

# 発災初期における UAV アドホックネットワーク実現に向けた 転送可能データ量の実証的研究

今野 瞭<sup>1</sup> 小原 和也<sup>1</sup> 今井 信太郎<sup>1</sup>

**概要：**本研究では、災害発生初期に既存のネットワークを使用せず、避難者や地方自治体などの利用者が必要な情報を収集・提供するための、UAV アドホックネットワークを使った情報収集システムの実現を最終的な目標とする。このシステムでは、災害発生初期に被災地への即時展開と同時に UAV が避難者から受け取った安否確認・救助要請情報等のデータを中継する。このシステムに関連する先行研究として、非人口密度地域に優先的に UAV を展開する提案手法があり、シミュレーションを用いて、メッセージの到達数と遅延時間から提案手法の評価を行っていた。しかし、シミュレーションの条件のひとつである UAV 間の転送可能データ量について、実環境を考慮した検証は十分になされていない。そこで、本研究では、実験により、UAV アドホックネットワークにおける UAV 間距離に対する転送データ量の変化、移動速度に対する転送データ量の変化を実環境で測定し、接近時の転送可能データ量について明らかにする。

**キーワード：**災害時代替ネットワーク、アドホックネットワーク、UAV 間通信、飛行方式

## 1. はじめに

災害発生初期、被災地では、被災者が安否確認・救助要請・被災情報等の情報収集のため、安否確認サービスや災害アプリなどの多くのネットワークを用いたサービスを利用することが想定される。しかし、通信の増加に伴う輻輳の発生や既存の通信基地局における物理的障害の発生により、ネットワークを用いたサービスは利用できない恐れがある。この問題に対して、車などに搭載した移動基地局を用いて代替ネットワークを構築する手法がある。しかし、移動基地局は台数に限りがあり、即時展開が困難な地域が発生するため、災害発生数時間後から既存通信インフラの完全復旧までの中長期的な利用には適していると言えるが、災害発生初期での代替は難しいと考えられる。そのため、災害発生初期に被災者や避難所・行政機関等が必要とする安否確認・救助要請・被災情報等の情報収集を可能とする代替ネットワークの展開とそれを利用する通信手法が求められる。

そこで、本研究では、災害発生初期に、既存のネットワークを使用せず、被災者や行政機関などの利用者が必要な情報を収集・提供するための、Unmanned Aerial Vehicle (UAV) をノードとするアドホックネットワークを用いた

通信の実現を最終的な目標とする。

しかし、UAV をノードとして活用する問題点として、UAV のバッテリー消費が非常に激しく、稼働時間・通信性能に大きな制約が生じるという問題点がある。このことから、地震のような広範囲の災害の場合、UAV の通信性能・台数によっては、全域に展開できない可能性がある。そのため、通信の必要性が高い被災者が存在する地域を優先して展開する必要がある。また、UAV の通信性能では、通信が集中した場合に重要な情報が遅延する可能性や稼働時間内で情報が宛先に届かない可能性があるため、重要な情報を優先的に送信するなどの通信手法を考える必要もある。

このような問題点があることから、本研究では、以下の2点に着目した。

- (1) 台数が十分ではない UAV の被災地への展開手法
- (2) 通信性能が十分でない UAV を中継ノードとするための通信手法

本稿では、このうち (1) について述べる。

UAV の展開手法について、既存研究では、通信を提供する地域の最大化や人口密度を考慮して展開・配置する手法が提案されている [1-3]。その中でも、小原らの研究では、非人口密度地域に優先的に UAV を展開している [4]。そこで、この研究では、非人口密集地域では周りに被災者がいるとは限らず、人を介した物理的な連絡手段が期待できない場合があるため、人口密集地域よりもネットワーク通信

<sup>1</sup> 岩手県立大学 大学院ソフトウェア情報学研究所  
Graduate School of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

による連絡の必要性が高いと考えている。そして、UAV が飛行中に被災者から発信されるブローブ信号を収集・集計して、接近した UAV 間で共有し、各 UAV はその情報に基づき飛行する地域を決定することにより、非人口密度地域を優先して展開する手法を提案していた。この研究では、シミュレータを用いて、人口密度の低い地域の被災者と避難所間のメッセージ到達数とメッセージ遅延時間により、提案手法を評価していた。しかし、この研究では、UAV 間の通信データ量にかかわらず、通信半径に入った瞬時に転送が終了するという条件でシミュレーションが行われており、実環境における UAV 間の通信について考慮されていない。

