[4], 管口カメラ[5], 有線ロボット[6], 船型カメラ[7]などを中心とした検査手法によって行われている. しかしながら, これらの手法が金銭的・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[3]. 今後も増加する老朽管に対して早急に検査を行うため, 低コスト・短時間で検査が可能な下水管検査手法の開発が必要とされている[8].

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, 浮流観測ノードを用いた下水管検査システム(図1)を提案している[9]. このシステムは, 検査対象の下水管内を流れるカメラ付き無線通信ノードが管内を撮影し, 下流のマンホール下に設置されたアクセスポイント(AP)が, 無線通信によって映像データを回収するシステムである. 下水管内での2.4GHz帯及び5GHz帯を使用した出力10mW/MHzの無線通信は, 管の内外の土砂や水の影響を受け, 通信範囲は数m程度にとどまる[10]. また, カメラノードが管内の流れに乗って移動し続けるため, 一つのAPとノードが通信できる時間も短い. 本システムの実現には管内を撮影した映像のような大容量のデータを限られた時間内に伝送しきるための高速な無線通信が必要である.

先行研究によって, 直径20cmの下水管環境では, 同一出力の920MHz帯, 2.4GHz帯, 5GHz帯を比較した場合, より高い周波数帯を使用すると通信可能距離が長くなることが分かっている. また, IEEE 802.11a[11]規格

<sup>1</sup> 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻

<sup>2</sup> 静岡大学大学院工学領域

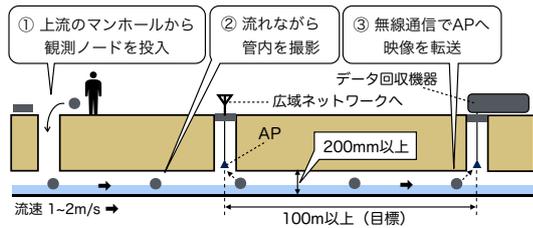


図 1 浮流無線カメラノードを用いた映像伝送システム

の無線 LAN 通信を使用した場合の転送可能データ量も調査されている [10]. IEEE 802.11a よりも後発の規格である IEEE 802.11n [12] では、チャンネルボンディングなどの IEEE 802.11a にはなかった通信高速化技術が利用できる。しかし、これまでに直径 20cm の下水管環境での IEEE 802.11n 規格の無線通信の性能の測定は行われてこなかった。

本稿では、(i) IEEE 802.11n のチャンネルボンディングによる 40MHz 幅チャンネルを使用した通信と、(ii) 2つの無線通信インタフェースを同時に使用した 2チャンネル並列通信の 2つの手法によるスループット向上効果を、模擬下水管環境での実測実験に基づいて評価する。

本稿の要点は以下の通りである。

- (1) チャンネルボンディングと 2チャンネル並列通信の、下水管内無線通信における通信速度の向上効果について、実験用模擬下水管での通信スループットの実測に基づき評価した。
- (2) 実測結果より、チャンネルボンディングは端末間距離が近い地点でなければ速度向上効果が得られないこと、また 2チャンネル並列通信の通信性能には、通信端末のアンテナ位置が影響を与えることを示した。

以下、2章で本稿での議論に関連する研究や無線通信技術について述べる。3章で石原らが提案する浮流無線カメラノードを用いた映像伝送システムの詳細を述べ、当システムの課題と本稿で検討したその解決方針を 4章で述べる。5章で模擬下水管内での無線通信の実測実験に基づいた 2種類の通信手法のスループット向上効果について考察、最後に、6章でまとめを述べる。

