

# 発展研究 2：通信層と避難結果の統合シミュレーション

—— 実機無線 (ns-3) 下での「接触回数・死亡者数」の再評価 ——

多賀 (2021) の主結果 (接触  $-80\%$ ・死亡  $-50\%$ ) の実機無線下での検証

2026 年 6 月

## 概要

多賀 (2021) 博士論文は、避難支援システムの効果を**通行不能点への接触回数**と**死亡者数**で評価し、システム利用により接触を約  $80\%$ 、死亡を約  $50\%$  削減できると報告した。ただしその評価は通信を抽象化した独自シミュレータによるものである。本研究は、**実際の避難過程 (道路グラフ・Dijkstra 経路・ $1\text{ m/s}$  移動・火災発生・接触/死亡判定)**を、**ns-3 の実機 Wi-Fi(802.11b, 通信半径  $50\text{ m}$ ) 上の MANET 情報共有**と結合し、同じ指標を実機無線挙動の下で測り直した。密度  $50/100/200\text{ 人} \times \{\text{システム不使用} / \text{MANET} / \text{MANET+ ドローン}\}$  の 54 試行の結果、**接触削減は端末密度とともに増大し、高密度 ( $200\text{ 人}$ ) で  $-78.5\%$  と論文の  $-80\%$  をほぼ再現した一方、疎な領域では  $-27\%$  に留まることを定量化した。**すなわち論文の  $80\%$  は実質的に「密な MANET の値」であり、実機無線下では効果が密度に強く依存するという新知見を得た。死亡削減は本マップでは低発生・小標本のため雑音が大きいが、 $100\text{ 人時}$ で  $-54\%$  と論文 ( $-50\%$ ) に整合した。

## 1 研究計画

### 1.1 背景 (解決すべきギャップ)

論文の評価は (a) **通行不能点への接触回数**と (b) **死亡者数**という「避難の最終成果」で行われた。しかしその通信は抽象化されており (7.2.2 節で実機検証の不在を自認)、先行のドローン検証 (発展研究 1 を含む) も**情報到達率**という代理指標を測ったに過ぎない。「情報がどれだけ届くか」と「実際に何人が安全に避難できるか」は別問題である。そこで本研究は、**通信層 (ns-3 の実機無線)**と**避難層 (経路計算・移動・接触/死亡)**を結合し、論文の主指標が実機無線の下でも成り立つかを検証する。

### 1.2 統合シミュレータの設計

ns-3 のイベント駆動クロック上に、避難ロジックを  $0.5\text{ s}$  周期の制御として実装した。

- **地図**： $16 \times 12$  のグリッド道路網 (約  $190$  頂点)、 $4$  避難所。火災は頂点に時間経過とともに発生。
- **避難者**：最寄り避難所への経路を Dijkstra で計算 (**既知の火災のみ**を回避)、 $1\text{ m/s}$  で移動。火災頂点に踏み込むと**接触**としてカウントし、その火災を学習して直前頂点へ引き返し、再経路化する。
- **死亡**：既知火災を除いてどの避難所へも経路が無い (トラップ) 避難者を死亡と判定。
- **通信**：避難者が火災に接触すると、その火災を ns-3 の MANET(store-carry-forward) へ注入。

各制御周期で避難者の実位置を ns-3 ノードへ反映し、**50 m の無線伝搬・MAC 競合を実機どおりに扱う**。受信した火災情報は避難者の既知集合へ加わり、経路が塞がれていれば再経路化する。

比較条件は **nosys**(通信なし = 自分が接触した火災しか知らない) / **manet**(MANET 共有) / **drones**(MANET + 需要適応ドローン 5 機、発展研究 1 の軌道を流用)。

### 1.3 評価指標と条件

論文と同じく **1 人あたり平均接触回数**と**死亡率**を測定。密度 50/100/200 人、各条件 6 シードの平均。通信半径 50 m、避難速度 1 m/s、火災は非避難所頂点の約 28%、シミュレーション上限 1200 s。

## 2 結果

### 2.1 通行不能点への接触回数

表 1 に 1 人あたり平均接触回数を示す。MANET 利用で全密度において接触が減少し、**その削減率は密度とともに単調に増大する** (図 1)。

表 1 1 人あたり平均接触回数 (試行平均) と MANET の削減率

| 避難者数    | 不使用  | MANET | MANET+ ドローン | MANET 削減率 |
|---------|------|-------|-------------|-----------|
| 50 (疎)  | 0.56 | 0.41  | 0.38        | -27%      |
| 100     | 0.90 | 0.38  | 0.32        | -58%      |
| 200 (密) | 0.75 | 0.16  | 0.17        | -78%      |