そこで、本研究では、実環境における実験により、UAV アドホックネットワークにおける UAV 間距離に対する転送データ量の変化、移動速度に対する転送データ量の変化を実環境で測定し、接近時の転送可能データ量について明らかにする。

## 2. 本研究における想定環境

### 2.1 対象とする発災からの期間

本研究では、発災初期の想定期間を発災から 1 時間までと定義する。そのうち、UAV による代替ネットワーク稼働時間を、UAV の稼働時間 [5] を考慮して、発災から 30 分間とし、残りの 30 分間を代替ネットワークから得られた情報に基づく避難活動、救助活動の時間に充てるものとする。

### 2.2 想定する通信の流れ

本研究では、図 1 に示すように、スマートフォン等で一般的に利用されている Wi-Fi を用いて、対象地域に存在する被災者が避難所へ向けて送信する安否メッセージや救助要請メッセージを複数台の UAV によってメッセージリレーで配送することを想定する。また、送信する安否メッセージや救助要請メッセージでは、被災者の現在の状況や今後の行動などをテキスト形式で送ることを想定し、サイズは 1024Byte とする。各 UAV は、通信圏内の被災者から避難所へ向けたメッセージを取得し、飛行中の他の UAV と共有する。最終的に、避難所に到達した UAV が取得したそれらのメッセージを避難所へ届ける。

## 3. 関連研究

### 3.1 UAV を中継ノードとした展開手法

矢内らは、対象地域をランダムに飛行する UAV に対し、反発飛行を加えることで対象地域に UAV を均一に展開する手法を提案している [1]。反発飛行では、対象地域をランダムに飛行する UAV 同士が図 2 のようにお互いの通信圏内に到達した場合にお互いの現在の座標情報を交換し、自身の座標と相手座標を結ぶ 2 点の直線上 (図 2 点線部分) かつ相手と反対方向のランダムな地点を新たな目的地とし

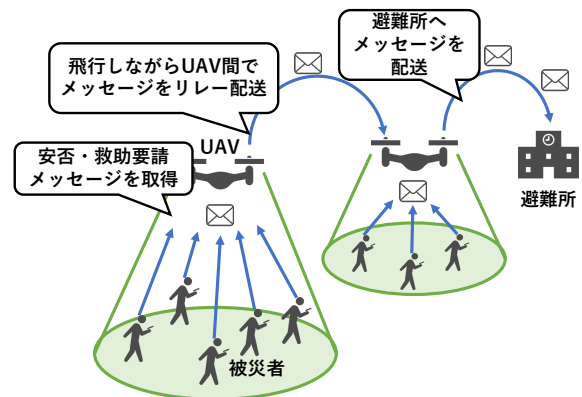


図 1 被災者から避難所までのメッセージの流れ

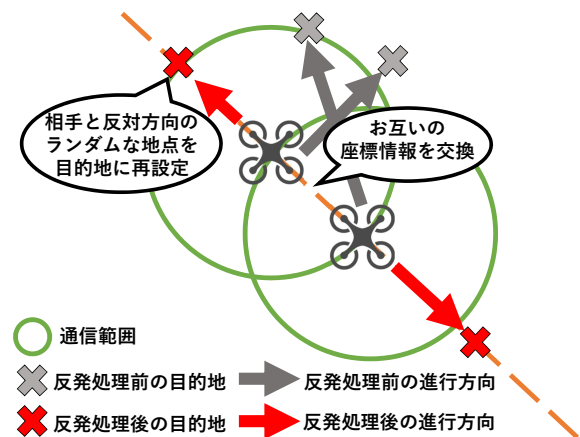


図 2 矢内らの反発飛行

て再設定し、直線飛行を行うことで、対象地域に対して均一な展開を可能としている。

Sanaa らは、UAV とユーザにそれぞれ陽子と電子の性質を持たせ、クーロンの法則に基づく展開手法を提案している [2]。これにより、各 UAV は、クーロンの法則に沿って、電子をもつユーザ集団に惹かれるように向かいつつ、同じ陽子を持つ UAV 間は反発し合うため、お互いがユーザの多い一点に集中せず、ユーザの数の多い地点を中心に分散配置が可能となっている。