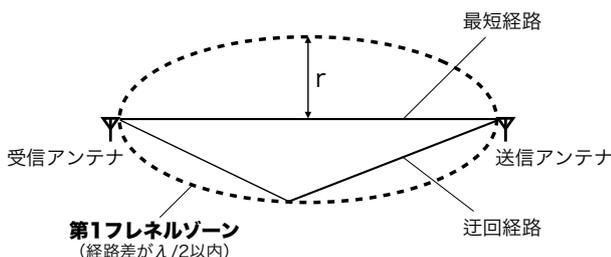


図 2 第 1 フレネルゾーン

## 2. 関連研究

### 2.1 フレネルゾーンとトンネル内電波伝搬

トンネル内での無線電波通信では、受信側と送信側のアンテナの間の第 1 フレネルゾーンの確保が重要である。

第 1 フレネルゾーンとは、送信機から発射された電波が最短経路で受信機まで到達する場合の経路長と、迂回経路を通過して到達する場合の経路長の差が  $\lambda/2$  以内になる範囲 (図 2) のことである [13]. 定義からわかるように、第 1 フレネルゾーンは、通信周波数が低いほど大きく、高いほど小さくなる。またこの空間は、送信機と受信機のそれぞれのアンテナを両端とする回転楕円体であるため、アンテナ同士が離れるほど大きくなる。障害物が第 1 フレネルゾーンの 40%以上を占めるようになると、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。第 1 フレネルゾーン内に十分な空間があれば、通信の見通しが確保されていると言える。

アンテナ間の距離が同じ場合、通信の見通しを確保するために必要な空間は、高い周波数帯を使用する場合の方が小さい。トンネル内電波伝搬では、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 [14].

### 2.2 無線電波通信を用いた管渠施設の検査

管渠設備の低コストな検査手法は現在、活発に研究・開発が行われている。Stoianov らが提案する PipeNet [15] や、Kim らが提案する SPAMMS [16] は、検査対象の管の内外に設置された固定センサのセンシングデータに基づいて管渠設備の検査を行うシステムである。これらの手法による管渠設備の検査を実施するためには、あらかじめ管渠設備に各種センサなどを設置する必要がある。また、Kim らは、マンホール裏のビーコン発信器と管内を流れる浮流センサによって硫化水素濃度のセンシングを行うシステムである SewerSnort [17] を提案している。この手法では、浮流ノードが管内のガス濃度のセンシングを行いながら移動し、マンホール下の発信器から受信したビーコンの情報に基づいてセンシングデータに位置情報を付与する。ビーコン発信器と浮流ノードは一方方向の通信を行っており、浮流ノード

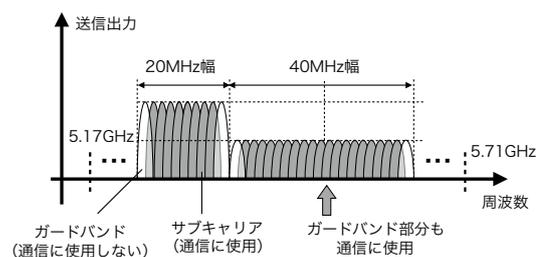


図 3 チャンネルボンディング

はデータの送信を行っていない。

### 2.3 チャンネルボンディングを使用した通信

5GHz 帯で使用される IEEE 802.11a, n, ac[18] では、オプションを用いない場合、20MHz 幅チャンネルを用いて OFDM による無線通信を行う。IEEE 802.11a/n/ac では、隣接した 20MHz 幅チャンネルをまとめて使用することにより、多くのサブキャリアを用いることでより高速な通信を可能としている。これをチャンネルボンディングと呼ぶ(図??)。ただし端末 1 台あたりの出力はチャンネルボンディングを使用しない場合と同じとなるよう規制されている。したがって、チャンネルボンディングによって 40MHz のチャンネルを使用する場合、サブキャリアあたりの出力は、20MHz 幅のチャンネルを使用する場合に比べて半分になる [19]。

## 3. 浮流無線カメラノードを用いた映像伝送システム

石原らは、短時間・低コストで下水管検査を行う検査手法として、図 1 に示す「浮流無線カメラノードを用いた映像伝送システム」(以下、「本システム」と呼ぶ)による検査を提案している [9]。本システムは直径 20cm の下水管の検査を想定している。これは、分流型<sup>\*1</sup>の下水道の幹線に一般的に用いられているのが直径 20cm 管であり、この直径の管の敷設延長が他の直径の管に比べて長いためである。

### 3.1 映像伝送システムの構成

本システムは、浮流無線カメラノード (以下「ノード」) と、アクセスポイント (以下「AP」) の 2 種類の機器で構成される。

ノードは、カメラ、照明、無線通信設備、バッテリー、小型コンピュータを備える。下水管検査実施時、ノードは、直径 20cm の下水管の中に投入され、管内の下水流に流されて移動しなければならないため、小型である必要がある。澤野らによって、直径 12cm の球形防水カプセルに各種機器を封入した試作型のノードが製作されており、パイプ内映像の撮影実験などが行われている [20]。AP は、無線通信設備、小型コンピュータ、バッテリーを備え、映像データをインターネット上のサーバへ保存する機能をもつ。検査時には、AP はマンホール内に設置されるため、小型でなければならない。現在は、AP 本体はマンホールの蓋の裏に固定され、通信用のアンテナが下水管の中央近くまで吊り下げられるような設計が検討されている。

