

コミュニケーションを考慮した津波災害避難シミュレーション

近田 洋輔¹⁾, 原山 美知子²⁾

¹⁾岐阜大学大学院工学研究科 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

²⁾岐阜大学工学部電気電子・情報工学科 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

E-mail: vector.kpx.kosmos@gmail.com, harayama@gifu-u.ac.jp

Tsunami Evacuation Simulation focused on the Human Communication

CHIKADA Yousuke¹⁾, HARAYAMA Michiko²⁾

¹⁾Graduate school of Engineering, Gifu University 1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu,501-1193 Japan

²⁾Faculty of Engineering, Gifu University 1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu,501-1193 Japan

E-mail: vector.kpx.kosmos@gmail.com, harayama@gifu-u.ac.jp

Abstract: In Tsunami, the most urgent and important action for all the inhabitants is their safe quick evacuation. The multi-agent-based simulation is getting a lot of attention as a method to analyze the evacuation of evacuees. However, few studies focus on human relationships and communication. The purpose of this study, therefore, is to present a communication model including family relation, close friendship and exchange of information between the evacuees. The multi-agent-based simulator with this model simulated the inhabitants' action on the evacuation. As a result of that, successful communication each other and peoples' relationship prevents that the evacuees fail to escape by searching their family and friends. Therefore, human relationships and communication enhance quick and safe evacuation of inhabitants.

1.はじめに

津波災害の減災対策として最も有効な手段は、地震発生後、できる限り早期に避難することである。昔から津波災害の多い地域には「津波てんでんこ」と呼ばれる対応原則が伝承されている。津波てんでんことは、大地震が発生したとき、津波から逃れるため各自が即座に高台に避難することを推奨したものである。

宮城県名取市閑上（ゆりあげ）地区は東日本大震災で大きな津波被害を受けた場所の1つである。ここでは、総人口約5,600人のうち約700人が犠牲となっている [1]。地震発生直後の対応行動の調査結果 [2]では、すぐに避難した人は全体の2割ほどに留まり、家族に電話をした、出先から自宅に戻ったなど、家族や知人の安否を心配した行動が5割以上を

占めている。名取市の防災無線が故障していたことや住民の津波に対する情報収集への意識が低かったということもあるが、家族や知人との接触行動を優先して津波てんでんこを実践できずに被害が拡大したといえる。しかし、その一方で、家族や近隣の人と一緒に行動することで避難できた人も多い。このことから、津波災害の人的被害を軽減するためには、各人の避難を勧告するだけでは不十分で家族や知人などの住民の人間関係に起因する行動を考慮した施策が必要である。

人的被害への対策を模索する試みとして、災害時の被災者の動きを再現し、その特徴を分析する避難シミュレーションの研究が盛んである [3-11]。これらの研究では、住民の交通データや移動に関する社会調査に基づく避難モデルが構築されているものが多

い。片田ら[4,5]は住民の配置や広報車、マスメディアなどの情報伝達モデルを構築し、条件設定により様々な状況を再現する災害総合シナリオシミュレータを構築した。シミュレーションには、広報車やラジオなどのメディアによる情報伝達モデルが組み込まれ、住民の避難行動の開始時間への影響を再現している。畑山ら[6]は高知県黒潮町を対象に社会調査を実施し、その結果に基づいたエージェントモデルとシナリオ作成し、それらをもとにマルチエージェントシミュレータを構築している。金ら[7]は自然情報、災害情報、モビリティ情報を有機的に結合したデータベースを作成し、それを元に被災道路上における避難シミュレータを構築した。津波によって閉塞した道路や、その道路上の被災した車両を再現している。

心理を取り入れた避難シミュレーションでは、佐藤ら[8]が、津波災害における避難シミュレーションへの心理的要素として、住民の合理的意思決定メカニズムと認知的不協和（正常性バイアス）に着目した意思決定モデルを構築した。津波への不安感・死亡コストなどを Akerlof and Dickens のモデルを適用することによって定式化し、認知的不協和の作用を数理的に説明している。筆者ら[9-10]も、各住人の避難行動の意思決定において、危険認知度、正常性バイアスに加え、人を助けようとする心理や家族を心配する心理を取り入れ、心理状態の避難への影響を再現しようとした。

人間関係を取り入れたものでは、岡谷ら[11]が、避難者に親子間の関係を導入し、その行動を決定するモデルとしてBDIモデルを用いた避難シミュレーションシステムを構築している。結果として、親子の位置などの状況に応じて異なる避難結果を示し、子を捜す親による混雑の発生を再現している。しかしながら、この研究も親子という関係に特化した研究であり、住民同士の人間関係に着目しているモデルは少なく、住民間での情報交換を考慮した研究はない。

そこで、本研究では被災前の名取市閑上地区マップを用いて、住民の人間関係、および関係構築によって発生するコミュニケーションを考慮した避難モデルを構築する。この避難モデルでは、安否情報の

交換、住民の家族関係、知人関係を構築し、捜索行動および避難行動をモデル化する。また、それらの人間関係と取得情報に基づいて、住民各個人が行動を選択する意思決定モデルを組み込む。さらに、この避難モデルを用いたマルチエージェントシステムによる避難シミュレーションを構築し、住民間の人間関係および通信が避難行動に与える影響について検証する。

2. 避難モデル

2.1 提案する避難モデル

図1に提案する避難モデルの概要を示す。避難モデルでは、まずその対象地域を決め、その道路や建物を模した被災地モデルと、その地域の住民を模した避難者モデルを構築する。

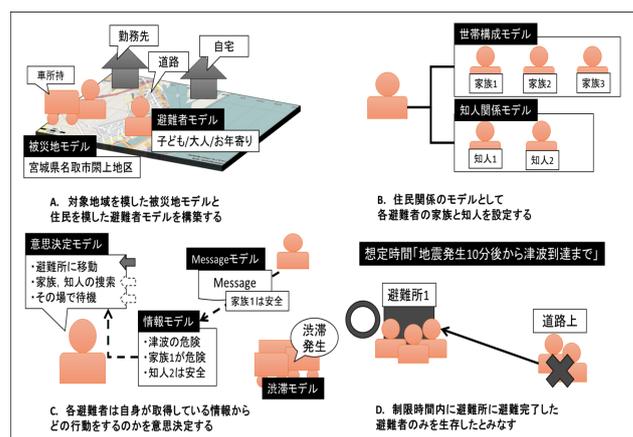


図1 提案する避難モデルの概要

被災地モデルでは2次元情報のみを取扱い、標高は考慮しない。また、設置した建物の中のいくつかを避難所として設定する。避難者モデルでは、住民の種別として子ども、大人、お年寄りの3種類を定義し、歩行速度や自動車の所持などを個人のパラメータとして与える。避難者モデルには、家族関係と知人関係が設定される。特に家族に関しては、対象地域である閑上地区の統計データを参考としている。避難者は、被災地モデル上で行動をする。このとき、避難者は徒歩と車で避難する。また、他の避難者と合流して行動する場合がある。避難行動のシミュレーションでは、本論文では省略するが簡易な渋滞モデルを用いている。