また、浅野らは、不均一なユーザ分布を考慮したボロノイ領域をもとにした展開手法を提案している [3]。各 UAV は、ランダムな飛行を行い、他の UAV の通信圏内に入った際に、他の UAV の予測位置から自身のボロノイ領域を計算する。自身のボロノイ領域とユーザの分布情報を基に、自身のボロノイ領域内のユーザ密集地点を目標座標として移動を行い、目標座標到着後は、再度、他の UAV の通信圏内に入るまでランダム飛行を行う。この手法を適用することにより、ユーザの分布が不均一で一定の場所に集中しているほど、ユーザ間のパケットの遅延時間が改善されることが示されている。

### 3.2 人口密度を考慮した展開手法

本研究の先行研究である小原らの研究 [4] について述べ

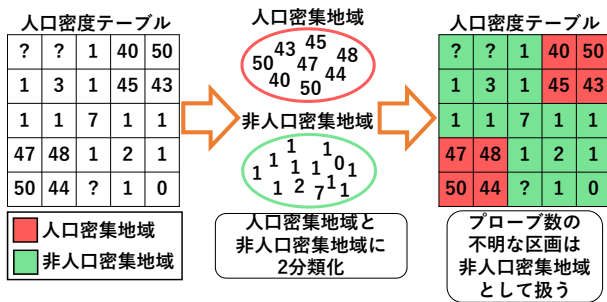


図3 人口密集地域と非人口密集地域の2分類化

る。小原らは、非人口密集地域の被災者を優先した被災者と避難所間を繋ぐ代替ネットワークの提供を目的とし、複数台の UAV による代替ネットワーク展開手法を提案している。この手法では、各 UAV が飛行中に取得した被災者端末から発信されるプローブ信号を基に、対象地域を図3のように2分類化する。そして、その情報（人口密度テーブル）に基づき、非人口密集地域に判定された区域を優先しつつ、対象地域の端と避難所間を往復する往路飛行および復路飛行と、UAV が接近した際の衝突回避飛行である反発飛行の三つの飛行方式を組み合わせて飛行することにより、非人口密集地域の被災者を優先した代替ネットワークの展開を可能としている。

この研究では、シミュレータを用いて人口密度の低い地域の被災者と避難所間のメッセージ到達数とメッセージ遅延時間により、提案手法を評価していた。しかし、シミュレーションは、「ノード間での通信では、お互いの通信圏内に入った瞬間に全ての通信が完了する。また、各ノードの受信バッファは十分にあるものとする」という条件で実施されており、特に UAV 間の、実環境における通信について十分な検討はなされていない。そのため、本研究では、この研究のシミュレーションで想定されていた環境を実環境で再現して2台の UAV 間の通信に着目した実験を行い、UAV 間の距離と転送可能データ量の関係、移動速度と転送可能データ量の関係について検証を行う。

## 4. 実験

### 4.1 実験目的

3.2節で述べたように、本実験は、先行研究のシミュレーションで想定されていた環境を実環境で再現し、2台の UAV 間の距離と転送可能データ量の関係、移動速度と転送可能データ量の関係の検証を目的とする。

表1に先行研究のシミュレーションで想定されていた通信方式を示す。先行研究では、ヘッダのみのパケットを送受信するシミュレーションを実施していた。本実験では、表1の方式で通信する実機の UAV を用い、実験1で2台の UAV 間の距離と転送可能データ量の関係を、実験2で移動速度と転送可能データ量の関係を検証する。

実験で使用した UAV の構成を表2と図4に示す。表2

表1 先行研究における各ノード間の通信方式

	UAV-避難所 (UAV)	UAV-被災者
無線規格	IEEE802.11g	IEEE802.11n
アクセス方式	アドホックモード	インフラストラクチャモード
伝送速度	54Mbps	65Mbps
チャンネル	11	1
帯域幅	20Mhz	
送信出力	10dBm	

表2 UAV の構成

Drone devices	
Hardware	OS・Software・Driver
Raspberry Pi 4 B(4GB)	Raspbian(GNU/Linux11)
Wi-Fi1 : WN-G300UA(IEEE 802.11g)	NI80211
Wi-Fi2 : WI-U2-433DHP(IEEE 802.11n)	8821au
Pixhawk 4 (controller+GPS module)	Px4(v1.12.1)