ノードと AP は、下水管内で無線通信を行う。機器のコストを安価にするため、ノードと AP に搭載する無線通信機器は、ISM 帯の無線通信に対応した小型の市販品を用いる。

### 3.2 映像伝送システムを用いた下水管検査

本システムによる下水管検査は、地上に伝送された下水管内の映像を検査員がチェックする形で行われる。下水管内の映像は、検査区間の上流から投入されたノードが管内を流れながら撮影する。ノードは、検査区間内のマンホールを通過するたびに、そのマンホール内に設置された AP へ向けて、1 つ前の AP との間で撮影した映像データを転送する。AP に転送された映像は、さらに地上のデータ保存用サーバへ転送され、検査員が確認する。

検査時には複数のノードが管内へ投入され、ノードの故障や撮影・通信の失敗に備える。また、本システムによる下水管検査は、一度に最大数 km 程度の規模で行われることを想定している。これは、幹線となる下水道の下流の下水処理場までの距離が最大でも数 km 程度であるためである。

### 3.3 本システムを用いて下水管検査を行うメリット

本システムは、安全で短時間かつ低コストな下水管検査の実現を目指すものである。本システムによる検査は、検査員がマンホール内に入って行う作業がないため安全である。また、現地で検査に使用する機器はノードと AP のみであるため、現行の検査手法に比べ機器コストが低くなる。さらに、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、ノードが撮影した映像を準リアルタイムで確認できるため、撮影の失敗やノードの故障を素早く把握でき、再検査実施までの検討時間が短く済む。

## 4. データ転送速度向上の方法

### 4.1 下水管検査映像の伝送に必要な伝送速度

下水管内の無線電波通信は、管内外の障害物による電波減衰が大きいために通信可能距離が短いため、地上へ映像を伝送するためには、ノードが撮影した映像全てを、ノードが AP と通信可能な短い期間の間に送りきる必要がある。長島らは、直径 20cm の下水管環境での 3 つの ISM 帯の無線通信の通信可能距離を調査している。[10] によれば、送信電力 10mW の場合、それぞれの通信可能距離は、920MHz 帯及び 2.4GHz 帯の通信では約 2~3m、5GHz 帯を使用する場合は約 8m である。このため、AP の通信可能範囲は、5GHz 帯で通信する場合でも、最大約 16m である。下水管内で、ノードは流速約 1m/s の下水流に流されて移動するため、AP の通信可能範囲に留まれるのは最大約 16 秒である。したがって、通信機会 1 回あたりの通信時間も最大約 16 秒である。

AP の設置間隔は、ノードと AP の 1 度の接続機会の間転送可能なデータ量、AP 設置が可能なマンホールの位置、AP 設置に伴う作業時間及び作業コスト (開いたマンホールの監視や交通整理作業) を考慮して決められる必要

\*1 汚水と雨水を異なる管で流す方式

がある。理想的には、AP の設置間隔はより長い方が AP 設置時の作業時間を減らすことができるので有利である。ここでは AP 設置間隔が 100m であると考え、前述のようにノードは 1m/s で移動する。したがって、AP の設置間隔が 100m ならば、ノードは 1 度の通信機会ですべて 100 秒分の映像を転送しなければならない。また、ノードが撮影する映像は、検査員が下水管の破損などを発見できる画質で撮影しなければならない。船型カメラ [7] を使用した検査では、ビットレート 4Mbit/s で管内を撮影している。これと同等の画質で撮影を行うとすると、100 秒の映像のデータサイズは約 52MBytes である。

通信のオーバーヘッドなどを考慮すると、52MBytes のデータを転送するためには、60MByte 程度の通信が必要である。したがって、本システムによって下水管内の映像を地上へ伝送するためには、転送可能データ量を最低でも 60MBytes 確保しなければならない。長島らは [10] で、IEEE 802.11a 規格の通信を使用した場合の最大転送可能データ量は約 42.5MBytes 程度であると報告しており、この通信性能では映像データを転送しきれない。本システムの実現のため、転送可能データ量のさらなる増加が望まれる。

