

# タイトル 劣通信環境における群衆誘導に関する基盤技術の研究開発

代表研究者 巳波 弘佳 関西学院大学・理工学部・教授  
共同研究者 藤原 明広 福井工業大学・工学部・准教授

## 1 はじめに

本研究は、昼間の都市部のような人口密集地域での大規模災害時における、群衆の適切な避難誘導に関する基盤技術の確立を目的としたものである。東日本大震災や阪神淡路大震災をはじめ、近年の相次ぐ災害を通して、災害時の迅速な状況把握・情報共有・適切な避難誘導の必要性が認識されている。大規模災害時には通信インフラが損傷を受けて通信は断絶し、災害直後こそ避難経路情報や安否情報などの情報収集・共有といった情報流通が最も必要であるにも関わらず、人々は孤立した状態となる。特に、昼間の都市部のような人口密集地域においては、避難場所に関する情報を持たない人々が大量に滞留しており、災害時にはこのような群衆が、地図情報すら持たず、さらに情報収集するための通信手段のない状態に置かれることになる。そのため、避難の大幅な遅れやパニック発生による二次災害の危険性が著しく高い。したがって、時々刻々と変化する被災状況や群衆の過密状況を反映した地図情報と、それに基づいた避難誘導が必要不可欠である。

以上の課題を解決するために、本研究では、大規模災害時のような劣通信環境における現実的かつ有効な通信方式である蓄積搬送型通信に基づいて被災者間での地図情報共有を図ると同時に、被災者個々人に適切な避難経路を指示する避難誘導法を設計した。具体的には、大域情報を把握できる条件下での群衆誘導アルゴリズムの設計、局所情報のみに基づく自律分散的群衆誘導アルゴリズムの設計、被災状況・混雑推定アルゴリズムの設計を行った。また、ヒューマンモビリティモデルとして、現実の特性と整合性のあるホームシミュレーションモデルを構築した。このモデルも利用した様々なシミュレーションによる性能評価を通して、提案アルゴリズムの有効性を示した。これにより、蓄積搬送型通信を利用した群衆の適切な避難誘導法が得られたと言える。

## 2 劣通信環境における蓄積搬送型通信とヒューマンモビリティモデル

### 2-1 蓄積搬送型通信

災害時において平常時の通信手段を用いることができないため、蓄積搬送型通信を用いることが有効である。蓄積搬送型通信とは、長距離の通信が困難であって至近距離のノード間でのみ通信が行われる状況において、移動ノードが相互に近づいた時に蓄積した情報を交換・共有することを繰り返すことによって情報を伝搬するという通信方式である（図1）。

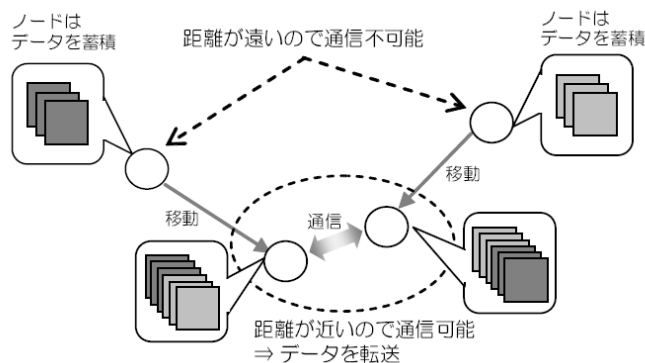


図1 蓄積搬送型通信

これまで、中継転送方式として Epidemic Routing, Spray and Wait, Two-Hop Forwarding, MaxProp, PROPHET などが提案されており、シミュレーションによる検証や理論的な観点での性能評価が行われてきた。

Epidemic Routing 方式は、出会ったノード同士で保持しているメッセージのコピーを、互いに相手のノードに送ることによってメッセージを伝搬させ、宛先ノードに到達させる方式である。Epidemic Routing は、出会ったノードすべてに対してメッセージのコピーを作成していくため、メッセージの配送時間は短くてすむが、バッファ容量をはじめリソース消費が大きい。Epidemic Routing の考え方に基づくバリエーションとして、Spray and Wait や MaxProp などがある。Spray and Wait は、メッセージの送信ノードが時間の経過とともに出会うノードにメッセージのコピーを作成していく (Spray)。Spray は、決められた数のコピーが作成されると終了する。次にメッセージのコピーを保持したノードが移動して宛先ノードに出会うまで待つ (Wait)。このようにして、メッセージを保持したノードが宛先ノードに出会うことで、メッセージを到達させる方式である。Epidemic Routing に比べて、Spray 時のみのコピーであるため、バッファ容量などのリソース消費は抑えられる。これは、ノードの行動パターンに規則性がない場合には効率が良いが、規則性がある場合には効率が悪い場合がある。MaxProp は、優先度の高いメッセージから、出会ったノードにコピーを作成していく。優先度はメッセージの宛先ごとに与えられ、宛先までの近さを表現するものである。バッファ容量に制限がある場合には、優先度に応じてコピーを作成することで効率性を高めている。ノード間の擬似的な遭遇確率を計算することにより、遭遇確率の高いノードへのメッセージ送信を行うことで宛先ノードに到達可能性を高めることを目指した PROPHET という方式もある

Utility-based routing 方式は、各ノードに宛先ノードまでの到達可能性を表す値 (Utility) を持たせ、到達可能性の高いノードにコピーを作成することで、宛先ノードへメッセージを到達させる方式である。

これらは、出会ったノードの Utility の値に応じてコピーを渡すか否か判断するものであり、メッセージ到達確率は Epidemic Routing に比べて低い傾向にあるが、リソース消費を抑えることができる。Utility 値の決定が性能を大きく左右する。

## 2-2 ヒューマンモビリティモデル

現実的なノードの移動はランダムウォークではなく、周期的に同じ経路を通るといった特性や、特定の場所に集まりやすいといった特性が存在することが多い。移動に関するこのような特性を適切に利用することによって、蓄積搬送型中継転送を大幅に効率化できることが期待できる。そのため、人の現実的な移動パターンの特性 (ヒューマンモビリティ) を解明した。

まず、すれ違った Bluetooth&Wi-Fi 端末のデータ (検出された時間, デバイス名, MAC アドレス) を収集する Android アプリを開発し、被験者の端末上で動作させてデータを収集した。それに基づいて、すれ違い頻度分布について調べた。すれ違い頻度分布とは、ある人がその他の Bluetooth または Wi-Fi デバイスとこれまですれ違った回数をヒストグラムにしたものである。典型的なすれ違い頻度分布を補累積分布関数 (CCDF) で表現したものを図 2 に示す。