1人暮らしA 子ども 大人 お年寄り 0 1 0	1人暮らしB 子ども 大人 お年寄り 0 0 1	
2人家族A 子ども 大人 お年寄り 0 2 0	2人家族B 子ども 大人 お年寄り 0 0 2	2人家族C 子ども 大人 お年寄り 1 1 0
3人家族A 子ども 大人 お年寄り 1 2 0	3人家族B 子ども 大人 お年寄り 0 2 1	3人家族C 子ども 大人 お年寄り 0 1 2
4人家族A 子ども 大人 お年寄り 2 2 0	4人家族B 子ども 大人 お年寄り 0 2 2	4人家族C 子ども 大人 お年寄り 1 2 1
5人家族A 子ども 大人 お年寄り 1 2 2	5人家族B 子ども 大人 お年寄り 2 2 1	
6人家族 子ども 大人 お年寄り 2 2 2		

凡例	家族種別名	存在率
	構成数	構成数

表 1 関東地区を基に作成した世帯構成モデル

地震発生 10 分後から津波到達までを想定した制限時間の中で、避難者は自身の取得している情報に基づいて定期的に意思決定をし、実行する行動を選択する。これらの情報や意思決定の方法、行動の種類についてもモデルを定義する。また、各避難者はすべての避難所の位置と、家族や知人の自宅と勤務先の位置を知っているが発災時の位置は知らないものとする。さらに、移動の際は必ず目的地までの最短経路を進むものとする。エージェント間の情報のやり取りは定義した Message モデルを使用する。

各避難者を制限時間まで行動させ、最終的に避難所に到達した避難者を避難完了者とする。このとき、収容人数など避難所の状況は考慮しない。

2.2 家族関係を表す世帯構成モデル

本研究では避難者の家族の構成、すなわち世帯構成を対象地区の統計データ [12] [13]よりモデル化する。対象地域の統計データより、1 人暮らし、3 人家族などの世帯の種別を抽出し表 1 に示すような世帯構成モデルを作成した。統計データから世帯総数に対してこれらの種別の世帯が占める割合を求め、各種別の世帯を構成する避難者の種別、人数を設定する。統計データから求めた対象地域の総人口と世帯総数の比より、避難モデルで想定される世帯総数を算出する。さらに対象地域の丁区分ごとの世帯数の割合から、丁区分ごとの世帯総数を導く。続いて、各丁区分ごとに世帯構成モデルを適用し、各種別の

世帯を決定すると、世帯構成モデルより避難者が決定される。

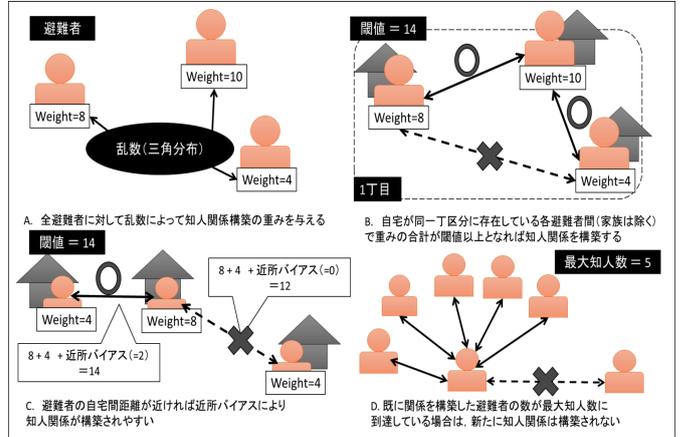


図 2 避難者の知人関係モデルの構築手順

2.3 知人関係モデル

本避難モデルでは、避難者間の知人関係について複雑ネットワーク構築の手法を用いてモデル化する。ここで、本避難モデルにおける避難者の知人とは、地震発生時に避難者がその安否を心配し、搜索行動に移る可能性がある人物として定義する。

知人関係モデルの構築には、複雑ネットワーク構築モデルの 1 つである「閾値モデル」 [14]を使用する。閾値モデルでは、ネットワークを構成する各ノードに対し重みと呼ばれる値を与え、各ノード間において、その重みを足した値が予め設定した閾値以上となっている場合にリンクを結ぶというものである。

知人関係モデルの構築手順を図 2 に示す。まず知人関係構築の重みとして、各避難者に乱数の値を与える。確率分布は図 2 の場合、平均値が 7 の三角分布である。本研究では、避難者間の自宅の位置関係、すなわち近所同士であるかどうかを考慮する。そこで、近所バイアス $B_{neighbor}$ を定義する。 $B_{neighbor}$ はロジスティック関数を用いて以下の式で表される。

$$B_{neighbor} = \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-d + d_T}}\right) \times \frac{R_T}{5} \quad (1)$$

ここで、 d は道路モデルの縮尺によって正規化された自宅間距離である。 d_T は近所閾値でロジスティック関数の境界を表す。また、 R_T は知人閾値であ

る。二人の避難者の重みおよび $B_{neighbor}$ を加算し、その値が知人閾値 R_T 以上である場合、避難者はお互いを知人とする。

なお、本研究では、知人関係の構築は、自宅が同一丁区分に存在し、かつお互いが同一の家族ではない避難者間の場合に限定している。また、知人数に上限値を設定している。

本研究では、地域の人間関係の親密さを表すシミュレーションパラメータとして平均知人数を考える。知人閾値が大きくなるほど、平均知人数は減少する。

2.4 情報と Message 交換のモデル

本避難モデルでは、避難者が現在状況を把握し、それを意思決定に反映させるために避難者が取得する情報をモデル化する。ここで、本研究で取り扱う情報とは、避難者が行動を選択するための要素であり、これらは特定の状況下でのみ更新されるものとする。表 2 に示すように、本モデルでは、災害情報、交通情報、家族情報、知人情報の 4 種類を情報として定義する。各情報には情報パラメータが付随しており、状況に応じてそれらに各値が代入される。