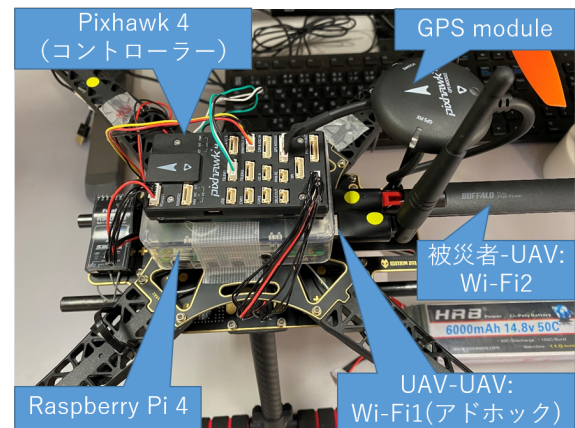


図4 UAV の外観

と図4にあるように、この UAV には Wi-Fi モジュールが2台搭載されている。これは、それぞれ、UAV 間でアドホック通信を行うためのモジュールと、UAV-被災者間で UAV をアクセスポイントとする通信を行うためのモジュールである。それぞれのモジュールは、表1の方式で通信するように設定している。各 UAV には Pixhawk4 [7] の標準 GPS モジュールが搭載されており、実験結果における2台の UAV 間の距離は、この GPS で得られた座標から算出したものである。また、通信制御・通信帯域の計測方法として、iPerf3 [6] を使用した。

### 4.2 実験1

#### 4.2.1 実験内容

2台の UAV 間の距離と転送可能データ量の関係を検証するため、岩手県立大学の敷地内で UAV を飛行させ通信実験を行った。図5に UAV の飛行経路を示す。衝突防止のため、UAV の間隔を 20[m] 空けることとした。それぞれの UAV は、自律飛行で以下のように動作する。

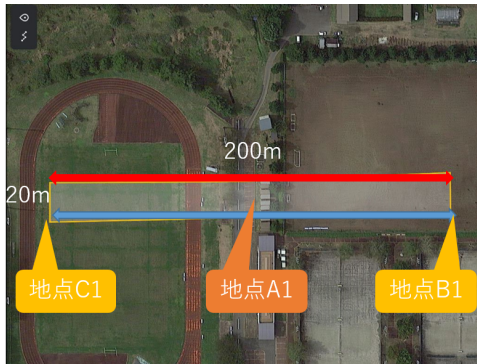


図5 実験1の飛行経路

- (1) UAV2台は地点A1から離陸し、高さ18[m]まで上昇する。
- (2) 一方のUAVは地点B1に向けて、もう一方のUAVは地点C1に向けて5[m/sec]の速度で飛行する。
- (3) 地点B1とC1で実験開始から30秒経過するまで静止する。
- (4) それぞれ反対側の地点C1, B1まで5[m/sec]の速度で飛行する。
- (5) 地点C1とB1で実験開始から2分経過するまで静止する。
- (6) 地点A1まで5[m/sec]の速度で飛行し、着陸する。

#### 4.2.2 実験結果

図6に、UAV間の距離と通信帯域の関係を表す。赤枠で囲まれた部分は、4.2.1節で述べたUAVの動作の(4)の動作中に該当する。この図より、2点間の距離に応じて通信帯域が低下していることが読み取れる。また、UAV間の距離が200[m]となった時でもある程度の帯域で通信できていることから、表2のモジュールを表1に設定すると、Wi-Fiの通信半径が200[m]以上であることが判明した。

### 4.3 実験2

#### 4.3.1 実験内容

この実験は、UAVの移動速度と転送可能データ量の関係を検証する。しかし、岩手県立大学の敷地内では、UAV間の距離を200[m]以上にして飛行させることのできる環境がなかったため、この実験2では、岩手県立大学近辺の道路において、走行する車の上部に設置したUAVと、静止させたUAVの間で通信実験を行った。