#### 4.2 転送可能データ量の増加方針の検討

転送可能データ量は、通信可能時間と通信速度から求められる。通信可能時間は、通信可能範囲とノードの移動速度から求められる。通信時間の延長のためには通信可能範囲の拡大が必要である。通信可能範囲は、前述のように無線通信に使用する周波数帯によって異なる。先行研究での実測結果より、5GHz 帯よりも高い周波数帯での通信によって通信可能範囲を拡大できると推測される。60GHz 帯を使用する無線 LAN 規格 IEEE 802.11ad の標準化が完了しているが、現時点では、Linux コンピュータで制御でき、かつ 5GHz 帯よりも高い周波数帯で通信が可能な小型の無線通信デバイスは市販されていない。そこで、5GHz 帯を用いてより高速に通信することを検討する。

##### 4.2.1 チャンネルボンディングの利用

下水管内無線通信の通信速度向上のための手段の 1 つは、IEEE 802.11n のチャンネルボンディングによる 40MHz 幅チャンネルの使用である。IEEE 802.11n では 40MHz 幅チャンネルが、IEEE 802.11ac では 40MHz 80MHz、160MHz 幅チャンネルが利用可能である。これまで、直径 20cm の下水管環境でチャンネルボンディングを用いた通信のスループットの実測は行われてこなかった。そのため本稿では、まず規模の小さいチャンネルボンディングの効果を調査することとし、IEEE 802.11n による 40MHz 幅チャンネルを使用した通信の性能の調査を行った。

##### 4.2.2 複数チャンネル並列通信の利用

もう 1 つの通信速度向上のための手段は、複数の無線イ

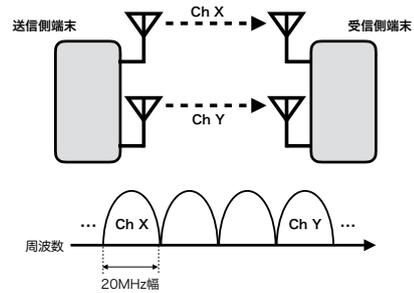


図 4 複数チャンネル並列通信

ンタフェースを使用した複数チャンネル並列通信である (図 4)。

複数チャンネル並列通信を行う場合は、チャンネル間干渉を考慮しなければならない。使用する通信チャンネルが異なっても、アンテナ間距離ならびにチャンネルの使用周波数が近い場合には、互いの電波による干渉により、通信速度が低下する [21]。干渉の影響を避けるためには、アンテナを十分に離して設置する必要がある。しかしながら、狭い下水管を流れるカプセル内に複数のアンテナを配置する場合、アンテナ間距離を十分大きくすることは困難である。

これまで、直径 20cm の下水管環境で複数チャンネル並列通信のスループットの実測は行われてこなかった。本稿では、2 つの無線通信インタフェースを利用する 2 チャンネル並列通信の性能の調査を行った。

### 5. 模擬下水管環境における無線通信実験

5GHz 帯で IEEE 802.11n を用い、チャンネルボンディングによる 40MHz 幅チャンネルを使用した無線通信と、2 つの通信インタフェースを使用した 2 チャンネル並列通信のそれぞれの下水管環境におけるスループット向上効果を調査するため実験を行った。

#### 5.1 実験環境

図 5 に示すように土中に VU 管を埋めて模擬的に下水道環境を構築した。模擬下水管は大学所有の農場の一角に設置した。模擬下水管には、長さ 12m、直径 200mm、厚さ 6.5mm の PVC 素材の VU 管を使用し、これを地表から下水管の底までの深さが 400mm となるように埋設した。また、VU 管には 2m ごとに縦穴が配置されており、ここから通信端末を挿入した。実験中は縦穴に蓋をし、その上に

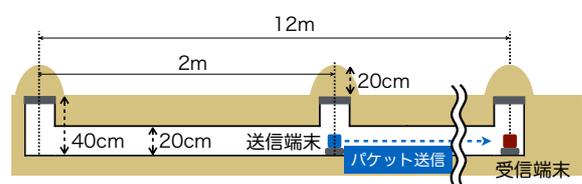


図 5 実験用模擬下水管環境



図 6 チャンネルボンディングを用いた通信実験に使用した通信端末



図 7 Raspberry Pi を 2 台使用した 2 チャンネル並列通信実験の無線通信端末

厚さ 200mm 以上の盛り土をし、管外へ電波が漏れ出ないようにした。実験中は、管内の通信に影響を与えないよう、観測者は模擬下水管から十分離れて待機した。

小型 Linux コンピュータの Raspberry Pi Model B に、IEEE 802.11n 規格に対応した無線通信 USB ドングル GW-450D (Planex 社製) を接続し、無線通信端末とした (図 ??)。また、端末への給電のため、Raspberry Pi とほぼ同サイズのバッテリーを使用した。