表 2 情報モデルで扱う情報の詳細

情報名	情報パラメータ	情報パラメータ説明	情報パラメータに代入される値
災害情報	災害状態	津波の危険性についての警告を表す	Unknown (不明)
			Danger (危険)
交通情報	渋滞状態	自身の周囲道路の渋滞状態を表す	Unknown (不明)
			発生している速度減衰の平均
家族情報	家族状態	各家族の安否の状態を表す	Unknown (不明)
			Safe (安全)
	家族現在位置	各家族の現在位置を表す	家族の現在位置
知人情報	知人状態	各知人の安否の状態を表す	Unknown (不明)
			Safe (安全)
	知人現在位置	各知人の現在位置を表す	知人の現在位置
各情報共通	更新時刻	情報が更新された時刻を表す	情報が更新された時刻

情報の更新タイミングは、交通情報と家族、知人と合流したときを除き、すべて Message を介して実行される。Message モデルは、避難者間における情報のやり取りをモデル化したものである。

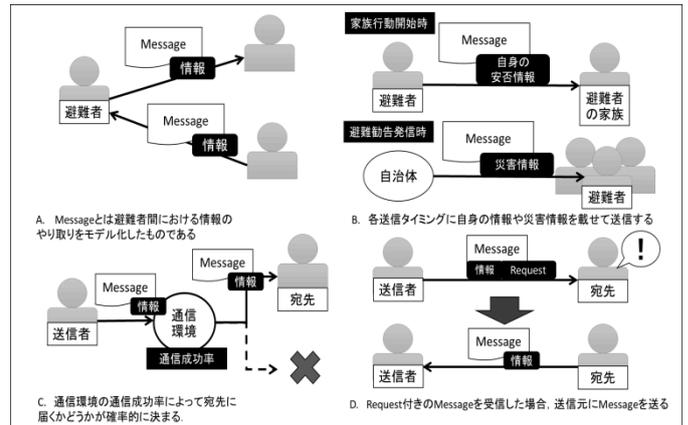


図 3 Message 交換モデルの概要

図 3 に示す Message とは、情報が含まれた会話や文章、映像などを概念化したものである。Message は避難者間における電話、メールでの連絡や、自治体が発信する避難勧告によって避難者に届けられる。Message には、Message の送信者、宛先、添付されている情報、返信を要請する Request の有無、宛先の避難者への待機要請の有無がその内容として設定される。

本モデルでは、通信環境の設定として、Message が送信者から宛先に届く確率を通信成功率として定義する。この通信成功率に従って送信 Message は宛先に届くものとする。ただし、避難者同士が合流した際に、合流している避難者に対して送信する Message は確実に届く。また、災害情報の広報は自治体の発する避難勧告の他、TV ラジオ、携帯電話などメディアが多重的な広報によって確実な情報伝達が期待できる。そこで本システムでは、自治体の発する避難勧告は確実に届くものとしてシミュレーションを行った。

2.5 意思決定モデル

2.5.1 Action の定義とその効用

避難モデルでは、各避難者は取得した情報を元にして、避難や捜索、待機などの行動を選択する。これが避難者の意思決定であり、本研究では効用理論を応用して避難時の意思決定モデルを構築した。

表 2 Action 種別ごとの Score 構成要素の概要

Action	避難行動	家族行動	知人行動
Desire	災害状態 d_1 , 車依存度 d_2		
	避難所の安全度 d_3	家族状態 d_3, d_4	知人状態 d_3, d_4
Cost	避難所までの距離 c_1	対象推定位置までの距離 c_1	
Risk	同行者への危険性 r_1, r_2		

Action	待機行動	
	通常	被要請時
Desire	災害状態	
	正常性バイアス	待機要請の効力
Cost	コスト効用最大値	
Risk	同行者への危険性	

まず、避難者が地震発生以降、選択し実行する行動を Action と呼び、8 種類の種別に分類した。避難行動は選択した避難所に向かう Action であり、家族行動と知人行動は、避難者の家族、または知人から 1 人を選択し、それを捜しに向かう Action である。

これらはまた、その場で待機を続ける待機行動には、常時選択肢となる Action の他に、Message の待機要請によって誘発されるものがある。

本モデルでは、避難者に対し、Score すなわち各 Action の効用の値を求め、Score に基づいて各 Action を確率的に選択する。Score は Desire, Cost, Risk の 3 つの要素で構成される。表 2 に Action 毎の Score 構成要素の意味を示す。Desire は避難者の Action に対する純粋な望みの効用を表したものである。Desire は現在の災害の状態や、避難所の安全度、知ることができた家族の安否情報などによって定まる値である。待機以外の行動はさらに車避難か徒歩避難に細分されており、Desire の車依存度は避難の手段として徒歩か車かを選択するための指標である。Cost は避難者がその Action を実行する際に消費するリソースに対する効用である。Cost は、その Action を達成

するまでの予測時間、すなわち想定所要時間で定まる。Risk はその Action に対して同行者が被る可能性のある損害に対する効用である。本モデルでは、Action を選択する避難者の同行者の数と、自動車の渋滞状況に着目し、同行者を避難させることができない可能性、渋滞に巻き込まれる可能性から Risk を定める。

Desire, Cost, Risk の値は、これらを集約して Score を求めるため、Action を起こす方向に対して 0.0 から 1.0 の正の実数で表す。例えば、Desire の値は気持ちの強さが強いほど大きく、Cost の値は距離が大きいほど小さく、Risk の値は危険性が高いほど小さくなるように定義する。表 3 に定義式の一覧を示す。

