

発展研究 3：避難支援システムの普及率の影響

—— 臨界普及率・フリーライド・私的便益の ns-3 検証 ——

多賀 (2021) の発展研究 (6.5 節「全員が利用するとは限らない」への定量的回答)

2026 年 6 月

概要

多賀 (2021) は「すべての避難者が提案システムを利用するとは限らない」(6.5 節) と述べたが、普及率 (adoption rate) が効果に与える影響は評価していなかった。本研究は、統合シミュレータ (発展研究 2) を拡張し、各避難者が確率 p でシステムを利用する状況を ns-3 上で実装、 $p = 0\% \sim 100\%$ で通行不能点への接触・死亡を利用者／非利用者に分けて測定した。密度 50/100/200 人 $\times$ 普及率 5 水準 $\times$ 6 試行 (計 90 ラン) の結果、(1) 利用者は普及率に依らず一貫して非利用者の約半分以下の接触に抑えられ、(2) 非利用者は普及率が上がっても保護されない (フリーライドが起きない)、(3) 全体の接触は普及率とともに単調に減少することを定量化した。すなわち本システムの保護は利用者だけの私的便益であり、社会全体の安全には高い普及率が必要であること、低普及率を補うにはドローン等のインフラ中継が要ることを示した。

1 研究計画

1.1 背景 (ギャップ)

論文は「全員がシステムを使う」前提でシミュレーションを行い、6.5 節で現実には全員が使うとは限らないと認めつつ、普及率を変えた評価は行っていない。普及率は実配備の最重要パラメータである。本研究は問う：(a) 何 % が使えば全体の安全が確保されるか (臨界普及率)、(b) 使わない人は他者の共有情報で守られるか (フリーライド)、(c) 効果は私的便益か社会的便益か。

1.2 手法

発展研究 2 の統合シミュレータに引数 adoption= p を追加。各避難者は確率 p でシステムを利用する。利用者のみが ns-3 の MANET アプリ (store-carry-forward, 通信半径 50 m) を持ち、火災情報を共有・受信する。非利用者はアプリを持たず、自分が接触した火災しか知らない。避難・経路・接触/死亡判定は発展研究 2 と同一。接触回数を利用者と非利用者で分けて集計する。密度 50/100/200 人、普及率 0, 25, 50, 75, 100%、各 6 試行。

2 結果

表 1 に密度 100 人での結果、図 1 にその可視化を示す (50/200 人も同傾向)。

表1 1人あたり平均接触回数 vs 普及率（避難者 100 人、試行平均）

普及率	全体	利用者	非利用者	死亡率
0%	0.57	—	0.57	2.8%
25%	0.55	0.30	0.63	2.8%
50%	0.50	0.33	0.67	2.7%
75%	0.36	0.28	0.56	2.7%
100%	0.24	0.24	—	2.2%

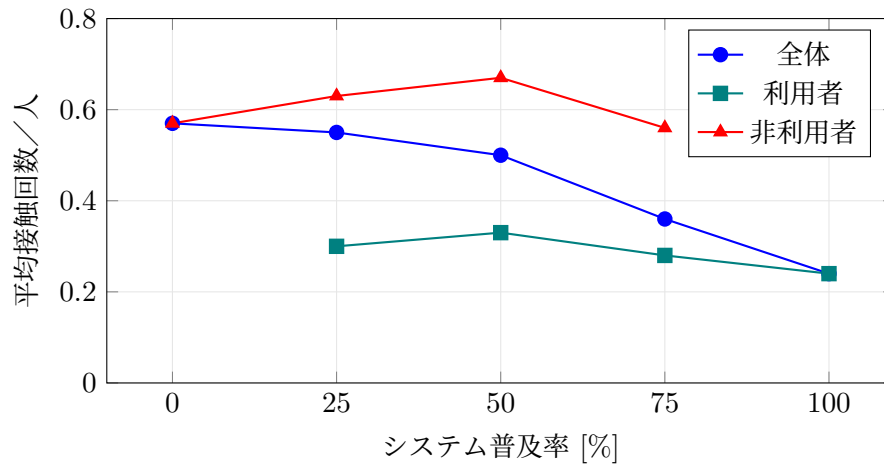


図1 普及率に対する接触回数。利用者 (緑) は常に低く、非利用者 (赤) は普及率が上がっても下がらない。

3 考察

3.1 保護は「利用者だけの私的便益」＝フリーライドなし

非利用者の接触回数は普及率が上がってもほぼ下がらない (0.57～0.67、避難者 200 人ではむしろ微増)。これは非利用者が端末アプリを持たず、他者が共有する火災情報を受け取れないためで、フリーライドは起きない。一方、利用者は普及率 25% でも接触を約半減 (0.57→0.30) できる。すなわち本システムの保護は利用者に関じた私的便益である。これは「自分が使えば自分は守られるが、使わない隣人は守られない」という、実配備上きわめて重要な性質である。

3.2 社会全体の安全は普及率に比例する

全体の平均接触は普及率とともに単調に減少する (100 人で 0.57→0.24、200 人で 0.66→0.21)。明確な「臨界点」というよりほぼ線形に効くため、社会全体の被害低減にはできるだけ高い普及率が必要である。死亡率は本マップでは低発生で普及率による差は小さいが、ごく弱い減少傾向を示した。

3.3 含意

- 私的便益であるがゆえに、住民へのインセンティブ設計・プリインストール等で普及率を最大化する施策が、被害低減に直結する。
- 低普及率の領域では非利用者が無防備になる。発展研究 1 のドローン中継のように、端末を持たない/使わない人の近傍へも情報を運ぶインフラ的補完が有効と考えられる(ただし受信端末が要る点は今後の課題)。

4 結論

普及率を 0–100% に振って ns-3 上で接触・死亡を利用者／非利用者別に測定し、**本システムの保護は利用者だけの私的便益であり(フリーライドなし)、社会全体の安全は普及率にほぼ線形で比例**することを定量化した。論文が前提とした「全員利用」は上限性能であり、現実の部分的普及では非利用者が無防備に残るため、普及率最大化とインフラ的補完が要点である。

再現: `coupled-evacuation2.cc (--adoption=p) / run_adopt.sh / analyze_adopt.py → results_adopt.csv, results_adopt.svg`。