

避難意思決定の対角空間パターン生成における個体の影響の詳細分析 Detailed Analysis of Individual Influence in Generating Diagonal Spatial Pattern of Evacuation Decisions

鶴島 彰

Akira Tsurushima

セコム株式会社 IS 研究所

SECOM CO., LTD., Intelligent Systems Laboratory

a-tsurushima@secom.co.jp

1. アブストラクト

東日本大震災時に撮影された動画の分析で発見された、二つの避難行動が出口からの距離によって分れる現象において、エージェントの個性、同調行動中のエージェント間の関係、さらに避難中のエージェントの動的な行動特性などが群衆避難行動に与える影響について分析した。その結果、個々のエージェントに着目したアプローチには限界があり、集団のダイナミクス全体に介入するようなアプローチが求められるとの示唆を得た。

2. はじめに

我々は東日本大震災において撮影された動画¹の分析によって、48人の避難者の室外へ逃げる行動 (Flee) と机などの下に隠れる行動 (Drop) が、出口からの距離によって分かれ、対角空間パターン (DSP) を生成する現象 (図 1) を発見し、災害避難時の避難者間の同調行動を表現した避難意思決定モデル (EDM) [3] をエージェントに組み込んだマルチエージェント・シミュレーションによりこのような現象が再現可能であることを確認した [7]。当初この作業は、災害避難の実データによる EDM の検証作業として行われた。これは 500 体のエージェントを環境内にランダムに配置するという、動画に比べるとやや抽象的なシミュレーション設定により行われ、EDM により DSP が再現可能であることが確認された [7, 4]。しかしこの時の結論は、DSP の発生は個々のエージェントの避難時の認知活動の結果というよりはむしろ、単純な挙動を示す要素の集合体における物理現象としての側面が強いというものだった。次に我々は、実際に動画に記録された 48 人の避難行動を、EDM により再現するシミュレーションを行った。この時のシミュレーション設定は、動画同様、初期状態として 48 体のエージェントを

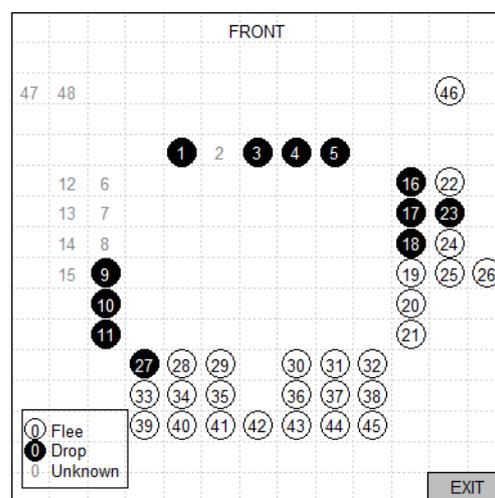


図 1 Flee と Drop が作る対角空間パターン

配置し、さらにエージェントの動きも、動画のなかの人物同様に物理的に制約されるという、より現実に近いものだった。結果としては、この現実的な設定でも DSP は再現可能であったが、抽象的な設定時と大きく異なったのは、DSP の再現が極めて難しかったことである。分析の結果、DSP の発生はエージェントの視界を表す二つのパラメータ値に対する感度が高く、これらのパラメータの極めて限られた範囲でしか現象が再現できないことが分かった。以上の分析から、災害避難時の避難者の視界が前方に対して 20 度という極めて狭い範囲に集中しているというトンネル視 (tunnel vision) 仮説を提唱し [5]、極度のストレスや恐怖により視覚的注意や記憶が眼窩中心部に集中し周辺部での見落としが発生する、トンネル視 [2, 1] という人間の認知現象と、群衆避難状況との接続を行った。トンネル視仮説は経験的に検証されたものではないが、これまでの避難研究において暗黙に仮定されていた避難者の視界と大きく対立するため、この仮説が群衆避難現象に与える影響についても研究を進めている [6]。

¹<https://www.fnn.jp/common/311/articles/201103110012.html>

本研究では、DSP 発生において、個々のエージェントがどのような役割を果たしたのかを、よりミクロな視点で分析した。EDM は災害避難時の同調行動を表現したものであり、これまでの研究から同調行動を削除したシミュレーションでは DSP が発生しないこと、エージェントの視界を角度が狭く距離が長い範囲に設定した場合（トンネル視仮説）以外では動画の状況の再現が困難なことが分かっている。しかしこれら二つの条件がそろった場合に必ず DSP が発生するわけではなく、他の要因が DSP 発生に影響を与える可能性がある。本研究では、エージェントの初期位置、個々のエージェントのパラメータ値、同調行動におけるエージェント間の影響関係、さらに避難行動中のエージェントの採った行動の時系列的な特徴などを分析し、これらが DSP 発生に与える影響について調査した。その結果、群衆避難に与える影響が大きいのは、個々のエージェントの特性なのか、それとも環境や集団全体のダイナミクスなのかについて分析し、効果的な避難支援に対する示唆を得たい。