図7に実験を行った場所及び、経路を示す。使用した道路は、両側に樹木が植えられた直線に近い片側一車線の道路で、経路の端点間の距離は約720[m]である。

この実験では、実験1のUAVを2台用意し、1台を図8のように車の屋根の上に設置し、もう1台を車に搭載したUAVと同じ高さになるように脚立を使用して地点Aに設置した。実験において、車は、地点B2とC2の間を5.5[m/s] (20km/h)、8.3[m/s] (30km/h)、11.1[m/s] (40km/h)、13.8[m/s]

(50km/h)と速度を変えて走行する。

#### 4.3.2 実験結果

図9に、UAV間の距離と通信帯域の関係を表す。赤枠で囲まれた部分が、それぞれの速度で地点B2とC2の間を走行した際の転送データ量である。この図より、2点間の距離に応じて通信帯域が低下していることが読み取れる。また、移動速度が変化しても、通信帯域の最大値には大きく変化していないが、移動速度が速くなるにつれて2台のUAVが接近する時間が短くなるため、一度の接近で転送可能なデータ量が小さくなることがわかった。また、UAV間の距離が約300[m]以降の帯域が0であることから、表2のモジュールを表1に設定すると、Wi-Fiの最大通信半径が約300[m]であることが判明した。

図9の結果から、表3にどこまでUAV間の接近を許容するのかという接近可能距離と転送可能データ量の関係を示す。接近可能距離は、通信が可能となった距離から各距離までと、各距離から通信が不可能になった地点までの区間のことを表す。例えば、接近可能距離が50[m]で200[m]まで通信が可能である場合、距離200[m]から50[m]まで接近する際の転送データ量と50[m]から200[m]まで離れる際の転送データ量の和が転送可能データ量となる。なお、今回の実験2では一方のUAVだけが移動しているため、双方のUAVが同じ速度で移動している場合は、それぞれのUAVの移動速度は1/2で考える必要がある。この結果から、各移動速度で通信を行った場合の転送可能データ量を検証することができた。また、2台のUAVが各距離で反発した場合に最低限送ることができる転送可能データ量も検証することができた。

### 5. 考察

4節の実験結果から、実環境におけるUAV接近時の、2台のUAV間の距離と転送可能データ量の関係と、実験2で移動速度と転送可能データ量の関係が明らかになった。先行研究では、通信半径(接近可能距離)を500[m]、移動速度を10[m/s]として、シミュレーションを行っていたが、実験結果より、想定されていたWi-Fiでは、最大で約300[m]までしか通信が届かないため、実環境では通信ができないことがわかる。3.2節で述べた送信メッセージのサイズである1024Byteについては、通信が可能であれば距離を考慮しなくても問題ないという結果が得られた。しかし、画像等のサイズの大きいデータを送受信することを考慮する必要がある場合には、接近可能距離を適切に設定する必要があると考えられる。

よって本実験から、先行研究のシミュレーションでは、実環境における評価を十分にできないことが示された。今後は、先行研究の再提案、再評価のため、シミュレーションの改善やシミュレーション条件を検討していく必要がある。