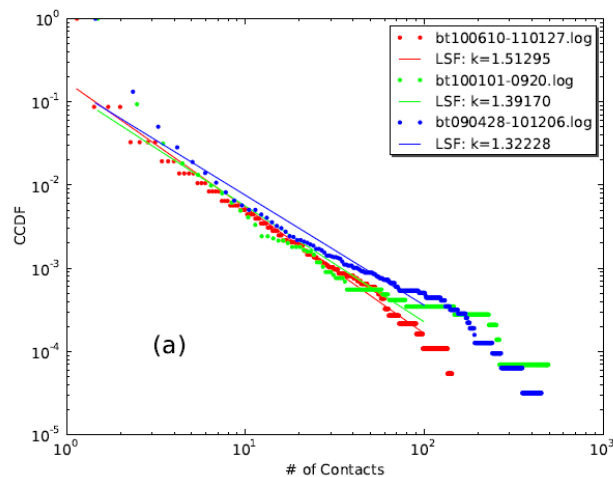


図 2 すれ違い頻度分布

両対数プロットにおいて直線に従うことから、べき乗則にしたがう、つまり、すれ違い頻度分布はスケールフリー性を持つことがわかった。

すれ違い頻度分布のスケールフリー性は自明ではない。これまで人も含めた生物のヒューマンモビリティは、ランダムウォークではなくレヴィウォーク (ある地点から次に直線的に移動する地点までの距離の分布がベ

き乗則に従う)であると考えられていたが、レヴィウォークのすれ違い頻度分布はスケールフリーではない。また、ランダムウォークやランダムウェイポイント(ノードの移動先の位置を一様分布にしたがって選び、その位置までの移動速度を決めて移動を繰り返すもの)も同様である。これは、ヒューマンモビリティはレヴィウォークだけでは説明できないことを示唆している。

そこで、ホームシック・レヴィウォークモデルを検討した。これは、基本的にレヴィウォークに基づいて移動するが、各地点において確率的に「拠点」に帰還するというものである。

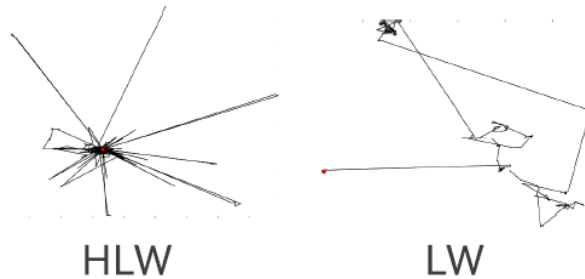


図3 ホームシック・レヴィウォーク(HLW)とレヴィウォーク(LW)の例

ホームシック・レヴィウォークモデルは人も含めた多くの生物は、帰還する「家」や「住処」を持っていることを反映している。ホームシック・レヴィウォークモデルのすれ違い頻度分布はスケールフリーであることを、平均場近似を用いて理論的に示し、また数値実験においても確認した。このことから、一定確率による活動拠点への再帰(ホームシック性)と、時々遠距離飛行(移動距離のスケールフリー性)の両方の要因が、すれ違い頻度分布のスケールフリーの条件であることがわかった。

さらに、すれ違った全デバイス数に対して、一度しかすれ違っていないデバイス数の割合を調べた。図4に例を示す。

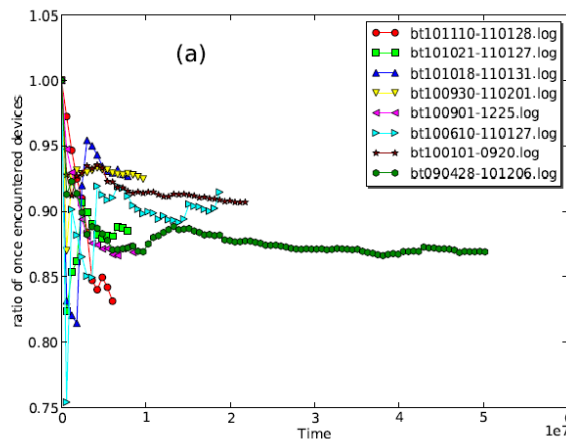


図4 一度しかすれ違っていないデバイスの割合の時間変化.

図4から、一度しかすれ違っていないデバイスの割合は人によらず、9割程度であることがわかる。これは、2回以上すれ違う人は1割程度であるが、すれ違い頻度分布のスケールフリー性より、そのような人のうち特に頻繁にすれ違う人の割合は小さくはないことを意味している。これが示唆することは、蓄積搬送型通信において、保持する情報を送受信する相手を適切に絞り込むことにより、到達可能性を高めることができるということである。

以上から、ノードの移動特性を考慮することで、宛先ノードへの到達可能性が高く、かつ到達時間も短いことが期待できるノードを選択してコピーを送ることにより、リソース使用量を抑制しつつ、高い到達確率を実現する蓄積搬送型通信方式を用いることにより、効率を高められることがわかる。

### 3 群衆誘導アルゴリズムの設計

#### 3-1 アドホックネットワークによる情報共有に基づく群衆誘導アルゴリズム

ここでは、地図情報と各地点における被災者人数が大域的に把握できるという条件下でのアルゴリズム設計を行った。災害時のような劣通信環境における通信技術として、蓄積搬送型通信以外に、アドホックネットワークを用いるものもある。例えば NerveNet では、災害直後に Wi-Fi 基地局によるアドホックネットワークを起動することによって通信環境を確保するものであり、実用化されつつある。ここでは、災害時における情報伝達手段としてアドホックネットワークを用いることを前提とし、ネットワークが構築され情報が収集されるまでに一定の時間がかかることを想定した群衆誘導法を提案する。

地図情報はネットワークとして表現でき、その上での人間の動きはある種のセルオートマトンでモデル化できる。この条件の下で被災者全員が避難場所に到達できるまでの時間を最小化するという最適化問題として定式化し、効率的なアルゴリズムを設計した。

まず、最速避難問題 (FEP) を定義する。ネットワーク  $N=(G=(V,E),b,c,h,s,r,z)$ ,  $G=(V,E)$  は道路ネットワークを表す連結無向グラフ,  $b$  は点容量関数,  $c$  は辺容量関数,  $z$  は避難所,  $h$  は初期状態における道路ネットワーク上の人数分布,  $s$  は追加で現れる人数分布の変化,  $r$  は道路ネットワークから建物内への退去の人数分布の変化, また,  $k$  は避難可能時間を表すとす。  $x(v,t)$  は点  $v$  に時刻  $t$  にいる人数,  $y(v,w,t)$  は辺  $(v,w)$  を時刻  $t-1$  から時刻  $t$  までに通過する人数とする。人間には多数派同調バイアスという心理特性があるため、同一点上にいる人は次の時刻まで同じ避難経路で避難するという制約を考える。多数派同調バイアスとは自分以外に大勢の人がいるととりあえず周りに合わせようとする心理状態のことである。この制約のもとで得られる避難経路は避難経路木  $P(t)$  で表すことができる。  $P(t)$  は時刻  $t-1$  から時刻  $t$  までの避難経路を表し,  $z$  を根とする根付き有向全域木である。

最速避難問題(FEP)

INSTANCE: ネットワーク  $N=(G=(V,E),b,c,h,s,r,z)$  正整数  $k$ .