表 3 Action 種別ごとの Score 構成要素の定義

Action	避難行動	家族行動	知人行動
Desire	$d_1 = \begin{cases} 0.5 & \text{at Unknown} \\ 1.0 & \text{at Danger} \end{cases}$		
	$d_2 = \text{車依存度}$		
	$d_3 = 1.0$	$d_3 = \begin{cases} 0.0 & \text{at Safe} \\ 0.5 & \text{at Unknown} \\ 1.0 & \text{at Danger} \end{cases}$ $d_4 = \begin{cases} 0.0 & \text{at Adult} \\ 1.0 & \text{at Child, Aged} \end{cases}$	
Cost	$c_1 = 1 - \frac{D}{v \times t_{max}}$ D 距離, v 移動速度, t_{max} 最大時間		
Risk	$r_1 = 1 - e^{-n}$ at n 同行者人数 $r_2 = \text{渋滞リスク}$		

Action	待機行動	
	通常	被要請時
Desire	$d_1 = \begin{cases} 0.5 & \text{at Unknown} \\ 1.0 & \text{at Danger} \end{cases}$	
	$d_2 = \frac{10-t_e}{10}$ t_e 経過時間	$d_2 = \frac{10-t_w}{10}$ t_w 経過時間 (待機要請受診後)
Cost	$c_1 = 1$	
Risk	$r_1 = e^{-n}$	

各 Action の Desire, Cost, Risk は表 3 に示した項目の効用値から (2)~(4) 式より求める。Score はこれらの平均値とする。

$$\text{Desire} = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} d_i}{n_d} \quad (2)$$

$$\text{Cost} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} c_i}{n_c} \quad (3)$$

$$\text{Risk} = \frac{\sum_{i=1}^{n_r} r_i}{n_r} \quad (4)$$

ここで、 n_d, n_c, n_r は各 Action の Desire, Cost, Risk の項目数である。

2.5.2 Action の選択方法

地震発生後から各避難者は、Action の 1 つを選択し実行する。これが避難者の意思決定である。避難者が意思決定をするタイミングは次の場合である。

- ・現在実行している Action が終了した場合。家族行動や知人行動では搜索対象との合流が終了である。
- ・家族、知人行動で目的地に到達後 5 分経過した。
- ・車による Action で渋滞にあい 10 分経過した。
- ・新たに Message を受信した。

ここで、2 番目の家族行動と知人行動では、避難者は搜索対象の推定現在位置（目的地）に向かう。目的地到達後は、そこで周囲の探索を続けるが、5 分以上経過した場合、意思決定を再度実行するものとした。また、4 番目にあげたように、避難者は Message を受信すると意思決定を行う。避難者の意思決定では、現在実行可能な Action をすべて抽出する。そして、その Action 1 の 1 つに前述した手法を用いて Score を算出する。この Score により、各 Action を選択する確率が決定する。図 4 に Action 選択の概念図を示す。

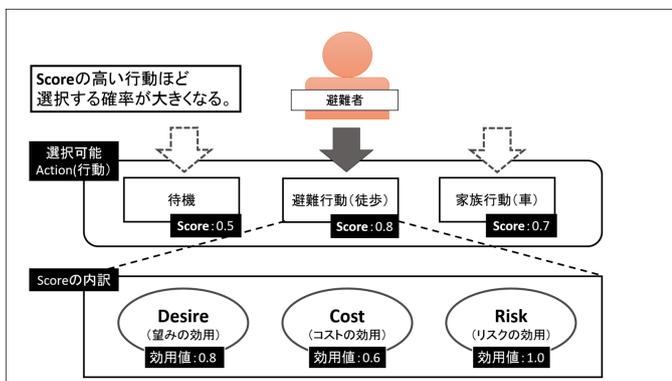


図 4 Action 選択の概念図

また、一度決定した Action の変更には労力がかかるため、避難者は可能なタイミングすべてで同じように意思決定するわけではない。すでに決定している Action を継続しやすい。これを避難者が直前に選択した Action 以外の Score に 1 未満の正の実数値を一律に乗算することによって、Action の Score を修正する。

各 Action の Score に対して、各 Action の選択確率を(5)式で定める。

$$\frac{\text{Score}(a)}{\sum_{a=1}^{n_a} \text{Score}(a)} \quad (5)$$

ここで、Score(a)は Action aの Score であり、分母は取りうる Action の Score の総和である。各 Action がこの確率で選択されるような応答曲線を生成し、それに沿って 1 つの Action が確率的に選ばれる。

3. 津波災害避難シミュレータの概要

本研究では、シミュレーションプラットフォームとしては artisoc [15]を使用し、津波災害避難シミュレータを作成した。

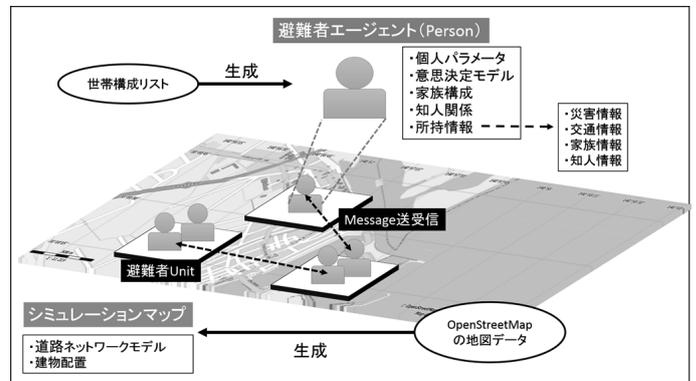


図 5 津波災害避難シミュレータの構成

3.1 シミュレータの構成

本津波災害避難シミュレータは、図 5 に示すように、避難者エージェント Person とシミュレーションマップで構成されている。

Person には子ども、大人などの種別や家族構成、知人構成などの各パラメータが設定される。また、現在取得している災害情報や家族情報なども個々の Person 内で管理する。

シミュレーションマップは OpenStreetMap の地図

データから生成した地図画像を基に構築した[16,17]. マップには道路ネットワークを実装し, 民家や勤務先などの建物を配置した.

避難モデルにおいて, 避難者は複数人がまとまって1つの避難者のように行動する場合がある. これを表現するために, 本シミュレータでは複数人の Person を集合的に扱う避難者 Unit を実装する. 避難者 Unit の概要を図6に示す.