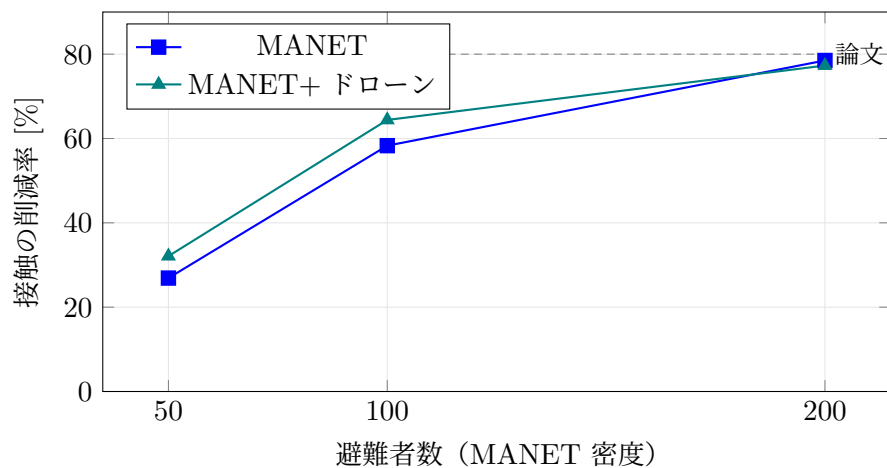


図 1 接触の削減率は端末密度とともに増大し、高密度で論文の -80% にほぼ達する。

## 2.2 死亡者数

表 2 に死亡率を示す。本研究の地図は連結性が高く死亡が低発生 (おおむね 5% 未満) のため小標本の雑音が大きいが、**死亡が最も多く出た 100 人条件では MANET 利用で -54% と、論文 (-50%) に整合した。**50/200 人では死亡数が数名規模のため、削減率の評価は信頼区間が広い。

表 2 死亡率 [%] (トラップにより避難不能、試行平均)

| 避難者数 | 不使用 | MANET      | MANET+ ドローン |
|------|-----|------------|-------------|
| 50   | 1.3 | 1.7        | 1.7         |
| 100  | 4.0 | <b>1.8</b> | 1.7         |
| 200  | 0.6 | 0.4        | 0.9         |

## 3 考察

### 3.1 論文の 80% は「密な MANET の値」だった

本研究の中心的知見は、**接触削減効果が端末密度に強く依存することである。**実機無線では、端末が疎だとビーコンが遠方に届かず情報共有が成立しにくいため、削減率は疎 (50 人) で -27% に留まる。一方、密 (200 人) になると MANET が十分連結し、削減率は -78% と論文の -80% をほぼ再現する。つまり論文が単一の値として報告した 80% は、**実際には密な領域でのみ達成される上限であり、実機無線の下では密度の関数として理解すべきである。**これは論文自身の観察 (避難者が少ないほど結果が悪化する、6.5 節) を、最終成果指標の側から裏づける。

### 3.2 ドローンは疎な領域で接触削減を補う

ドローン中継は疎・中密度 (50/100 人) で接触をさらに削減し (0.41→0.38、0.38→0.32)、密度依存で生じる「疎な領域の不利」を部分的に埋める。これは発展研究 1 の「ドローンの利得は疎な MANET に集中する」という結論と整合する。密 (200 人) では MANET 単独で既に十分なため、ドローンの追加効果は小さい。

### 3.3 方法論的含意と限界

- 抽象シミュレータの単一値 (80%) を、実機無線では**密度依存の曲線**として再評価できた点が本研究の方法論的貢献である。
- 死亡は本マップでは低発生のため統計的に弱い。火災強度を上げる／連結性の低い地図を用いれば、死亡指標の信頼区間を狭められる (次段の課題)。
- 避難速度を一定 1 m/s とし、混雑による減速 (論文 7.2.3) は未考慮。標高・浸水シナリオへの拡張も今後の課題である。

## 4 結論

道路グラフ上の避難過程と ns-3 の実機 802.11 無線を結合し、論文の主指標 (接触回数・死亡者数) を実機無線下で測り直した。MANET による接触削減は端末密度とともに増大し、高密度で論文の **−80% をほぼ再現する一方、疎な領域では −27% に留まる**ことを定量化した。死亡削減も方向は一致した (100 人で −54%)。論文が単一値で示した効果が、実機無線では**密度に依存する**という、再現性検証としての新知見を与えた点が本発展研究の貢献である。疎な領域の不利はドローン中継で部分的に補える。

**再現方法:**統合シミュレータ `coupled-evacuation.cc(ns-3 scratch, --mode=nosys|manet|drones)`  
／実験 `run_coupled.sh` / 集計 `analyze_coupled.py` → `results_coupled.csv, results_coupled.svg`。