2 チャンネル並列通信を使った実験時には、複数の無線通信インタフェースを使用するために、無線通信 dongle を 1 つ接続した Raspberry Pi 2 台 1 組を 1 台の無線通信端末として扱った。各端末では、2 つのアンテナを 12cm 離して固定した (図 7)。アンテナの間隔は、澤野らによる 20cm 径下水管内撮影用ノードの試作品 [20] のサイズを参考に決定した。スループットの計測のため、通信性能計測ソフトウェア iperf [22] を使用した。スクリプトにより、実験用ノードの設置と盛り土処置終了後に iperf が各種の条件で測定を行うよう動作させた。

実験では、5GHz 帯のうち W52 帯と呼ばれる屋内専用の周波数帯 (5.17GHz~5.25GHz) を使用した。模擬下水管は地中に埋められており、管内で発せられた電波は管外へ漏れ出ないような環境であるため、管内を屋内環境とみなした。チャンネルボンディングを使用した通信では、36Ch (中心周波数 5.18GHz) と 40Ch (同 5.20GHz) を同時に使用して通信した。2 チャンネル並列通信を用いた通信では、チャンネル間干渉の影響を少なくするため、36Ch と 48Ch (同 5.24GHz) を使用した。また、比較のため計測し

た 20MHz チャンネルを 1 つ使用する通信では、36Ch を使用した。受信側の端末と送信側の端末は、アドホックモードで接続した。

チャンネルボンディングと 2 チャンネル並列通信の効果の調査のための実験では、IEEE 802.11n 規格通信の MCS を 7 に設定した。MCS が 7 のときには、データは符号化率 5/6 で符号化され、64-QAM 変調が施される。この設定は、OFDM シンボル 1 つあたりのデータ量が最も多くなるため、IEEE 802.11n での理論上のスループットが最も高い。一方、複数アンテナの配置の影響の調査のための実験では、MCS は 4 に設定した。MCS が 4 のときには、データは符号化率 3/4 で符号化され、16-QAM 変調が施される。この設定を選択したのは、長島らによる調査 [10] で、IEEE 802.11a での通信で最も転送可能データ量が大きくなる符号化率・変調方式が、符号化率 3/4、16-QAM 変調だったためである。

## 5.2 測定方法

### 5.2.1 チャンネルボンディングと 2 チャンネル並列通信の効果の調査

模擬下水管内で、2 つの無線通信端末の端末間距離を、2m から 10m に変化させながら、2 種類の通信のスループットを計測した。各地点で iperf による計測を 10 回ずつ実施し、その平均値を計測値とした。1 回の計測ごとに、送信側から 10 秒間のデータ送信を行い、10 秒間の平均値を各回の計測値とした。また、一連の計測を、ネットワーク層の通信プロトコルに TCP を使用する場合と UDP を使用する場合それぞれに対して行った。

チャンネルボンディングを用いた通信の計測時には、管内へ無線通信端末を設置する際に、フレネルゾーン内の障害物を減らすため、アンテナが管断面の中央に配置されるようにした (図 8 (a)) アンテナを管の断面中央に配置することで通信可能距離を延ばすことができるのは、[10] で確認済である。2 チャンネル並列通信を用いた通信の計測時には、管の底から 10cm の高さに 2 つのアンテナが横並びに配置されるようにした (図 8 (b))。

### 5.2.2 複数アンテナの配置の影響の調査

複数アンテナの配置が通信性能に及ぼす影響を調べるため、2 チャンネル並列通信の無線通信端末のアンテナを横並びに配置した場合と、縦列に配置した場合におけるスループットを計測した。アンテナを横に並べた配置は、それぞれのアンテナが受ける電波減衰の影響が最も大きい配置である。一方、アンテナを縦に並べた配置は、一つ一つのアンテナが全て管の中央に配置されるため、電波減衰の影響を最も受けにくい配置である。iperf による計測の流れは、前節の実験と同様である。横並びに配置した場合の計測では、端末間距離を 2m から 10m まで変化させ、縦列に配置した場合の計測では、1m から 12m まで変化させた。