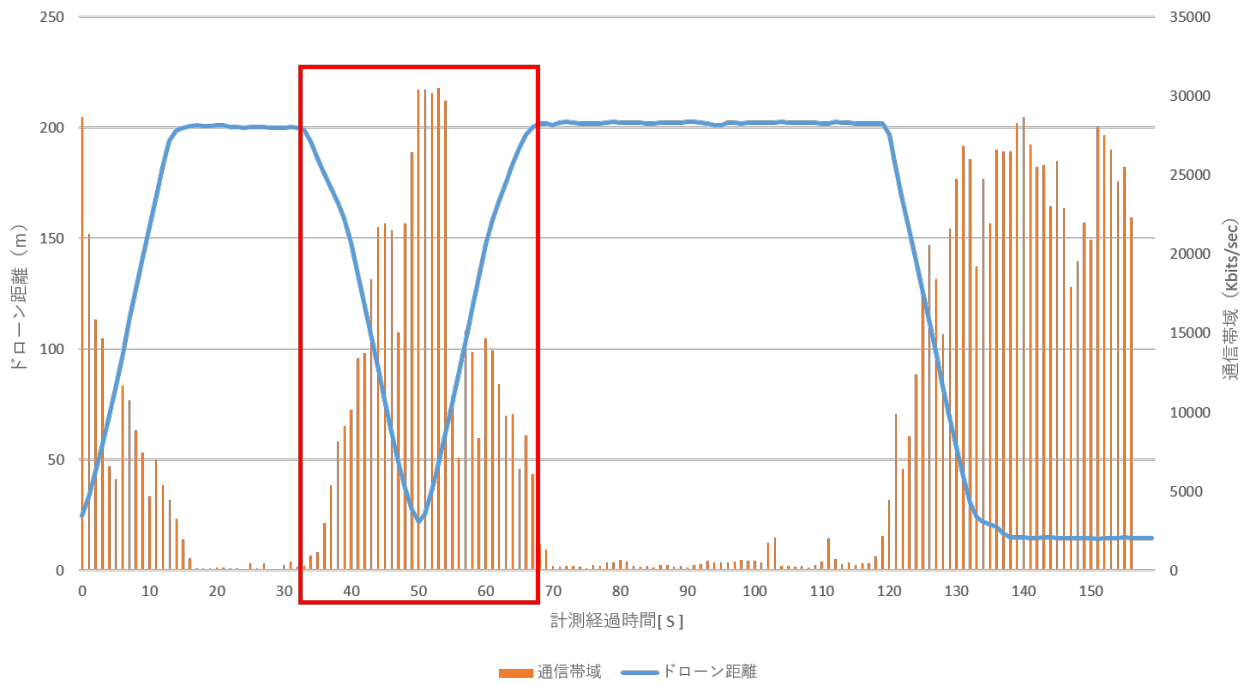


図 6 実験 1 : UAV 間の距離と通信帯域の関係

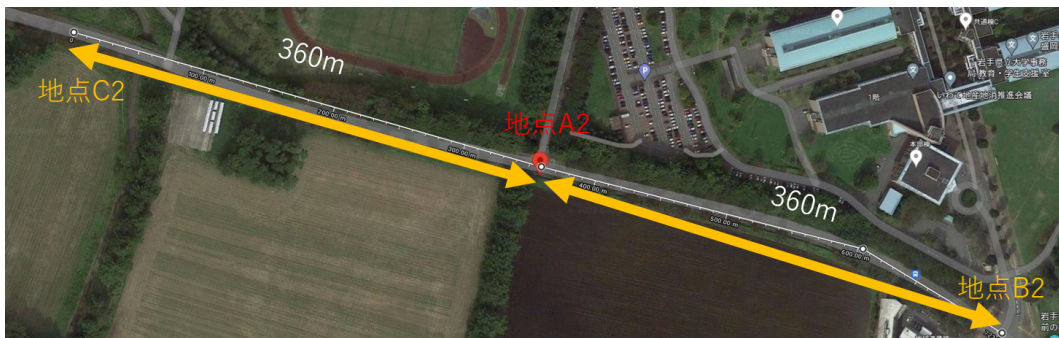


図 7 実験 2 の走行経路



図 8 車の屋根に設置した UAV

速度に対する転送データ量の変化を実環境で測定し、接近時の転送可能データ量について明らかにすることを目的として、先行研究のシミュレーションで想定されていた通信環境を実環境で再現し、UAV 間の転送可能データ量を明らかにするための通信実験を行った。その結果、UAV 間の通信について、実環境での UAV 間の距離と転送可能データ量の関係がわかった。この関係より、先行研究のシミュレーションの条件である通信半径・移動速度では、通信できないことがわかった。今後は、今回の実験結果をもとに先行研究の通信半径・移動速度といったシミュレーション条件を変更し、再度、評価を行う。その結果より、実環境での有効性を高めた形で先行研究の提案手法を改良する予定である。また、今回の実験では、車を用いて実験を行ったが、実際に UAV を飛ばした場合のすれ違い通信実験を行う予定である。