QUESTION: 以下の制約 1~5 を満たし時刻  $k$  までにすべての人が避難するような避難経路  $P(t)$  ( $t=1,2,\dots,k$ ) は存在するか?

$$\text{Constraint 1: } 0 \leq x(v, t) \leq b(v) \quad (\forall v \in V, t = 0, 1, \dots, k) \quad (1)$$

$$\text{Constraint 2: } 0 \leq y(v, w, t) \leq c(v, w) \quad (\forall (v, w) \in E, t = 0, 1, \dots, k) \quad (2)$$

$$\text{Constraint 3: } x(v, t) - x(v, t-1) = \sum_{w \in N_t^-(v)} y(w, v, t) - y(v, q_t, t) + s(v, t) - r(v, t)$$

$$(\forall v \in V - z, t = 1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

$$x(z, t) = \sum_{w \in N_t^-(z)} y(w, z, t) + s(z, t) - r(z, t) \quad (t = 1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

$$\text{Constraint 4: } x(v, 0) = h(v) \quad (\forall v \in V) \quad (5)$$

$$\text{Constraint 5: } x(v, k) = 0 \quad (\forall v \in V) \quad (6)$$

$N_t^-(v)$  は  $P(t)$  における点  $v$  を親とする点の集合,  $q_t$  は,  $P(t)$  における点  $v$  の子の点を表す。

以下の定理が成り立つ。

定理: 最速避難問題は一般に NP 完全である.

この定理より, 最速避難問題一般には NP 完全であるため, 多項式時間で解くことは期待できない. そこで, 以下のヒューリスティックアルゴリズム StableEvac を設計した.

**Procedure Stable\_SCC**

入力: グラフ  $G$ , 点容量  $b: V \rightarrow \mathbb{Z}_+$ , 辺容量  $c: E \rightarrow \mathbb{Z}_+$ ,

時刻  $t$ , 時刻  $t-1$  に点  $v \in V$  にいる人数  $x_v(t-1)$ , 点  $z \in V$ ,

追加サブライ  $s_i(t)$  ( $\forall i \in V, t = 1, 2, \dots$ ).

出力:  $P(t)$  ( $t = 1, 2, \dots$ ),  $x_v(t)$  ( $t = 1, 2, \dots$ )

```

1:  $U \leftarrow \{z\}$ ,  $T \leftarrow \phi$ ,  $l(z) \leftarrow 0$ ,  $w(z) \leftarrow b(z)$ 
2:  $z$  以外の各点  $v$  に対して  $l(v) \leftarrow \infty$ ,  $w(v) \leftarrow b(v) - x_v(t-1)$ 
3:  $i \leftarrow 0$ 
4: while  $i < |V(G)|$ 
5:   各点  $v$  に対して  $l'(v) \leftarrow \infty$ 
6:    $minlabel \leftarrow \infty$ 
7:   while  $u \in U$  と  $v \in V - U$  をみたす辺  $(u, v) \in E$ 
8:      $f(u, v) \leftarrow \min\{w(u), c(u, v), x_v(t-1)\}$ 
9:     if  $f(u, v) > 0$  then
10:        $l'(v) \leftarrow l(u) + \lceil x_v(t-1)/f(u, v) \rceil$ 
11:     else
12:       if  $x_v(t-1) = 0$  then
13:          $l'(v) \leftarrow l(u) + 1$ 
14:       else
15:          $l'(v) \leftarrow l(u) + x_v(t-1) + 1$ 
16:       end if
17:     end if
18:     if  $minlabel > l'(v)$  then
19:       if  $(v, u) \in P(t-1)$  then
20:         if  $l'(v) \leq l(u)/2$  then
21:            $u' \leftarrow u$ ,  $v' \leftarrow v$ 
22:            $minlabel = l'(v)$ ,  $f'(u', v') \leftarrow f(u, v)$ 
23:         end if
24:       else
25:          $u' \leftarrow u$ ,  $v' \leftarrow v$ 
26:          $minlabel = l'(v)$ ,  $f'(u', v') \leftarrow f(u, v)$ 
27:       end if
28:     end if
29:   end while
30:    $T \leftarrow T \cup \{(u', v')\}$ ,  $U \leftarrow U \cup \{v'\}$ 
    $w(u') \leftarrow w(u') - f'(u', v')$ ,  $w(v') \leftarrow w(v') + f'(u', v')$ 
31:    $i \leftarrow i + 1$ 
32: end while
33:  $P(t) \leftarrow T$ 
34: 各点  $v$  に対して  $x'_v(t) \leftarrow b(v) - w(v)$ 
35:  $j \leftarrow 0$ 
36: while  $j < |V(G)|$ 
37:   if  $x'_v(t) + s_v(t) \leq b(v)$ 
38:      $x'_v(t) \leftarrow x'_v(t) + s_v(t)$ 
39:   else
40:      $s_v(t+1) \leftarrow s_v(t) + x'_v(t) - b(v)$ ,  $x'_v(t) \leftarrow b(v)$ 
41:   end if
42: end while
43: 各点  $v$  に対して  $x_v(t) \leftarrow x'_v(t)$ 

```

### 避難経路木決定アルゴリズム *Stable\_Evac*

入力: グラフ  $G$ , 点容量  $b: V \rightarrow \mathbb{Z}_+$ , 辺容量  $c: E \rightarrow \mathbb{Z}_+$ ,  
時刻 0 に点  $v \in V$  にいる人数  $x_v(0)$ , 点  $z \in V$ , 追加サブ  
ライ  $s_i(t)$  ( $\forall i \in V, t = 1, 2, \dots$ ), *Procedure* を切り替える閾値  
*check*.

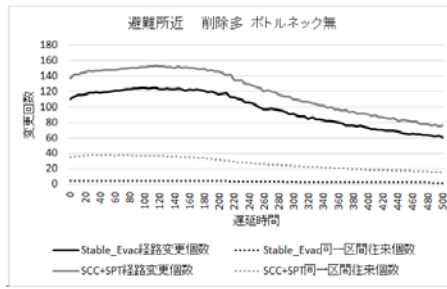
出力:  $P(t)$  ( $t = 1, 2, \dots$ ),  $x_v(t)$  ( $t = 1, 2, \dots$ )

```
1:  $t \leftarrow 0$ ,  $count \leftarrow 0$ ,  $flag \leftarrow 0$ 
2: while 避難した人の総和  $\neq$  被災者の総和
3:    $t \leftarrow t + 1$ 
4:   if  $flag = 0$ 
5:      $Stable\_SCC(G, b, c, t, x_v(t-1), z, s_i)$ 
6:   else
7:      $SPT(G, b, c, t, x_v(t-1), z, s_i)$ 
8:   end if
9:   if  $Stable\_SCC$  を適用しても避難者が増加しない
10:     $count \leftarrow count + 1$ 
11:   else
12:     $count \leftarrow 0$ 
13:   end if
14:   if  $count \geq check$ 
15:     $flag \leftarrow 1$ 
16:   end if
17: end while
```