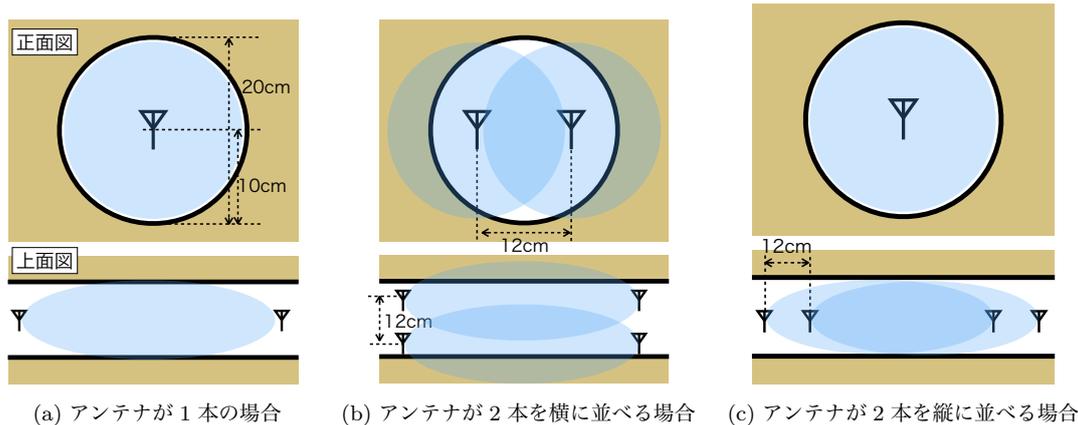


図 8 アンテナの設置位置とフレネルゾーン (水色の楕円)

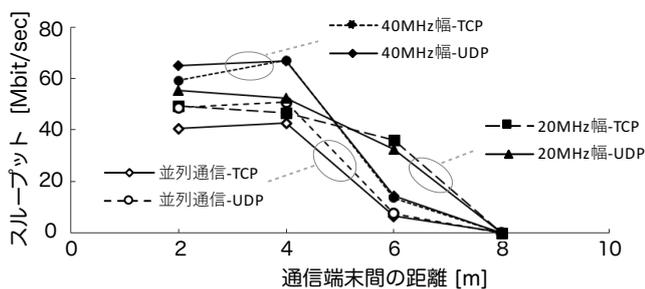


図 9 チャンネルボンディングを使用した通信と 2 チャンネル並列通信のスループットと距離の関係 (MCS7 の場合)

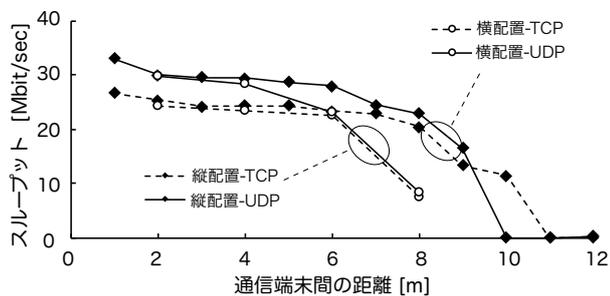


図 10 2 チャンネル並列通信におけるアンテナ配置とスループットの関係 (MCS4 の場合)

### 5.3 実験結果

MCS を 7 に設定した一連の実験でのスループット測定結果を図 9 に示す。

チャンネルボンディングを使用した通信のスループットは、端末間距離が 4m 以内の地点で約 65Mbit/s (UDP) であり、20MHz 幅チャンネルの通信と比べて 10~20Mbit/s 高い。一方、6m 地点のスループットは約 18Mbit/s で、単独チャンネルの通信と比べて約 20Mbit/s 低い。8m 地点ではスループットはほぼ 0 である。単独チャンネルの通信のスループットも、距離が離れるにつれて低下しているが、チャンネルボンディングを使用した通信の方が 4m 地点から 6m 地点へかけての変化が大きい。6m 地点での大幅なスループットの低下は、チャンネルボンディングの使用に伴うサブキャリア 1 本あたりの送信電力の低下によって、信号