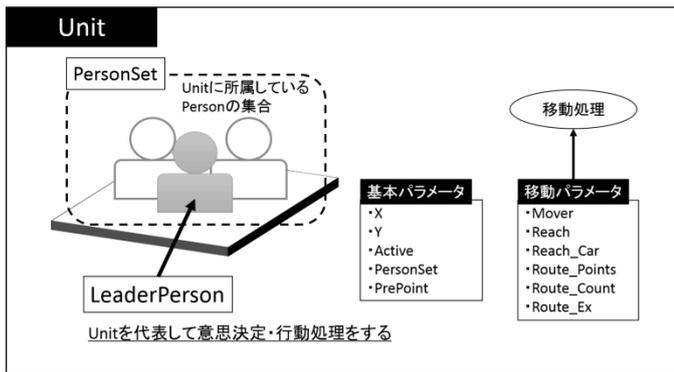


図6 避難者 Unit の概要

シミュレーション開始時, 各 Person は自身のみが所属する Unit を構成する. このとき, Unit に定義された配列 PersonSet にその Person が格納され, Person の Unit パラメータも設定される. その後, 周囲の家族や知人と合流した場合には, この PersonSet に合流した Person が格納される. また, 避難者の意思決定, 行動の処理, 移動はすべて Unit 単位で実行する. このとき, Unit を代表して意思決定と行動処理をする Person として, 各 Unit につき1人の LeaderPerson を設定し, Unit 上の Person は, 全員, PersonLeader に従うものとする.

Person の現在位置, 移動手段と移動速度も Unit 単位で管理する. 現在位置は, シミュレーションマップ内の x 座標, y 座標で表される. また, 直前に滞在, 通過していた交差点 NodePoint や, 各建物 Point が PrePoint に記録される. 移動手段 Mover には徒歩と自動車の2種類があり, それぞれに対応する移動速度が設定される.

3.2 避難シミュレーション

まず, 前処理として, 道路ネットワークの最短経路表の作成と, 各建物 Point の設定をする「最短経路・Map 設定」, 家族を設定する「世帯構成リストの生成」, 世帯構成に従って Person を生成し, 知人関係を構築する「Person 生成・知人関係構築」を行う. この処理では, シミュレーションマップ上に配置された各建物 Point に丁番号を設定し, 道路ネットワークに対して, 各 NodePoint を始点, 終点とした最短経路表を作成する.

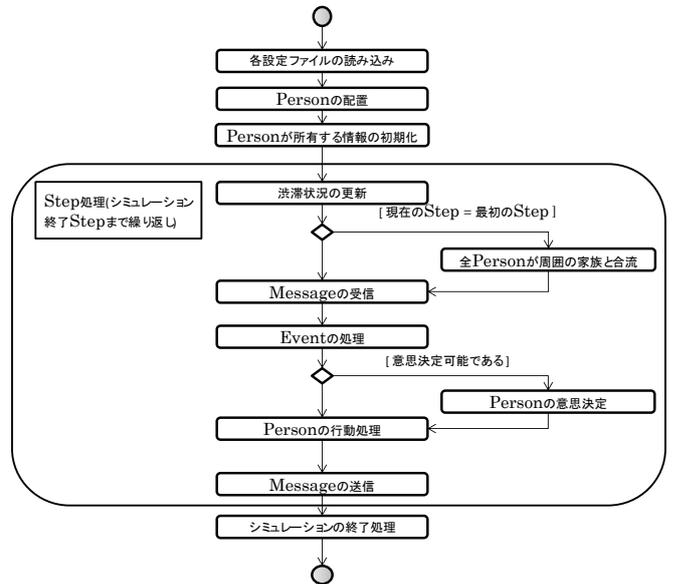


図7 避難シミュレーションのアクティビティ図

図7に避難シミュレーション実行のアクティビティ図を示す. 避難シミュレーションを実行時には, 前処理で設定した, 最短経路表, 世帯構築リスト, Person, 知人関係などがテキストファイルから読み込まれる. その後, すべての Person がシミュレーションマップ内に配置され, 各 Person の取得情報が初期化される. この取得情報の初期化では, 災害情報や家族, 知人の安否状態は Unknown (不明) で, それらの推定現在位置がその Person の自宅あるいは勤務先へと設定される.

初期化処理が終了すると, 実際にシミュレーションの Step が開始される. Step とはシミュレーション時間の最小単位であり, 本シミュレーションでは1Stepを1分と換算する. この1Step内で, Person の意思決定, 行動が処理される.

Step が開始されると、まず道路の渋滞状態が更新される。さらに、Step1 である場合は周囲の家族との合流処理を実行することで、あらかじめ合流していた避難者を再現する。その後、全ての Person が Message 受信 Box にある Message を受け取り、各情報を更新する。次に Event の処理では、自治体による避難勧告の送信や、全 Person による安否確認の一斉連絡などを行う。

Event の処理が終了すると、Person の意思決定、選択した行動の処理が始まる。各 Person は始めにこの Step で意思決定を実行するかどうかを判定する。意思決定の条件を満たした Person は新たに選択する Action をそれらの Score より決定する。一方で、意思決定をしない Person は現在選択している Action をそのまま選択し続ける。各 Person の意思決定が終了した後、それぞれの選択した Action の実行処理に移る。Action による移動、待機などの処理が全ての Person, Unit に対して終了すると、この Step 中に送信 Box に格納した送信 Message を各宛先に向けて送信する。ここまでの処理が繰り返し実行され、シミュレーション終了 Step に到達すると、各種情報を出力して終了する。

シミュレーション中の意思決定は、まだ避難を完了していない Unit の Leader である Person が実行する。また、その Person の ActionPower が 0 でなく、現在選択中の Action がまだ実行可能である場合は意思決定をせず、そのまま選択中の Action 実行処理に移る。ここで、ActionPower とは、Person が Action を継続するかどうかの指標である。ActionPower が 0 ではない場合、Person は現在の Action が実行可能である限り、その Action 継続する。意思決定を実行する場合、現在実行可能な Action を作成し、それぞれに Score を設定する。

図 8 に避難者の意思決定処理の概要を示す。まずすべての Action に対して、その種別 ActionID と対象 Target ごとに、その Action が実行可能かを判定し、実行可能ならば Action を生成する。実行可能な Action すべての Score を算出し、その Score に基づいて Action の応答曲線を ActionPallet 上に作成する。ActionPallet とは Action を格納している配列である。

そこで、乱数を発生させ、応答曲線に対応させて

Action を 1 つ決定する。

また、このときに選択した Action が家族行動あるいは知人行動であった場合、検索対象宛の送信 Message を作成する。Message には自身の安否状態と現在位置の他に Request フラグと Wait フラグが付与される。