基本的な考え方としては、混雑を考慮に入れたうえで目的地までにかかる時間の推定値を用いて最小コスト木を求めるといものである。ただし、避難経路が時刻ごとに大きく変わらないよう、経路の変化を抑制するようにしている。

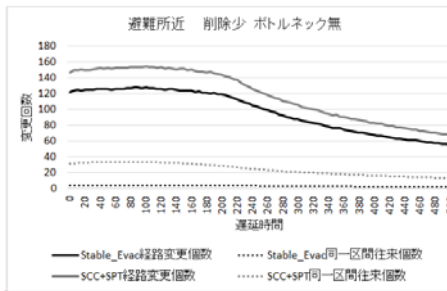
上記のアルゴリズムの性能をシミュレーションによって評価した。災害発生前のグラフとして格子グラフ、災害発生後のグラフとして部分格子グラフを用いる。アルゴリズム *Stable\_Evac* を用いて情報伝達の遅延と各点にいる人数情報の揺らぎ（誤差）の大きさ、破壊される辺の避難所からの距離・本数、ボトルネック辺の有無・避難所からの距離が避難誘導にどのような影響を与えるか調べた。性能の評価尺度としては、最悪避難完了時間、平均避難完了時間を用いる。また、同一区間の往来が少ないほうが被災者の心理的な負担を抑えることができると考えられるため、本アルゴリズム *Stable\_Evac* と経路変化抑制を考慮していないアルゴリズム *SCC+SPT* について、単位時間当たりの避難経路の平均変更回数、同一区間往来の平均回数についても比較評価する。

以下の実験では、初期状態の  $30 \times 30$  の格子グラフにおいて、点容量は 300、辺容量は 180、ボトルネック辺の容量を 45、初期配置で各点にいる人数の総和を 17000、ビルなどの屋内に配置されている人数の総和を 47000 とする。ビルなどの屋内へ流出する人数の総和を 0、*Procedure* を切り替える時間を 5 とする。情報共有にかかる遅延時間を *Delay* とし、*Delay* の値を 0, 5, 10, ..., 500 と変化させる。なお、遅延時間 *Delay* 経過までは情報共有ができておらず、現実の状況がわからないため、災害発生前の道路網を用いて避難経路を計算し、提示する。*Delay* 経過後は情報共有ができたので、災害発生後の現実の道路網を用いて避難経路を計算し、提示する。また、情報の不正確性の影響を調べるために各点の実際の数に揺らぎを与え、揺らぎの範囲 0%, 5%, 50%, 100% の 4 通りのそれぞれの範囲内で揺らぎを与えた。情報共有にかかる遅延時間、ボトルネック辺、各点にいる人数情報の揺らぎの幅が避難完了時間、平均避難完了時間にどのような影響を与えるか調べた。



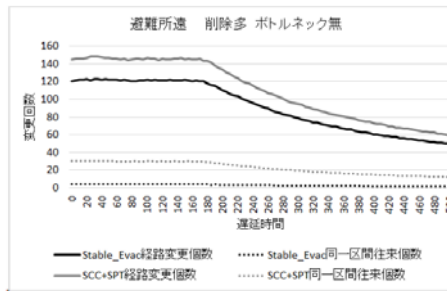
避難所から 3 ステップ以内で 15 箇所通行不能、揺らぎがなくボトルネック辺がない場合の単位時間当たり平均変更回数比較。

図 5



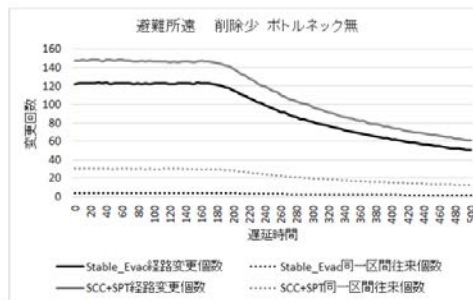
避難所から 3 ステップ以内で 5 箇所通行不能、揺らぎがなくボトルネック辺がない場合の単位時間当たり平均変更回数比較。

図 6



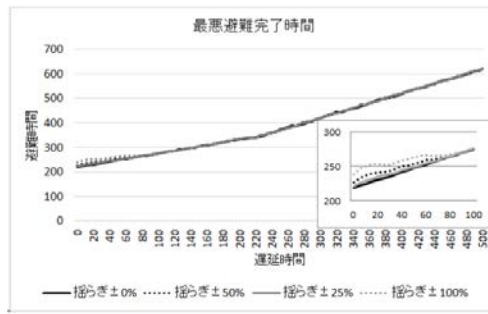
避難所から 10 ステップ以上で 15 箇所通行不能、揺らぎがなくボトルネック辺がない場合の単位時間当たり平均変更回数比較。

図 7



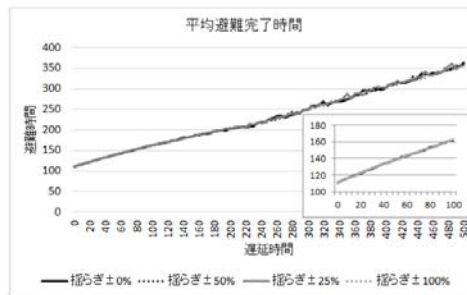
避難所から 10 ステップ以上で 5 箇所通行不能、揺らぎがなくボトルネック辺がない場合の単位時間当たり平均変更回数比較。

図 8



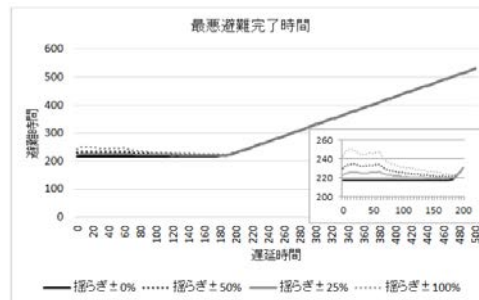
避難所から3ステップ以内で15箇所通行不能、ボトルネック辺がない場合の最悪避難完了時間。

図9



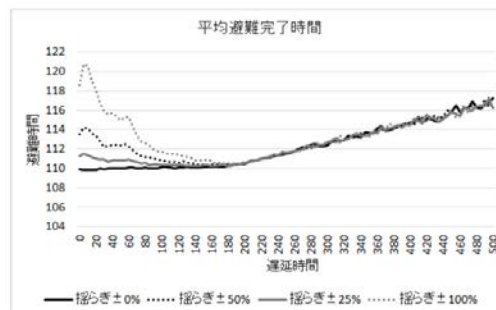
避難所から3ステップ以内で15箇所通行不能、ボトルネック辺がない場合の平均避難完了時間。