の復号に十分な受信信号強度が得られなかったことが原因と考えられる。

2 チャンネル並列通信のスループットは、端末間距離が 4m 以内の地点では約 45Mbit/s (UDP) で、これは単独チャンネルの通信のスループットよりも 5~10Mbit/s 程度低い。また、チャンネルボンディングを使用した通信と同様に、6m 地点で大きくスループットが低下し、約 10Mbit/s となっており、これは単独チャンネルの通信のスループットよりも約 30Mbit/s 低い。2 チャンネル並列通信は、単独チャンネルの通信よりも多くのチャンネルを使用してデータ転送を行っているにも関わらず、そのスループットは全ての地点で単独チャンネルの通信よりも低かった。

2 チャンネル並列通信が単独チャンネルの通信よりも低いスループットしか得られなかったのは、無線通信端末のアンテナの位置が、電波減衰の影響を受けやすい配置だったためと考えられる。図 8 の (b) のように配置では、単独チャンネルの通信のアンテナ配置に比べ、アンテナ一つ一つのフレネルゾーンに侵入する障害物が多く、電波減衰の影響を受けやすい。また、単独チャンネルの通信では発生しない、チャンネル間干渉によるスループットの低下も発生したものと考えられる。

MCS を 4 に設定して計測した 2 チャンネル並列通信のスループットの計測結果を図 10 に示す。2 本のアンテナが管の進行方向 (縦列) に並んで配置された場合、つまり両者が管の中央に配置された場合は、端末間距離が 8m となる地点まで、UDP 使用時に置いてスループットが 25~35Mbit/s の間でほぼ横ばいに保たれている (UDP)。一方、アンテナを管の進行方向に対して横に並べて配置した場合は、スループットが 25Mbit/s 以上に保たれているのは 6m 地点までである。この通信性能の差は、アンテナの配置の違いによる電波減衰の大きさの差に起因するものと考えられる。アンテナを縦列配置すると、横に並べて配置する場合に比べて電波減衰の影響が少なくなり、信号の復号が行いやすくなることで、より遠い地点でもスループットを維持できたものと考えられる。

なお、アンテナを横並びに配置した場合の計測、縦列に配置した場合の計測はそれぞれ異なる日程で実施している。また、前節の図9に結果を示した実験もさらに別の日程で実施している。このため、土壤水分量や管内の湿度などの条件が実験ごとに多少異なっている。

#### 5.4 考察

図9の測定結果から、チャンネルボンディングを用いた通信のスループット向上効果は、MCSを7に設定した場合、端末間距離が4m以内の近距離に限られることがわかった。2チャンネル並列通信については、MCSが7に設定され、アンテナが管の進行方向に対して横並びに配置される場合では、スループット向上効果は認められなかった。

図9で示した各地点のスループットの値を合計して、20MHz幅チャンネルを用いた通信を使用した場合の転送可能データ量を見積もると、約36.3MBytesである。チャンネルボンディング及び2チャンネル並列通信を用いた場合について転送可能データ量を見積もると、チャンネルボンディングによって40MHz幅チャンネルを用いた通信では約35.8MBと20MHz幅チャンネル1本の使用時とほぼ同程度、2チャンネル並列通信では約25.6MBとなり、単独チャンネル使用時の結果を下回った。

また、図10の測定結果から、2チャンネル並列通信では、管内のアンテナの配置が通信性能に影響を及ぼすことがわかった。管の進行方向に対して縦列にアンテナを設置すると、横並びに配置する場合に比べて、スループットが20Mbit/sよりも低下する地点が2m遠くなっていた。

### 6. 映像伝送を目的とした下水管内無線通信手法の設計指針

チャンネルボンディングを用いた通信にスループット向上効果があるのは、無線通信が近距離で行われる場合に限られ、効果がない地点でもチャンネルボンディングを使用すると、逆にスループットは大きく低下し、転送可能データ量は減少する。この特性を考慮すると、下水管内映像伝送システムにおいて、ノードとAPの間が近いときのみチャンネルボンディングを使用し、距離が離れている時には20MHz幅のチャンネルに切り替えて通信を行うことで、転送可能データ量の増加可能と見込まれる。しかしながら、今回得られた実験結果のように、近距離でのスループット向上効果があまり大きくない場合には、チャンネル幅の切り替え処理の遅延が大きい場合、端末間の距離に関わらず常に20MHz幅のチャンネルを使用して通信した方が転送可能データ量が大きくなることも考えられる。

2チャンネル並列通信の実験による通信性能の評価を考慮すると、下水管内映像伝送システムに適用しても転送データ量の増加には繋がりにくいものと思われる。狭い通信空間や小型の無線通信端末など、下水管内映像システムの