3. 避難意思決定モデル

エージェント i は心的状態を表す確率変数 X とふたつのパラメータ、反応閾値 θ_i とリスク感受性 μ_i を持つ。 θ_i と μ_i はエージェント毎にランダムに振られる値である。エージェントは $X = 1$ のとき自分の行動を自身で決める意識的行動を行うが、 $X = 0$ のときは他者の行動をベースに自分の行動を決定する同調行動を行う。二つの状態間の遷移は以下の関数に基づいて確率的に決まる。

$$P_i(X = 0 \rightarrow X = 1) = \frac{s_i^2}{s_i^2 + \theta_i^2} \quad (1)$$

$$P_i(X = 1 \rightarrow X = 0) = \epsilon \quad (2)$$

エージェントは環境が有する客観的なリスク値 r と、タスク（この場合は全員が避難行動をすること）の進捗状況によって、個々の心的状態を確率的に切り替える。その時に使われる個体ごとの刺激値 s_i を以下のように定義する。

$$s_i(t+1) = \max\{s_i(t) + \delta - \alpha(1-R)F, 0\} \quad (3)$$

ただし、 δ は単位時間あたりの増加量、 α はスケールファクター、 R はエージェントのリスク認知を表す以下の関数である。

$$R(r) = \frac{1}{1 + \exp(-g(r - \mu_i))} \quad (4)$$

Algorithm 1 意識的行動 ($X = 1$)

```

if 現在の行動が未定である then
    確率 0.5 で Flee か Drop のどちらかを選び現在の
    行動とする
end if
if 現在の行動が Flee であり進行方向が無人 then
    制約方向に 1 ステップ移動する
else
    その場にとどまる
end if

```

Algorithm 2 同調行動 ($X = 0$)

```

N0 : 視界内の個体の中で行動が未定のものの数
N1 : 視界内の個体の中で行動が Flee のものの数
N2 : 視界内の個体の中で行動が Drop のものの数
max(N0, N1, N2) の行動と同じ行動を採る
if 現在の行動が Flee であり進行方向が無人 then
    制約方向に 1 ステップ移動する
else
    その場にとどまる
end if

```

ただし、 g はシグモイド関数の曲率である。さらにタスク進捗の推定値を表す F は、

$$F(n) = \begin{cases} 1 - n/N_{max} & n < N_{max} \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (5)$$

で与えられる。ただし、 n は視界内の他のエージェント数、 N_{max} は視界内に入る最大エージェント数を表す固定値とする。また、エージェントは $X = 1$ のときは Algorithm 1 を²、 $X = 0$ のときは Algorithm 2 を実行する。

エージェントの持つ二つのパラメータは、反応閾値 θ_i については、群衆全体の避難進捗に対する個々のエージェントの貢献しやすさを表す値、リスク感受性 μ_i については客観リスク r に対する個々のエージェントの敏感さを表していると解釈できる。

4. 初期位置の影響

はじめに、シミュレーション開始時のエージェントの位置の影響について分析した。これは、地震発生時に特定の位置に居た人物の行動が、他の避難者にどのような影響を与えたかを調べる事である。分析の方法としては、同調行動 (Algorithm 2) においてエージェントの行動に影響を与えた他のエージェント (たとえ