図10



避難所から10ステップ以上で5箇所通行不能、ボトルネック辺がない場合の最悪避難完了時間。

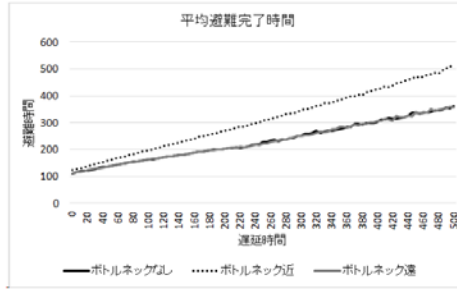
図11



避難所から10ステップ以上で5箇所通行不能、ボトルネック辺がない場合の平均避難完了時間。

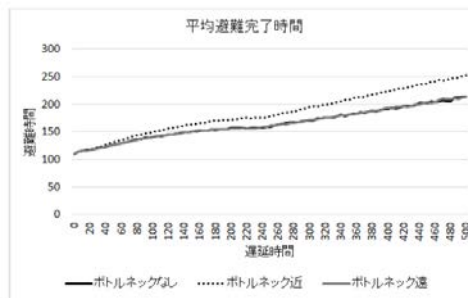
図12





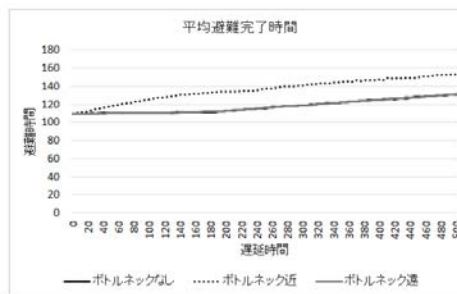
避難所から3ステップ以内で15箇所通行不能、揺らぎがない場合の平均避難完了時間。

図 13



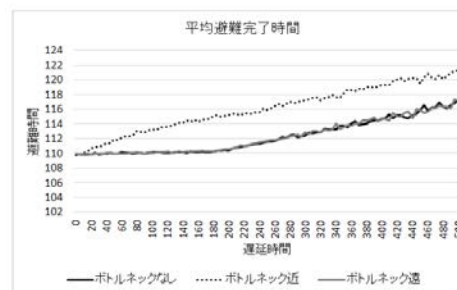
避難所から3ステップ以内で5箇所通行不能、揺らぎがない場合の平均避難完了時間。

図 14



避難所から10ステップ以上で15箇所通行不能、揺らぎがない場合の平均避難完了時間。

図 15



避難所から10ステップ以上で5箇所通行不能、揺らぎがない場合の平均避難完了時間。

図 16

図5～図8から、いずれの場合においても、アルゴリズム Stable\_Evac を用いることで、単位時間あたりの

平均経路変更回数、平均同一区間往来回数を抑えられることがわかった。特に、平均同一区間往来回数に関してはほぼ0に抑えることができた。また、アルゴリズム SCC+SPT とアルゴリズム Stable\_Evac を用いた場合の最悪避難完了時間、平均避難完了時間を比較した場合、どちらのアルゴリズムを用いてもほぼ同じ避難完了時間を実現することができた。

図9、図10は同一条件における揺らぎに関してまとめたものである。図9より、遅延時間が小さい場合、与える揺らぎが大きいほど最悪避難完了時間に対して与える影響が大きいことがわかった。一方で、遅延時間が大きいほど揺らぎが大きい場合であっても、最悪避難完了時間にあまり影響を与えないことがわかった。平均避難完了時間に関しては、図10より、通行不能箇所が避難所から近い場合は、与える揺らぎが大きい場合であっても、平均避難完了時間に与える影響が小さいことがわかった。一方で、図11、図12より、通行不能箇所が避難所から遠く、遅延時間が小さい場合、与える揺らぎが大きいほど最悪避難完了時間、平均避難完了時間に与える影響が大きいことがわかった。図11、図12においては、一定の遅延時間まで遅延時間の増加に伴って、避難完了時間が減少する結果が得られた。これは、揺らぎを与える時に実際の道路ネットワークにいる人数によるものが原因だと考えられる。遅延時間経過後に実際の道路にいる人数に揺らぎを与えた値を推定値として与えている。遅延時間の値が小さいと多くの人々は避難所に到達しておらず、ネットワーク上にたくさんの人が残っているため、揺らぎの影響を受けやすい。そのために不適切な誘導（迂回させる必要がないのにあえて迂回したり、混雑している経路が避難経路として選択されること）が行われ、避難完了時間が大きくなるものと考えられる。一方で、遅延時間が大きい場合は、平均避難完了時間にあまり影響を与えないことがわかった。これは遅延時間が大きいと多くの被災者の避難が完了し、ネットワーク上に人があまりいないため、揺らぎの影響を受けにくいためだと考えられる。これらの結果より、遅延が小さい時は誤差が大きい情報を用いて避難誘導を行うと、避難時間が伸びてしまう可能性があることがわかった。図13、図14、図15、図16はそれぞれボトルネック辺以外の条件が同じ場合の平均避難完了時間についてまとめたものである。いずれの場合においても、ボトルネック辺が避難所から遠い場合においては、平均避難完了時間に与える影響はほとんどなく、ボトルネック辺が避難所の近くにある場合は、平均避難完了時間に影響を与えることがわかった。

以上の結果から、災害時における情報伝達手段としてアドホックネットワークを用いることを前提とし、地図情報と各地点における被災者人数が大域的に把握できるという条件下での提案群衆誘導アルゴリズムの有効性を示すことができたといえる。

### 3-2 蓄積搬送型通信による情報共有に基づく群衆誘導アルゴリズム

本節では、蓄積搬送型通信による情報共有に基づく群衆誘導アルゴリズムについて述べる。モバイル通信を用いず、スマートフォンの機能の一部（オフラインで動作する地図、GPS センサによる位置測位、Bluetooth による近距離無線通信）を利用し、自律的な被災地情報共有と避難誘導経路の提示を行う一つの実用的な方法になっていると考えられる。避難経路を自律的に提示する手順を以下にまとめる。

#### 1. (アプリケーション起動と初期化)

災害発生直後、スマートフォンから避難誘導アプリケーションを起動する。GPS センサで現在位置を把握し、オフライン地図を用いて最寄りの避難場所までの最短経路を避難経路として提示する。

#### 2. (通行不能箇所の情報収集)

避難者が提示された避難誘導経路に従って移動している時、災害の影響による通行不能箇所に遭遇した場合、その場所を記録する。記録した通行不能箇所を避けた最短経路を再計算することにより代替避難経路を提示する。

#### 3. (渋滞箇所の情報収集)

避難中に避難者による渋滞箇所に遭遇した場合、その場所をスマートフォンに記録する。記録した渋滞箇所を避けて最短経路を再計算し、代替避難経路が存在すれば迂回経路を提示する。

#### 4. (蓄積搬送型通信による情報共有)

避難中に他のアプリを起動しているスマートフォンを所持する人とすれちがった時、蓄積搬送型通信を自動で行い、被災地情報（通行不能箇所、渋滞箇所）を情報共有する。また、情報共有した端末の MAC アドレスも記録する。もし情報共有により、現在の避難経路上に通行に関する問題があることが分かった場合、そこを避けた代替避難経路を再計算し、提示する。

