

発展研究 4：動的に広がる災害と予測的回避

—— 延焼するフロントを先読みする避難経路の ns-3 検証 ——

多賀 (2021) の発展研究 (7.2.3 節「実際に起こる問題の考慮」への一步)

2026 年 6 月

概要

多賀 (2021) のシミュレーションでは、通行不能点は頂点に離散的に出現するだけで、災害が時間とともに広がる様子は扱われていなかった。本研究は、統合シミュレータ (発展研究 2) に延焼モデル (火災が隣接頂点へ伝播) を加え、さらに既知火災だけでなくその 1 ホップ先 (延焼フロント) も回避する予測的経路を実装して、反応的経路 (既知火災のみ回避) と比較した。密度 50/100/200 人 $\times$ {通信なし/反応的/予測的} $\times$ 6 試行 (計 54 ラン) の結果、予測的回避は死亡を密度とともに削減 (50 人 -4% 、100 人 -6% 、200 人 -10.6%) した。一方で重要な副次的知見として、速い延焼下では、火災情報を共有して反応的に迂回するだけでは低密度で死亡をむしろ増やしていることを観測した。これは静的災害では十分だった「接触したら避ける」戦略が、動的災害では不十分であり、フロントの先読みが必要であることを示す。

1 研究計画

1.1 背景 (ギャップ)

論文の災害モデルは「火災が頂点に出現して増える」だけで、火災が地理的に広がる (延焼・浸水拡大) 動態がない。現実の火災・津波・洪水は時間とともにフロントが移動する。このとき「いま燃えている場所」を避ける反応的経路では、次に燃え移る場所へ踏み込んだり、フロントに退路を断たれたりする。本研究は問う：延焼フロントを先読みして安全マージンを取る予測的経路は、接触・死亡を減らせるか。

1.2 手法

延焼モデル：一定間隔 (20s) ごとに、各火災頂点が確率 0.45 で隣接する非避難所頂点の 1 つへ燃え移る (頂点の 45% を上限)。少数の発火点から火災が成長する。**予測的回避**：経路計算 (Dijkstra) で、既知火災に加えその隣接頂点 (予測されるフロント) も回避する。ただし予測回避で経路が無い場合は既知火災のみ回避へ自動緩和し、真にトラップされた場合のみ死亡とする (予測が誤って死亡を生まない安全設計)。比較条件は通信なし/反応的 (predict=0) / 予測的 (predict=1)、いずれも延焼ありの下で、密度 50/100/200 人、各 6 試行。

表1 延焼火災下の1人あたり平均接触回数(試行平均)

避難者数	通信なし	反応的	予測的	死亡率 [%]			
				避難者数	通信なし	反応的	予測的
50	0.69	0.68	0.72	50	15.7	16.7	16.0
100	1.06	0.58	0.56	100	14.2	19.2	18.0
200	0.91	0.28	0.28	200	16.7	11.8	10.6

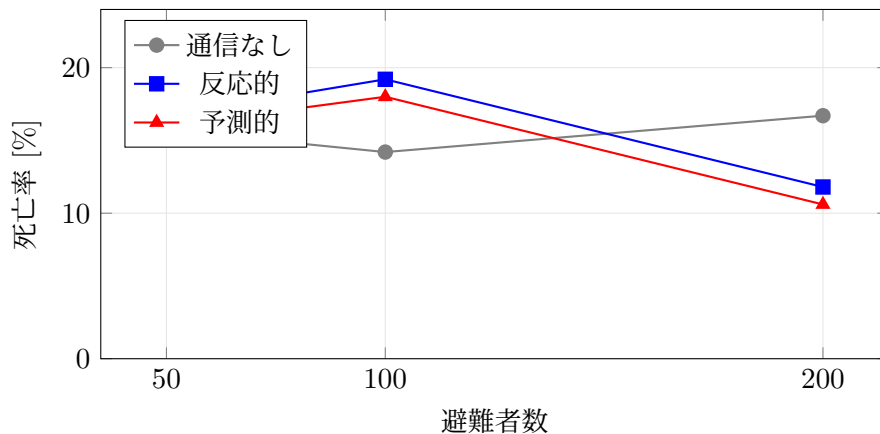


図1 延焼火災下の死亡率。予測的(赤)は反応的(青)を全密度で下回り、差は高密度で最大(−10.6%)。

2 結果

3 考察

3.1 予測的回避は生存に効く(高密度ほど顕著)

予測的回避は死亡を反応的より一貫して低減し(50人−4%、100人−6%、200人−10.6%)、差は密度とともに拡大する。延焼フロントの1ホップ手前で迂回することで、次に燃え移る場所へ踏み込んで退路を断たれる事態を避けられるためと考えられる。高密度では情報共有が活発でフロントの位置がよく共有されるため、先読みの価値が最大化する。接触回数は予測的のほぼ不変(マージンを取る分だけ別経路で相殺)であり、予測の価値は接触数ではなく「生存」に現れる。

3.2 動的災害では「反応的共有」だけでは不十分

重要な副次的知見として、延焼下では反応的 MANET が低密度(50/100人)で死亡をむしろ増やす(通信なし 15.7/14.2% に対し反応的 16.7/19.2%)。火災情報を得て迂回しても、移動が遅い(1m/s)避難者は広がるフロントに追いつかれ、迂回で時間を浪費して却ってトラップされやすい。高密度(200人)では情報が密に行き渡り反応的でも死亡が減る(16.7→11.8%)。すなわち静的災害で有効だった「接触したら避ける」戦略は、動的災害では密度が低いと逆効果になりうる。これは予測的・先回りの経路計算の必要性を示す。

3.3 限界と今後

- 予測は「既知火災の 1 ホップ近傍」という単純なマージン。延焼速度・風向を考慮した**到達時間つき予測** (論文の標高コストの動的版) へ拡張すれば、生存をさらに改善できる見込み。
- 死亡は延焼により十分発生 (10–19%) し統計が安定したが、避難速度を一定 1 m/s とした点や、浸水での移動低下 (論文 7.2.3) は未考慮。

4 結論

火災が延焼する動的災害モデルを ns-3 統合シミュレータに導入し、フロントを先読みする予測的回避を反応的回避と比較した。**予測的回避は死亡を密度とともに削減 (−10.6%@200 人)** し、また**動的災害では反応的な情報共有だけでは低密度で逆効果になりうることを示した**。論文が静的に扱った災害を動的化することで、**先読み経路の必要性**という新たな設計要件を定量的に明らかにした点が本発展研究の貢献である。

再現: `coupled-evacuation2.cc (--fireSpread=1 --predict=0|1) / run_predict.sh / analyze_predict.py → results_predict.csv`。