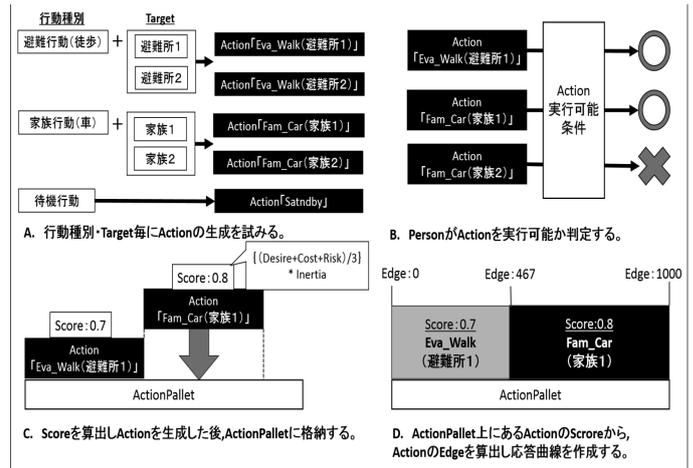


図 8 意思決定処理の概要

4.シミュレーション結果

まず、平均知人数 2 人、通信成功率 0%を標準モデルとしてシミュレーションを実行し、各ステップに対する避難完了率と行動選択率の推移より、避難モデルを検証した。次に、平均知人数のみを変化させることにより、避難者エージェントの知人関係が与える避難への影響について調べた。さらに、通信成功率のみを変化させ、エージェント間の通信によるコミュニケーションがどのように避難に影響するかを調べた。最後に平均知人数と通信成功率の変化を組み合わせた場合での避難への影響について検証した。なお、各パラメータセットにつき、シミュレーションは 40 回実行した。

4.1 避難完了率の推移

図 9 に標準モデルにおける Step 数に対する避難完了率の推移を示す。Step 数は経過時間に相当しており、1 ステップは 1 分に相当する。避難完了率の標準偏差は最小値が 1.2, 最大値が 10.7 であった。

避難完了率は経過時間に従って増加しており、避難完了率の最終的な値は本シミュレーションでは約72%であった。閑上地区では全住民に対する、生存者の割合は約88%であったことを付記する。

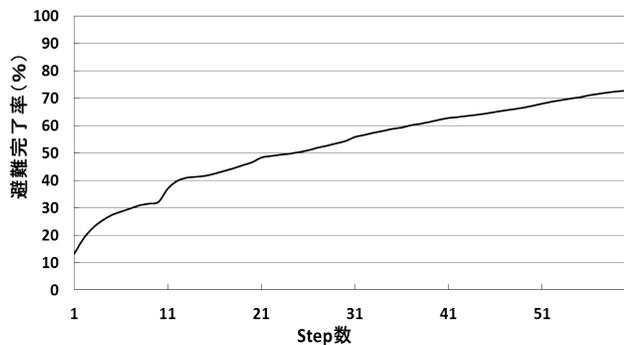


図9 Step数に対する避難完了率の推移

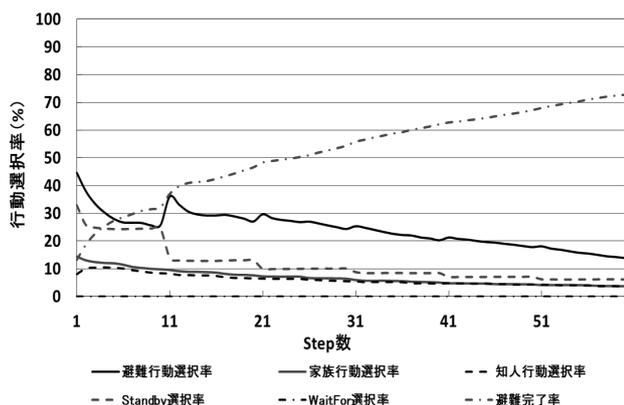


図10 Step数に対する行動選択率の推移

図10に標準モデルにおけるStep数に対する行動選択率の推移を示す。Step1から11までに避難行動を選択したエージェントは45%ほどであり、避難勧告が発せられる前なので自主的に避難をしようとしたエージェントであることがわかる。その後Step11から10Step毎にエージェントは避難勧告Messageを受信するため、そのたびに避難行動選択率が増加し、Standby選択率が減少している。また、家族行動・知人行動に関してはこの避難勧告に関わらず、選択率は徐々に減少していることがわかる。

また、行動選択率がStep数の増加に従って全体的に低下しているのはすでに避難を完了したエージェントが新たに行動を選択しないためである。

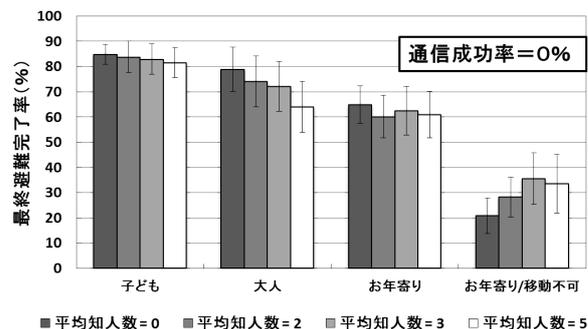


図11 平均知人数とエージェント種別毎の最終避難完了率の関係

4.2 最終避難完了率に及ぼす平均知人数および通信成功率の影響

図11に平均知人数とエージェント種別毎の最終避難完了率の関係を示す。平均知人数が増加することにより、お年寄りエージェント以外の最終避難率は減少していることがわかる。これは平均知人数が増加することにより、知人行動を選択するエージェントが多くなり、その結果、避難行動に遅れが生じているものと考えられる。特に大人エージェントの最終避難率においては、平均知人数が0人と5人の場合とでは最終避難率は約15%の減少がみられる。一方でお年寄りエージェントの場合は、全体でみると平均知人数による変化はみられない。しかし、移動不可のお年寄りエージェントに着目すると、平均知人数の増加に従って最終避難率は高くなり、平均知人数が3人の場合に最大となる。これらは、平均知人数の増加によって大人エージェントが知人行動を選択するケースが多くなり、それによって移動不可のお年寄りエージェントが避難を完了できるようになったと考えられる。その一方で、知人行動の選択により大人エージェントの避難行動が遅れ、大人エージェントの最終避難率は減少する。