#### 5. (避難完了と収集した情報の統合)

無事に避難場所に辿り着いた場合、GPS で辿り着いた避難場所を記録する。避難場所で収集した被災地情報

を統合し、安否情報や人命救助のための情報として再利用する。

## 6. (情報の被災地外への転送)

避難場所で統合された情報を遅延耐性ネットワークにより被災地外へ転送する。

ここでは、蓄積搬送型通信による情報共有の通信方式として Epidemic Routing によるブロードキャストを想定している。情報共有は通行不能箇所や混雑箇所に関する情報のみに限れば情報量としては少なく、通信負荷が少なく済むため、輻輳回避できることと少しでも多くの人に可能な限り多くの情報を伝えることが両立させたいためである。互いに持っている通行不能箇所の情報を事前に確認できるので、通行不能箇所での無駄な折り返し移動を避けることができるため、全体としての避難時間の短縮は確実である。一般に、移動体同士の情報共有にかかる時間は裾野の広い分布に従うことが知られている。しかし、避難時の人間の行動パターンは避難場所への移動による集中である。従って、避難場所を基点にすることで、情報収集・統合が確実にできる。

本アルゴリズムの概略図を図 17 に示す。

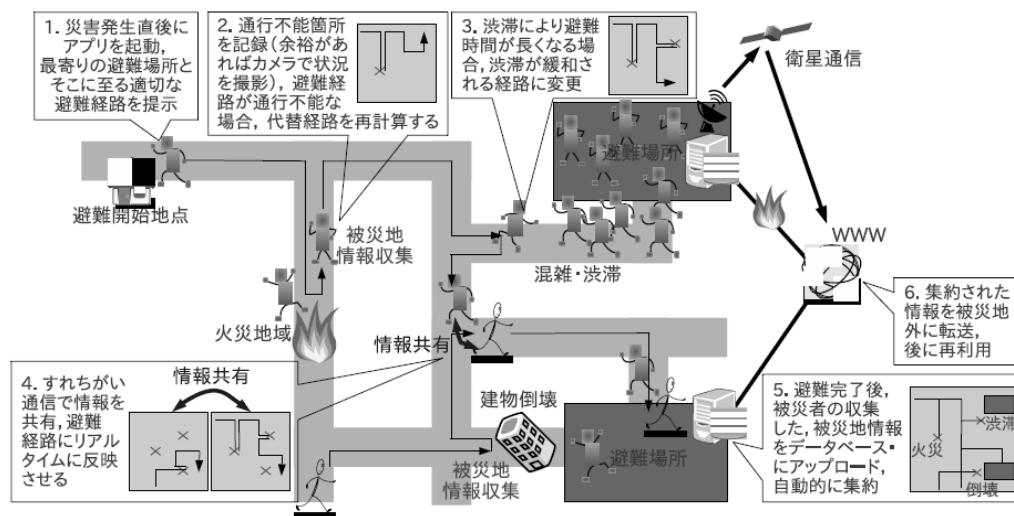
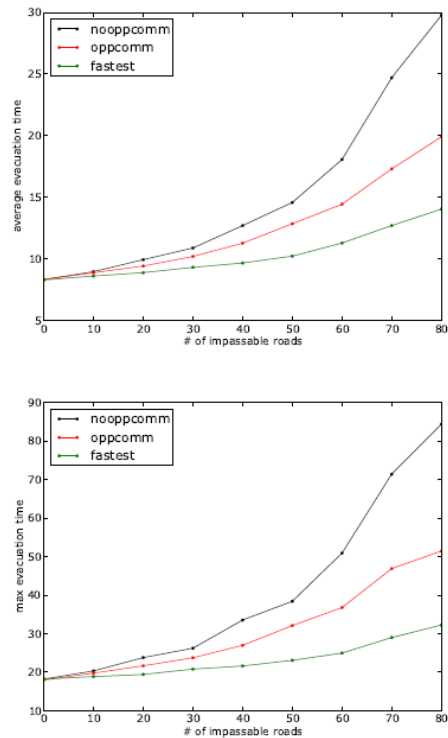


図 17 蓄積搬送型通信を利用したリアルタイム災害時避難誘導の概略図

次に、上記のアルゴリズムの性能をシミュレーションによって評価した。避難者が最寄りの避難場所に到着するまでの避難時間を避難誘導の性能評価指標とする。そして、避難者の平均避難時間と最大避難時間に着目し、それらの値が通行不能箇所の増加とともにどのように変化していくかについて数値シミュレーションを用いて調べた。

まず最初に、蓄積搬送型通信の効果を見るために、(a) 蓄積搬送型通信がない場合、(b) 蓄積搬送型通信がある場合、(c) 何らかの方法で最初から通行不能箇所がすべて分かっている場合（避難時間の下限値に対応）の3つの状況を数値的に比較した結果を図 18 に示す。



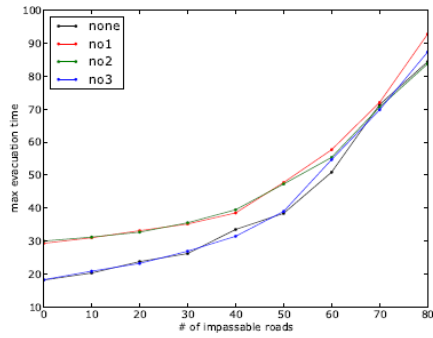
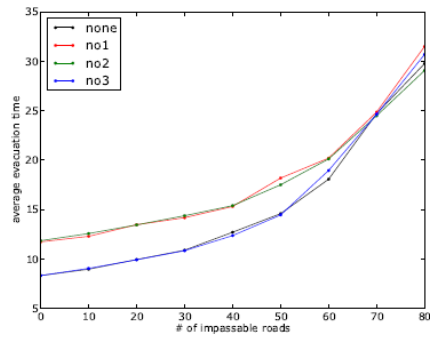
(a) 通行不能辺数  $b$  と平均避難時間の関係. (b) 通行不能辺数  $b$  と最大避難時間の関係. 系列は, すれちがい通信なし (nooppcomm), すれちがい通信あり (oppcomm), 最初から通行不能箇所を全て知っている場合 (fastest) とした.

図 18

図 18 より, 蓄積搬送型通信により, 通行不能辺数 (箇所数) によらず, 平均避難時間も最大避難時間も確実に減少していることが分かる.