²本研究では Algorithm 1 のとおり、Flee/Drop をランダム選択することを意識的行動と呼んでいる。

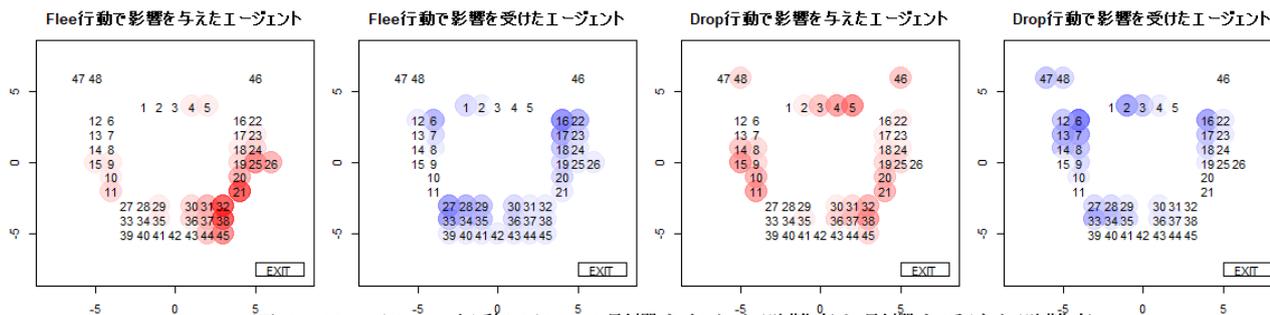


図2 Flee/Drop 行動において影響を与えた避難者と影響を受けた避難者

ば $\max(N_0, N_1, N_2) = N_1$ であれば、視界内のエージェントのうち行動が Flee であるものを全て記録し、Flee, Drop それぞれの行動においてどのエージェントがどのエージェントに影響を与えたかを、それぞれのエージェントの初期位置に基づいて分析することで行った。分析の結果を図2に示す。ここでは Flee, Drop のそれぞれについて、多数のエージェントに影響を与えたエージェント (赤) と、多数のエージェントから影響を受けたエージェント (青) の初期位置を濃い色で表示した。たとえば図2の一番左の図は、右下の出口に近い位置にいたエージェントが Flee 行動において多数のエージェントに影響していることを示している。図を見ると特定の位置のエージェントが、Flee/Drop それぞれにおいて、影響を与え/受けている事が分かる。

5. パーティション分析

4. 節の分析方法を使って、影響を与えたエージェントと影響を受けたエージェントの関係を、各エージェントをノード、影響の方向をアークで表した影響グラフで表現する (ここでは Flee/Drop の区別はしないものとする)。こうすることでシミュレーション試行一回につき影響グラフ一個を得ることが出来る。さらに影響グラフを作る過程において、各エージェントについて、シミュレーション期間中最初に未定から Flee または Drop 行動に変わった時間と、全期間に対する $X = 1$ の状態だった期間 (意識的行動を採っていた期間) の割合を記録した。

本研究では、先行研究 [5] で発見した DSP 発生の最適パラメータセット ($\epsilon = 0.1, \delta = 1.2, \alpha = 0.1, d = 10, \omega = 20, \Delta r = 5.0, N_{max} = 15, g = 0.4$) を使っているが、そのようなパラメータでも常に DSP が発生するわけではない。DSP 発生を表す数値指標 O [5] を使って、100 回のシミュレーション結果を評価すると、 O の値は最小値 (-96.35)、中央値 (24.75)、最大値

(66.47) と広範囲に分布する。そこで 100 回のシミュレーションの結果で得られた影響グラフを $O \geq 25.0$ の群 C^+ (DSP が発生) と、 $O < 25.0$ の群 C^- (DSP が発生しない) に分け、それぞれの群の影響グラフを使って以下の要素を調べた。

1. エージェントのパラメータ

反応閾値「 θ_i 」とリスク感受性「 μ_i 」。どちらもランダムな初期値としてエージェント毎に与えられるため、エージェントの個性を表すと考えられる。

2. グラフ中心性

影響グラフに対してグラフの中心性分析を行い、各ノード (エージェント) に対して、度数中心性「度数」、ページランク中心性「PR」、媒介中心性「媒介」を計算した。

3. シミュレーション期間中の振る舞い

避難期間に対する $X = 1$ (意識的行動) の期間の割合「意識」と、シミュレーション開始後初めて Flee または Drop 行動を行った時間「時間」。前者は避難期間中どれだけ自分自身の判断で行動していたかを表し、後者は自身が発生してから具体的な避難行動に移るのが早かったか否かを表している。

ここで、中心性分析における度数中心性とは、避難中に直接影響を与えたエージェント数の多さを示すもので、各ノードについて出方向のアークの数で表され、それが多いほど度数中心性が高いという。

ページランク中心性とは、Google 社が開発した Web サイトの重要性を示す指標をグラフ中心性分析に応用したもので、Web サイト間の参照/被参照関係を、影響グラフにおけるアーク (影響の方向) に当てはめたものである。度数中心性のように直接の影響関係を見るのではなく、「多くのエージェントに影響を与えたエージェント」の行動に影響を与えたエージェントほど相対的に高く評価するという、影響グラフにお