図12に通信成功率とエージェント種別毎の最終避難完了率の関係を示す。どの種別のエージェントでも、通信成功率が高いほど最終避難完了率は増加していることがわかる。特に大人エージェントの最

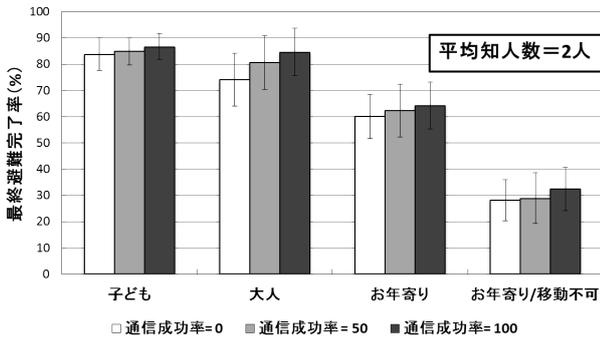


図 12 通信成功率とエージェント種別毎の最終避難完了率の関係

最終避難完了率の増加量が大きい。これは、エージェント間の Message 送受信により、エージェントが現在の状況をより正確に把握し、適切な行動を選択する確率が高くなったためであると推測できる。特に急務ではない家族行動や知人行動の選択を抑えることにより、大人エージェントの最終避難完了率が大きく増加していると考えられる。

図 13 に平均知人数および通信成功率と最終避難完了率の関係を示す。平均知人数が多い場合でも通信成功率を高くすることにより、最終避難完了率の減少を抑えられることがわかる。通信成功率が 0% である場合では平均知人数が多いほど、最終避難完了率は低下する。ここで、通信成功率が 50% である場合には全体的に最終避難完了率は増加し、平均知人数が 5 人である状態でも避難完了率は約 80% を維持している。通信成功率が 100% となると、最終避難完了率はさらに増加し、平均知人数が 5 人の場合に 82.5% と最大になる。

図 14 に平均知人数および通信成功率とお年寄りエージェント（移動不可）の最終避難完了率の関係を示す。移動が不可能なお年寄りエージェントに関しては、通信成功率が 0% の場合を除き、平均知人数が多い場合ほど最終避難完了率が大幅に増加している。通信成功率を高く設定した状態では、最大で 45% の最終避難完了率となっている。

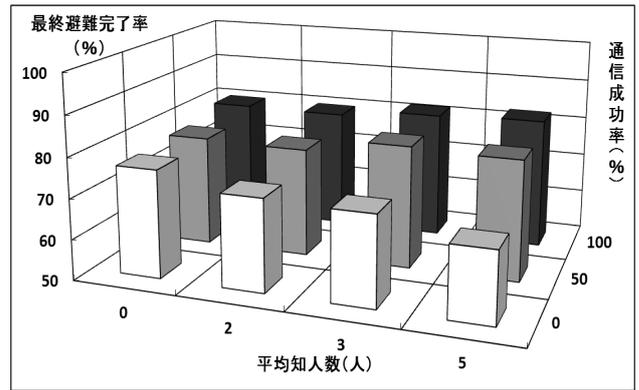


図 13 平均知人数と通信成功率が及ぼす最終避難完了率への影響

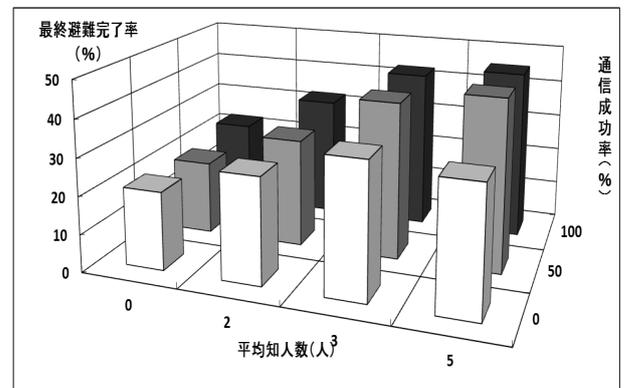


図 14 平均知人数と通信成功率が及ぼす最終避難完了率への影響:お年寄りエージェント(移動不可)

5. 考察

本研究でのシミュレーションでは、避難行動の改善のためには、住民の知人関係と通信環境の双方を充実させることが重要であるという結果が得られた。

現在、津波防災地域づくりに関する法律（津波防災地域づくり法）をもとに、「津波防災地域づくり」が推進されさまざまな制度が整備されつつある。実際に地域の防災施策を実施するのは各地方自治体であるが、東日本大震災では市町村職員が被災し、行政機能が麻痺した。このことから、被災時には「公助の限界」が生じるものとして対策を考えるべきである[18]という認識が広まり、自分自身の命や身の安全を守る自助および地域コミュニティでの相互の助け合い等共助を推進する取組みが行われている[19, 20]。北海道石狩市の地域防災ガイドでは、防災マップに加えて、災害時の行動として、お年寄りへ

の避難援助や、情報共有の方法なども記されている。高知県黒潮町の世帯別津波避難カルテでは、世帯毎の避難の課題を抽出し、避難行動要支援者台帳や各種避難計画に反映する。このような取り組みをより多くの地域に広がり根付かせ、通常の生活の中でも防災意識を高めていくことが重要であると考えられる。

地震発生時、閑上地区では防災無線が故障していたため津波襲来危険の認知が遅れ、被害の拡大につながった。また住民間の主な連絡手段となる固定電話は8割と携帯電話については7割程度が使用不可、携帯メール機能についても5割ほどが通信不能であるなど、被災者間の情報交換が困難であった[21]。

そこで、災害に強い新たな通信システムやサービスとして、村越ら[22]が研究しているソーシャルメディア GIS では、平常時と被災時双方において、SNS と GIS を組み合わせた災害情報データベースを提供する。情報投稿機能を用いることにより、平常時より各種防災情報を充実させ、被災時にも避難所や危険地帯などの情報を取得できる。中蔵ら[23]は被災者同士で行う通信では、被災地に残された公衆無線 LAN や地域 IP 網のみで完結して動作させられるという点に着目し、被災時における情報伝達の支援を行うシステムを提案している。これによって通信の集中、輻輳を回避し、被災者のスマートフォンやデジタルサイネージから、避難経路の表示や災害伝言サービスを提供することができる。