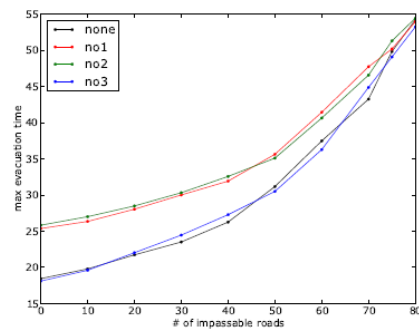
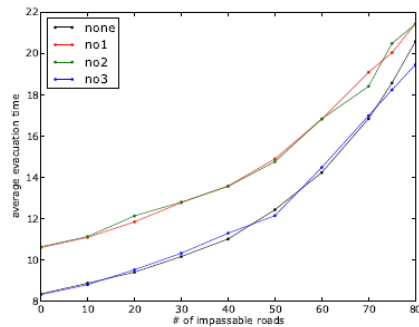
次に, 避難者同士による渋滞箇所の情報共有が, 我々の提案した避難誘導における避難時間の短縮に有効であるかどうかについて, 数値シミュレーションにより性能評価を行った. ここでは, 渋滞情報に基づいた渋滞迂回経路選択のために次の三つの戦略を扱った.

- (1) 渋滞情報を共有せず, 渋滞にぶつかった時点で迂回経路が存在すれば, その経路に変更する,
  - (2) 渋滞情報を共有するが, 迂回経路選択は渋滞にぶつかった時に再計算する,
  - (3) 渋滞情報を共有し, 迂回経路選択は情報共有することで新しい情報を得るたびに再計算する.
- これらの比較結果を図 19 と図 20 に示す.



: 通行不能箇所に関してすれちがい通信を行わなかった場合. (上図) 通行不能辺数  $b$  と平均避難時間の関係. (下図) 通行不能辺数  $b$  と最大避難時間の関係. 系列は, 混雑遭遇による迂回経路を取らない戦略 (0) を none, 戦略 (1) を no1, 戦略 (2) を no2, 戦略 (3) を no3 とした.

図 19



通行不能箇所に関してすれちがい通信を行った場合. (上図) 通行不能辺数  $b$  と平均避難時間の関係. (下図) 通行不能辺数  $b$  と最大避難時間の関係. 系列は, 混雑遭遇による迂回経路を取らない戦略 (0) を none, 戦略 (1) を no1, 戦略 (2) を no2, 戦略 (3) を no3 とした.

図 20

図 19 と図 20 より図より、一般に三つの戦略のうち(1)と(2)は同程度の性能が得られ、(3)の方が避難時間が短くなるのが分かる。これより、渋滞情報を考慮した迂回経路選択決定は、渋滞にぶつかるより前に予測して行う方が効果的であることが分かった。一方、(3)は渋滞情報を共有しない場合と比べて平均的に有効な差がないことも分かる。これは、渋滞情報共有を考慮しなくても十分に良い性能が得られることを表している。適切に渋滞情報を利用しなければ、むしろ避難誘導の性能が劣化してしまうという可能性があることを示唆している。これは、渋滞情報に敏感に振り回されると、無駄に同じ場所を往復することにより避難時間をロスしてしまうことが原因となっている。そのため、3.1 節のように経路変更を抑制することにより、性能を向上する可能性がある。

次に、より現実的な状況を考慮したシミュレーションを行い、本群衆誘導アルゴリズムを評価した。現実的には、提案アルゴリズムに基づく避難誘導アプリを備えた携帯端末を持つ避難者ばかりとは限らない。また、緊急を要する事態に避難誘導アプリを起動するという行動を避難者が取るかどうかという問題もある。しかし、アプリによる誘導を受けない人達も避難誘導アプリに支援を受けて避難している人達の行動が視界に入れば、それに影響を受けて避難行動を行うことは十分に考えられる。避難誘導法の研究で考案された手法に「吸着誘導法」がある。これは、避難場所とそこまでの避難経路についてよく知っている誘導者（リーダー）が、それらをよく知らない被誘導者（フォロワー）を引き連れて避難する方法である。具体的には、誘導者が避難開始時に自分のごく近辺にいる少数(1,2名)の避難者に対して、「自分についてきて下さい」と働きかけ、自分の働きかけた少数の避難者を引き連れて一緒に誘導する。誘導者が近辺にいる避難者を自分に吸着して避難誘導することから、この名称が与えられている。この誘導法が機能する理由の根本は、避難行動の同調作用にある。初期に誘導者と少数の被誘導者から成る小集団が形成され、避難行動が開始される。これを見た周囲の避難者はこれに同調する行動を行うことで小集団の人数が増えていく。最終的には、避難者全員がこの小集団を核にした大集団として避難行動を行うことで、避難誘導を行うことができるという仕組みである。

吸着誘導法は、蓄積搬送型通信を利用した災害時避難誘導法と相性が良い。その理由は主に二つある。一つ目は、避難誘導アプリを起動した避難者が避難場所と避難経路の情報を得ることができれば、誘導者としての役割を担うことができるという点である。また、二つ目は避難誘導アプリは、蓄積搬送型通信による被災地情報共有を行うことで、避難場所への避難経路が自然に一つの方向へ揃っていく為、避難誘導を受けている被災者同士が集団を形成するようになるからである。この集団に避難誘導アプリの支援を受けていない人達が同調作用によって避難行動を開始したり、間接的な支援を与えることができるようになると考えられる。このような避難誘導の自己組織化を行うことができれば、その影響はより大きなものとなり得ることが期待される。そのため、本研究では、この避難誘導の自己組織化への第一段階として、避難者が避難行動を同調するメカニズムを数理モデル化し、少数の誘導者（リーダー）による避難誘導の影響がどのように波及効果を及ぼすかについて数値実験を行うことで、その性能を評価した。

具体的には、まず、周囲の人達の多数が移動する方向に影響されて移動する方向を決める、多数決移動モデル (majority voting mobility model) を定義し、この性質を調べた。多数決移動モデルについて述べる。まず避難誘導アプリケーションによる誘導を受けられるリーダーは避難場所へ向かって移動する。避難誘導アプリケーションによる誘導を受けられないフォロワーは、リーダーに出会うまで、まずランダムに移動方向を決めるが、次に周囲の避難者を見て、多数が移動する方向に移動を変更して、そちらへ移動するようにする。つまり、ある範囲にいる全避難者の移動の多数決を取り、多い移動方向へ向かうというものである。

次に、この系に少数の誘導者（リーダー）を導入し、避難誘導の同調作用の影響について調べた。図 21 に、誘導者(リーダー)の割合  $1$  を変化させた時の避難時間と累積避難者数の関係を示す。線種は下から  $1=0$ ,  $1=0.10$ ,  $1=0.20$ , ... というように  $0.10$  刻みに誘導者の割合を増やしたものである。