ける重要な (影響力の高い) ノードを評価する手法である。

媒介中心性とは、グラフ上の任意の二つのノードの最短経路上にあるノードを考えた時、多くの最短経路が通過するノードをより高く評価する指標である。媒介中心性の高いノードは、グラフ上の複数のクラスターを接続するノードと考えられ、このようなノードを取り除くとグラフが複数に分裂する性質がある。

C^+ , C^- それぞれに含まれる影響グラフについて、エージェントごとに上記の値の平均値を求め、二群の差が有意であるか否かを、対応のある t 検定を使って調べた。その結果は必ずしも安定的ではなかったため、上記のような検定 (100 回のシミュレーション結果を C^+ , C^- に分け、平均値の t 検定を行う) を独立に 10 回繰り返し、その結果の p 値を表 1 に示した。表の青い部分は $p < 0.05$ である。

表 1 C^+ , C^- 間の t 検定の結果の p 値 (O=25)

$ C^+ $	θ_i	μ_i	度数	PR	媒介	意識	時間
55	0.51	0.66	0.43	1	0.46	0.00	0.09
49	0.04	0.65	0.05	1	0.71	0.26	0.00
43	0.22	0.98	0.09	1	0.00	0.00	0.02
47	0.86	0.77	0.62	1	0.23	0.00	0.53
43	0.54	0.70	0.61	1	0.00	0.00	0.14
44	0.90	0.53	0.12	1	0.00	0.00	0.00
52	0.33	0.42	0.18	1	0.77	0.00	0.25
53	0.59	0.44	0.42	1	0.00	0.00	0.61
44	0.19	0.91	0.06	1	0.00	0.00	0.00
53	0.22	0.93	0.87	1	0.82	0.00	0.03

6. 考察

4. 節の分析より、Flee/Drop それぞれの行動において、エージェントの初期位置が、他のエージェントへの影響の授受において重要であるという知見が得られた。

また 5. 節の分析において、表 1 の結果から、「媒介」「意識」「時間」において避難行動に差が現れ、逆に「 θ 」「 μ 」「度数」「PR」においては殆ど差が現れないことが明らかになった。差が現れた「媒介」「意識」「時間」について、シミュレーション結果の一例を図 3, 4, 5 に示す³。

まず「 θ 」と「 μ 」だが、これら二つのパラメータは、エージェント毎にランダムに振られる値であり、個々のエージェントの行動特性を表していると考えられる (これら二つのパラメータ、および初期位置と視線の方向意外にエージェント間に差はない)。このことが示

³ $p < 0.05$ の結果について必ずしもこれらと同じパターンが見られたわけではないため、これらの図はあくまで一例であり、「媒介」「意識」「時間」の空間的な役割については結論は留保している。