フォームファクタでは、2チャンネル並列通信による通信性能向上は難しいことが予想される。

### 7. まとめ

IEEE 802.11nのチャンネルボンディングによる40MHz幅チャンネルを使った通信と、2つの無線通信インタフェースを使用した2チャンネル並列通信の、直径200mmの下水管内無線通信における性能向上効果を評価した。実験用の模擬下水管内で、それぞれの通信手法による無線通信のスループットを実測した結果、チャンネルボンディングのスループット向上効果が得られるのは、端末間距離が短く十分な受信強度が得られる場合に限られること、2チャンネル並列通信の通信性能は管内のアンテナ配置に大きな影響を受けることが確かめられた。また、通信性能の評価結果に基づき、2つの通信手法を使用し、転送可能データ量を最大化するための下水管内無線通信の設計指針を示した。今後は、設計指針を固める上で不足している実測実験や、実験結果に基づいた下水管内無線通信の詳細な設計指針の立案、下水管内映像伝送システムによる移動無線映像伝送実験などを行う予定である。

### 謝辞

実験用模擬水管の設置にあたり、静岡大学農学部浅井辰夫助教に多大なご協力をいただいた。ここに記して謝意を示す。また本研究の一部は、豊田理研スカラーの助成の下行われた。

### 参考文献

- [1] 国土交通省: 計画的な改築・維持管理. [http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd\\_sewage\\_tk\\_000135.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewage_tk_000135.html) (2016/11/15 確認) .
- [2] 全国ヒューム管協会: よくあるご質問-ヒューム管の耐用年数は. <http://hume-pipe.org/qa/index.html> (2017/2/13 確認) .
- [3] 長澤靖之: 上下水道が一番わかる, 技術評論社 (2012).
- [4] 株式会社東利: 工事事例-目視調査. <http://www.tohri-net.co.jp> (2017/02/12 確認) .
- [5] 東芝テリー株式会社: ハードケーブルカラーカメラシステム. <http://www.tohri-net.co.jp> (2017/02/12 確認) .
- [6] 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> (2017/02/12 確認) .
- [7] 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).
- [8] 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/sewage/mizukokudo\\_sewage\\_tk\\_000450.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/mizukokudo_sewage_tk_000450.html) (2017/03/10 確認) .
- [9] 石原進: 間欠通信を行う流れるセンサ群からの情報収集に関する一考察, 情報処理学会研究報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信, Vol. 2010-MBL-56, No. 22, pp. 1-7 (2010).
- [10] Nagashima, T.: Measurement of Wireless LAN charac-

- teristics 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).
- [11] IEEE Standard Association: 802.11a-1999 - IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf> (2017/3/15 確認) .
- [12] IEEE Standard Association: 802.11n-2009 - IEEE Standard for Information technology. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11n-2009.html> (2017/3/15 確認) .
- [13] 高田潤一:電波伝搬の基礎理論,Microwave Workshops and Exhibition, 2005.
- [14] 山口芳雄, 阿部武雄, and 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).
- [15] Stoianov, I., Nachman, L., Madden, S. and Tokmouline, T.: PIPENETa Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring, *Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, IPSN '07, New York, NY, USA, ACM, pp. 264–273 (2007).
- [16] Kim, J. H., Sharma, G., Boudriga, N. and Iyengar, S. S.: SPAMMS: a Sensor-based pipeline autonomous monitoring and maintenance system, pp. 1–10 (2010).
- [17] 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, pp. 1–9 (2009).
- [18] IEEE Standard Association: 802.11ac-2013 - IEEE Standard for Information technology. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ac-2013.pdf> (2017/3/15 確認) .
- [19] Arslan, Mustafa Y., et al. "Auto-configuration of 802.11 n WLANs." *Proceedings of the 6th International Conference*. ACM, 2010.
- [20] 前田拓磨: 下水管内検査のための浮流式全方位カメラシステムの検討, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2016) シンポジウム, pp. 212–219 (2016).
- [21] Angelakis, Vangelis, et al.: "Adjacent channel interference in 802.11 a is harmful: Testbed validation of a simple quantification model." *IEEE Communications Magazine* 49.3 (2011).
- [22] Dugan, J.: iPerf – The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP. <https://iperf.fr/> (2017/03/10 確認) .