## 6. まとめ

本研究では、実験により、UAV アドホックネットワークにおける UAV 間距離に対する転送データ量の変化、移動

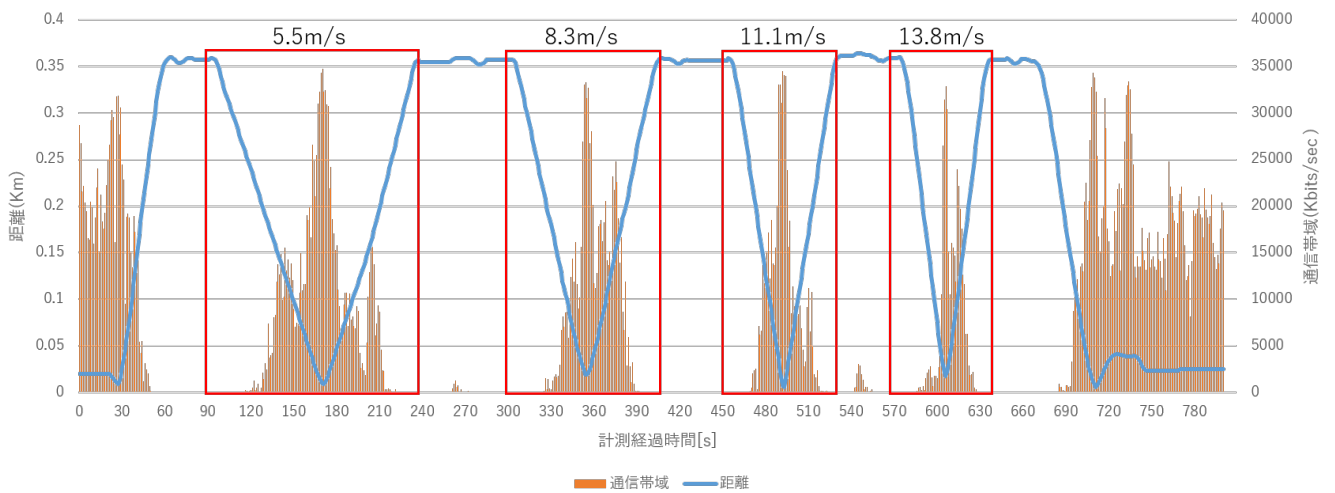


図9 実験2：速度を変化させた場合の UAV 間の距離と通信帯域の関係

表3 接近可能半径と転送可能データ量 (KByte)

接近可能半径	5.5m/s[20km/h]	8.3m/s[30km/h]	11.1m/s[40km/h]	13.8m/s[50km/h]
0m(すれ違い)	$1.34 \times 10^5$	$9.65 \times 10^4$	$7.14 \times 10^4$	$4.55 \times 10^4$
50m	$7.27 \times 10^4$	$6.11 \times 10^4$	$3.75 \times 10^4$	$2.26 \times 10^4$
100m	$4.50 \times 10^4$	$3.62 \times 10^4$	$2.26 \times 10^4$	$1.46 \times 10^4$
150m	$2.13 \times 10^4$	$1.84 \times 10^4$	$9.97 \times 10^3$	$4.92 \times 10^3$
200m	$2.38 \times 10^3$	$2.36 \times 10^3$	$1.86 \times 10^3$	$1.06 \times 10^3$

## 参考文献

- [1] 矢内宏樹, 岡田啓, 小林健太郎, 片山正昭: 大規模災害被災地におけるドローンを用いた無線中継ネットワークの飛行モデル, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J103B, No. 2, pp. 57–66 (2020).
- [2] Sanaa, S. and Rania, I.: On-demand deployment of multiple aerial base stations for traffic offloading and network recovery, Computer Networks, Vol. 156, pp. 52–61 (online), DOI:https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.03.016 (2019).
- [3] 浅野博之, 岡田啓, ベンナイラシャドリヤ, 片山正昭: ドローンを用いた無線リレーネットワークにおける不均一なユーザ分布を考慮した飛行方式, 電子情報通信学会技術報告, Vol. 121, No. 41, SeMI2021-7, pp. 33–38 (2021).
- [4] 小原和也: 人口非密集地域を優先した複数台の UAV による災害時代替ネットワーク展開手法に関する研究, 岩手県立大学大学院・ソフトウェア情報学研究科修士論文, 2021.
- [5] DJI: Matrice 200 シリーズ V2 - 製品情報- DJI, DJI JAPAN 株式会社 (オンライン), 入手先 (https://www.dji.com/jp/matrice-200-series-v2/info#specs) (2007.04.05).
- [6] iPerf3, 入手先 (https://iperf.fr/iperf-download.php)
- [7] Pixhawk4, 入手先 (https://docs.px4.io/main/en/flight\_controller/pixhawk4.html)