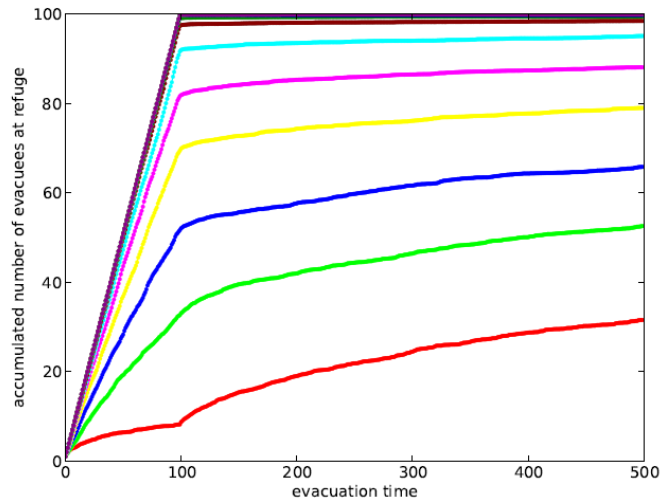


図 21

初期には誘導者による吸着誘導の効果が強く効いていることが分かる。これは実験や連続空間モデルによるシミュレーションで得られているような、避難時間と累積避難者数がほぼ線形になるというのが得られていることから結果を解釈する上で妥当だと考えられる。それ以降は、吸着誘導に取り残された避難者が少しずつたどり着くと解釈できる。したがって、初期の吸着誘導によって累積避難者数がどれだけ増えるかが性能として一番効いてくる。図 21 より、誘導者の割合が 2 割で約 60%, 3 割で約 70-80%, 4-5 割で約 90-95%, さらに 5 割を超えるとほぼ全員吸着誘導されることが分かった。これから、誘導者が必ずしも大多数でなくても、一部存在するだけでも避難行動を加速化し、避難時間の短縮や累積避難者数の増加に大きく影響することがわかった。また、この結果は、目標とする避難時間に応じた避難誘導アプリの目標普及率を算定する上でも重要な知見である。

以上の結果から、災害時における情報伝達手段として蓄積搬送型通信を用いることを前提とした自律分散型の群衆誘導アルゴリズムは、十分普及している場合にはきわめて有効であることがわかり、さらに普及率に応じた性能変化も明らかにできたといえる。

#### 4 まとめ

本研究は、昼間の都市部のような人口密集地域での大規模災害時における、群衆の適切な避難誘導に関する基盤技術の確立を目的とし、被災者間での地図情報共有を図ると同時に、被災者個々に適切な避難経路を指示する避難誘導法を設計した。具体的には、大域情報を把握できる条件下での群衆誘導アルゴリズムの設計、局所情報のみに基づく自律分散的群衆誘導アルゴリズムの設計を行った。また、ヒューマンモビリティモデルとして、現実の特性と整合性のあるホームシックレビューワークモデルを構築した。このモデルも利用した様々なシミュレーションによる性能評価を通して、提案アルゴリズムの有効性を示した。これにより、大規模災害時における群衆の避難誘導法が得られ、当初の目的は達成されたと言える。

#### 【参考文献】

- [1] Y. Takayama, H. Miwa, "Delay Tolerant Navigation Method for Fast Evacuation in Poor Communication Environment at the Time of Disaster," International Journal of Distributed Systems and Technologies, Vol.6, No.3, pp.29-50, 2015.
- [2] 高山, 巳波, "劣通信環境下における情報伝達の遅延を考慮した避難誘導法," 信学技報, IN2014-121, Vol.114, No.478, pp.1-6, 2015.
- [3] Y. Takayama, H. Miwa, "Quick Evacuation Method for Evacuation Navigation System in Poor Communication Environment at the Time of Disaster," Proc. INCoS2014, pp. 415-420, Salerno, Italy, Sep. 10-12, 2014.

- [4] A. Fujihara, H. Miwa, "Homesick Levy Walk: A Mobility Model Having Ichi-Go Ichi-e and Scale-Free Properties of Human Encounters," Proc. IEEE COMPSAC2014, pp. 576-583, Vasteras, Sweden, Jul. 21-25, 2014. (Best Paper Award)
- [5] 高山, 巳波, "劣通信環境における状況把握の遅延時間が避難誘導に与える影響," 信学技報, Vol. 113, No. 473, pp. 13-18, Mar., 2014.
- [6] 藤原, 巳波, "すれちがい通信を利用した自己組織的吸着避難誘導法," 信学技報, Vol. 113, No. 473, pp. 19-24, Mar., 2014.
- [7] 小原, 巳波, "ノードの周期的遭遇特性を利用した中継転送の効率化," 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Mar., 2014.
- [8] H. Tsuji, A. Fujihara, H. Miwa, "Methods for Determining the Restoration Order of Base Nodes in the Virtual Segment Network," Proc. INCoS2013, pp. 456-461, XI'AN, Sep., 2013.
- [9] A. Fujihara, H. Miwa, "On the Use of Congestion Information for Rerouting in the Disaster Evacuation Guidance Using Opportunistic Communication," Proc. ADMNET2013, pp. 563-568, Kyoto, July, 2013.
- [10] 藤原, 巳波, "すれちがい通信を利用した災害時避難誘導法," 電子情報通信学会和文論文誌 B (震災復興や新興国の近未来に役立つ情報ネットワーク技術特集号), Vol. J96-B, No. 6, pp. 580-588, 2013.
- [11] A. Fujihara, H. Miwa, "Homesick Levy Walk and Optimal Forwarding Criterion of Utility-based Routing under Sequential Encounters," Studies in Computational Intelligence, Internet of Things and Inter-cooperative Computational Technologies for Collective Intelligence, Vol. 460, pp. 207-231, Springer, 2013.

### 〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Delay Tolerant Navigation Method for Fast Evacuation in Poor Communication Environment at the Time of Disaster	International Journal of Distributed Systems and Technologies	2015 年 3 月
劣通信環境下における情報伝達の遅延を考慮した避難誘導法	電子情報通信学会技術報告	2015 年 3 月
Quick Evacuation Method for Evacuation Navigation System in Poor Communication Environment at the Time of Disaster	Proc. International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems 2014 (INCoS2014)	2014 年 9 月
Homesick Levy Walk: A Mobility Model Having Ichi-Go Ichi-e and Scale-Free Properties of Human Encounters	Proc. IEEE Annual International Computers, Software & Applications Conference (COMPSAC2014)	2014 年 7 月
劣通信環境における状況把握の遅延時間が避難誘導に与える影響	電子情報通信学会技術報告	2014 年 3 月
すれちがい通信を利用した自己組織的吸着避難誘導法	電子情報通信学会技術報告	2014 年 3 月
ノードの周期的遭遇特性を利用した中継転送の効率化	電子情報通信学会総合大会講演論文集	2014 年 3 月
Methods for Determining the Restoration Order of Base Nodes in the Virtual Segment Network	Proc. International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems 2013 (INCoS2013)	2013 年 9 月
On the Use of Congestion Information for Rerouting in the Disaster Evacuation Guidance Using Opportunistic Communication	Proc. International Workshop on Architecture, Design, Deployment and Management of Networks and Applications 2013 (ADMNET2013)	2013 年 7 月
すれちがい通信を利用した災害時避難誘導法	電子情報通信学会和文論文誌 B	2013 年 6 月