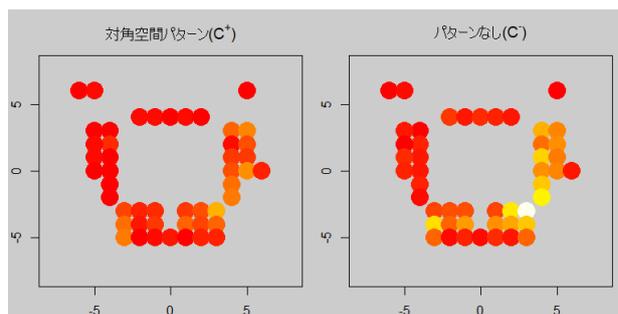


図 3 媒介中心性「媒介」

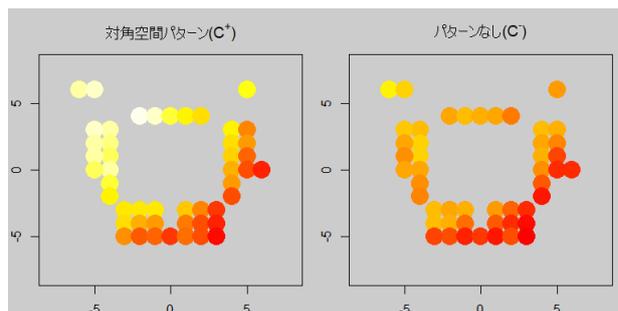


図 4 意識的な行動の割合「意識」

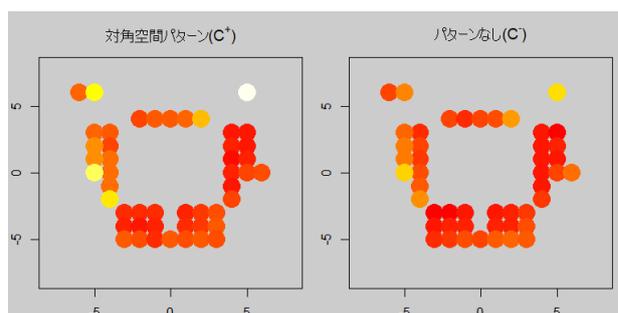


図 5 最初に Flee/Drop 行動を行った時間「時間」

しているのは、エージェント毎の行動特性の違いは、集団全体の振る舞いにほぼ影響を与えないという事である。

さらにネットワーク中心性分析において、多数のエージェントに影響するエージェント (度数中心性) や重要なエージェント (ページランク中心性) ではなく、グループとグループを連結するエージェントの存在 (媒介中心性) において影響が見られたことも興味深い。このことは、同調行動において実際に他のエージェントの行動に影響を与えたエージェントではなく、避難過程で動的に発生する局所的なクラスターの間で、影響を媒介したエージェントの存在が重要だった事を意味する。

これらの事から、個々のエージェントの特性や役割ではなく、避難行動中に動的に発生したクラスターで

発生した行動が、他のクラスターに影響するか否かが、全体の行動を決める際により重要であるとの示唆を得ることができる。

「意識」と「時間」については、これら二つは避難期間中のエージェントの行動の特徴を表すものだが、どちらも個々のエージェントにア priori に与えられたものではなく、避難中のダイナミクスの結果 (ア posteriori に) 発生したものである。以上のことから、少なくとも群衆避難においては、教育や行動変容のような個々のエージェントに焦点を当てたアプローチには限界があるとの知見が得られた。

田中ら (2015) は、避難行動における知識と行動の不一致について指摘し、災害状況での適切な安全避難行動を知識として習得していたとしても、自身が実際に選択する行動には、不安全避難行動を選択してしまうことを実験により示した [8]。地震避難においては Flee は危険な避難行動とされており、そのような防災教育が行われているにもかかわらず、動画分析において多数の避難者が Flee 行動を採っていた事は予想外であった。DSP 発生において、個々のエージェントの個性 (表 1 の θ_i と μ_i) は殆ど影響がないにも関わらず、避難時のダイナミクスの微妙な違い (表 1 の「媒介」「意識」「時間」) が大きな影響を与える事実は興味深い。この事は、群衆避難においては、個人に対する避難教育だけでは限界があり、群衆の配置設計や、避難時の集団のダイナミクスに直接介入する環境設計、あるいはナッジ (Nudge) のようなアプローチが有効となる可能性を示唆している。

7. 結論

EDM を使って DSP を発生させるシミュレーション分析において、エージェントの個性ではなく、初期位置、クラスター間を媒介するエージェントの存在、意識的に行動する傾向、および避難行動に移るまでの素早さが、群衆避難全体に影響を与えることが分かった。以上から、群衆避難においては、エージェント個人に対する避難教育だけでは限界があり、集団のダイナミクスに直接介入する環境設計などのアプローチが有効であるとの示唆を得た。

文献

- [1] Loftus, E., Loftus, G., Messo, J.: Some facts about "weapon focus.". *Law and Human Behavior* **11**, 55 (03 1987)
- [2] Mackworth, N.H.: Visual noise causes tunnel vision. *Psychonomic Science* **3**, 67-68 (1965)
- [3] Tsurushima, A.: Modeling herd behavior caused by evacuation decision making using response threshold.

- In: Davidsson, P., Verhagen, H. (eds.) *Multi-Agent-Based Simulation XIX*. MABS2018. LNAI 11463, pp. 138-152. Springer (2019)
- [4] Tsurushima, A.: Validation of evacuation decision model: An attempt to reproduce human evacuation behaviors during the great east japan earthquake. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2020) - Volume 1*. pp. 17-27 (2020)
 - [5] Tsurushima, A.: Reproducing evacuation behaviors of evacuees during the great east japan earthquake using the evacuation decision model with realistic settings. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2021) - Volume 1*. pp. 17-27 (2021)
 - [6] Tsurushima, A.: Simulation analysis of tunnel vision effect in crowd evacuation (in press). ResearchGate (2021)
 - [7] 鶴島, 彰.: 地震避難における意思決定の同調行動による再現. In: *日本認知科学会第 35 回大会論文集*. pp. 582-588 (2018)
 - [8] 田中孝治, 梅野光平, 池田満, 堀雅洋: 知識と行動の不一致に見られる不安全避難行動の危険認知に関する心理実験的検討. *認知科学* **22**(3), 356-367 (2015). <https://doi.org/10.11225/jcss.22.356>