地域コミュニティによる自助共助の推進および災害に強い通信システムが普及することによって、各自が安心して避難することにより避難率の向上が期待できる。これは、先人が伝承してきた「津波てんでんこ」の真の達成であると考えられる。

6. おわりに

本研究では東日本大震災の被災地である宮城県名取市閑上地区を対象地域とし、住民のコミュニケーションを考慮した避難シミュレーションを行った。住民の家族関係と知人関係、避難行動中における探索行動や、住民間の情報交換を含む避難意思決定モデルを構築し、マルチエージェントシステムによる避難シミュレータを構築した。シミュレーションに

より、住民1人あたりの知人の数と、通信環境における通信成功率が避難行動に与える影響を検証した。

その結果、知人の数が増えるにしたがって、自力では移動できないお年寄りの住民の避難完了率は増加するが、全体の避難完了率は減少した。しかし、通信成功率を高くすることによって、知人数増加による避難完了率の減少は是正され、その値は知人が少ない場合を上回ることが確認できた。すなわち避難行動を策定するためには、住民の知人関係と通信環境の双方を充実させることが重要であると結論付けられる。

したがって、防災計画策定においては、まず、家族を中心に避難を共にするグループの正確な把握を行い、スマートフォンなどの個人的な通信から、地域見守りシステムや伝統的な連絡手段まで、あらゆる通信手段を活用して発災時の通信を確保することが重要である。

今回は、探索行動に注目し、情報に関しては個人的な安否情報と位置情報に絞って検討したが、これ以外に検討すべき課題としては、道路閉塞や詳細な渋滞と避難路の確保の方法、避難所の状態と目指すべき避難所の決定、学校などの集団避難、消防団などの地域住民による避難活動がある。さらに、情報伝達に関しては、デマすなわち誤情報の伝達を防止する方法を検討していく必要がある。そのためには、渋滞モデル、避難所モデル、エージェントモデル、通信モデルの詳細化が必要であり、それらを扱うためシミュレータの軽量化が必要である。

さらに、被災事例の分析に加えて、各地域マップに基づく避難シミュレータにより避難状況を様々な角度から検討することができれば、より安全度の高い地区防災計画が立案できると考えられる。

謝辞

本研究で用いたシミュレータはマルチエージェントシミュレーション環境 Artisoc を使用して構築しました。シミュレーション環境を提供いただいた(株)構造計画研究所に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 東日本大震災第三者検証委員会, “東日本大震災第三者検証委員会報告書-宮城県名取市閑上地区の検証-,” 2014,
http://1st.geocities.jp/gensai_hukkou/newpage2.html
- [2] サーベイリサーチセンター, “宮城県沿岸部における被災地アンケート報告書,” 2011,
<http://www.surece.co.jp/src/research/area/20110620.html>
- [3] 山影進, 服部正太, “コンピュータのなかの人工社会 マルチエージェントシミュレーションモデルと複雑系,” 共立出版, 2002, pp. 60-62.
- [4] 片田敏孝, 桑沢敬行, 金井昌信, 細井教平, “津波災害シナリオ・シミュレータを用いた尾鷲市民への防災教育の実施とその評価,” 社会技術研究論文集 2, pp. 199-208, 2004.
- [5] 片田敏孝, “避難対策と防災教育のためのシナリオ・シミュレータの開発,” 交通工学, Vol.48, no.1, pp. 18-23, 図巻頭 1p, 2013.
- [6] 畑山満則, 中居楓子, 矢守克也, “エージェント技法を用いた津波避難評価システムの開発,” 京都大学防災研究所年報 B, vol.56, no.B, pp. 45-51, 2013.
- [7] 金進英, 花房比佐友, 桑原雅夫, 大畑長, 堀口良太, 浦山利博, 佐口治, 江藤和昭, 家森崇文, 櫻井康博, 彦坂健太, 益田卓朗, “災害時と平常時の交通マネジメントのためのデータ融合と解析,” 生産研究, vol.65, no.2, pp. 195-200, 2013.
- [8] 佐藤太一, 河野達仁, 越村俊一, 山浦一保, 今村文彦, “認知的不協和を考慮した津波避難行動モデルの開発 : 避難シミュレーションへの心理的要素の導入,” 地域安全学会論文集, no.10, pp. 393-400, 2008.
- [9] 近田洋輔, 原山美知子, “心理要因を考慮した津波災害避難シミュレーション,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集 2013 年_情報・システム, vol.1, pp. “S-36”-“S-37”, 2013.
- [10] 近田洋輔, 原山美知子, “被災者の心理に基づく津波避難シミュレーション,” 情報処理学会研究報告, 2013-IS-126, no.8, pp. 1-8, 2013.
- [11] 岡谷賢, 高橋友一, “人間関係を考慮したエージェントベースのシミュレーションフレームワーク,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J94-D, no.11, pp. 1855-1865, 2011.
- [12] e-Stat, “平成 17 年国勢調査 小地域集計 宮城県,” 2005.
- [13] 宮城県, “平成 17 年国勢調査 1 次結果,” 2005.
- [14] 巳波弘佳, 増田直紀, 今野紀雄, “スケールフリー性を持つ閾値モデルの諸特性量の解析,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.106, no.42, pp. 73-78, 2006.
- [15] 兼田敏之, “artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション,” 構造計画研究所, 2010.
- [16] OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org>
- [17] Maperitive, <http://maperitive.net/>
- [18] 内閣府, “特集 共助による地域防災力の強化～地区防災計画制度の施行を受けて～,” 平成 26 年版 防災白書, 2014.
- [19] 北海道石狩市, “地区防災ガイド《地勢に則した地域ごとの防災計画》,” 2014.
- [20] 国立国会図書館, “南海トラフ地震対策の現状と課題—高知県及び黒潮町の取組を事例に一,” 国立国会図書館レファレンス no.764, pp. 85-102, 2014.
- [21] 総務省, “災害時における情報通信の在り方に関する調査結果,” 2012.
- [22] 村越拓真, 山本佳世子, “災害情報の活用支援を目的としたソーシャルメディア GIS に関する研究 : 平常時から災害発生時における減災対策のために,” 社会情報学, vol3, no.1, pp. 17-30, 2014.
- [23] 中蔵聡哉, 本間咲来, 小松健作, “被災時の情報共有を目的とした利用者端末間での双方向通信基盤の提案,” 情報処理学会 研究報告, 2015-GN-93(29), pp.1-8, 2015.