

合理的意思決定，認知バイアス，物理要因が 地震避難行動に与える影響

Impacts of Rational Decision, Cognitive Bias, and Physical Factor on Earthquake Evacuations

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

概要

室内からの地震避難において「逃げる」と「留まる」の選択に空間的なパターンが存在することが指摘され、このパターンが避難時の同調行動を表現した避難意思決定モデルによって再現可能である事が示された [7]。しかしこのモデルは、物理要因と合理的意思決定という二つの重要な要素を欠いており、避難モデルのリアリティという点で問題があった。本稿では、避難意思決定モデルに合理的思考レイヤーと物理レイヤーを組み合わせる事によって、より人間のふるまいに近い避難エージェント・アーキテクチャを導入し、合理的意思決定、認知バイアス、物理要因の三つが、避難時の意思決定の空間パターンの発生にどのような効果をもたらすかを分析した。さらに合理的意思決定において、合理的に振る舞うエージェントの割合を変化させることで、合理的思考の影響について分析した。

キーワード：同調行動，避難意思決定モデル，Social Force Model，地震避難行動，合理的思考，認知バイアス

1. はじめに

東日本大震災において仙台の会議室で撮影された動画¹の分析によって、室内からの地震避難における、物陰に伏せる行動（「留まる」）と部屋から外部に逃げ出す行動（「逃げる」）の選択が、出口からの距離によって分かれるという現象が指摘された [7]。さらに、このような現象は出口からの距離による意思決定というプロセスを仮定せずとも、避難時の同調行動（Herd Behavior）による創発現象として説明可能であることが、避難意思決定モデル (EDM) [5] を使ったシミュレーション (図 1) により示された [7]。また避難時の出口選択における対称性破綻についても、これまでは合理的意思決定の結果として離散選択モデルによる説

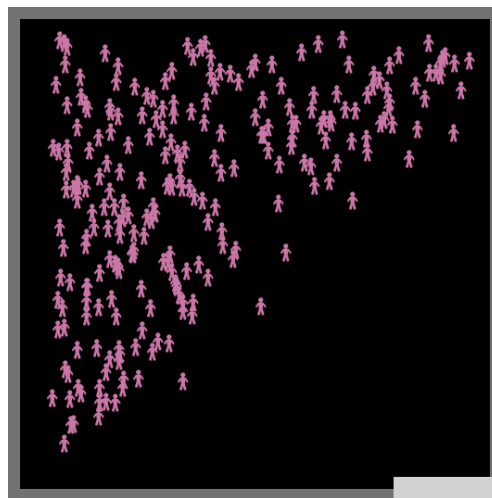


図 1 「留まる」を選択したエージェントのみが出口（右下）から遠い位置に残される

明がなされてきた [4] のに対し、EDM により、そのような合理的意思決定プロセスを一切省いても、同様の現象が同調現象として再現できること [6] が示された。

しかしこれらの分析で使われた EDM は、認知バイアス（同調行動）のみをモデル化したものであり、現実の避難状況の再現という意味においては以下の欠点があった。

- 物理的要因の無視。エージェントは質量や大きさを持たず、他のエージェントや障害物を通り抜けてしまう
- 合理的意思決定の無視。人間であれば当然行うであろう意識的な行動が採れない。たとえば最短距離にある出口を選ばない。

一方 EDM には、その単純さ故に、他のモデルとの統合が容易であるという利点がある。

本稿では、これらの物理的要因と合理的意思決定を、それぞれ別のモデルで表現し、EDM と統合することにより、統一的な避難エージェントモデルを構成

¹<https://www.youtube.com/watch?v=tejlDDKeg8s>

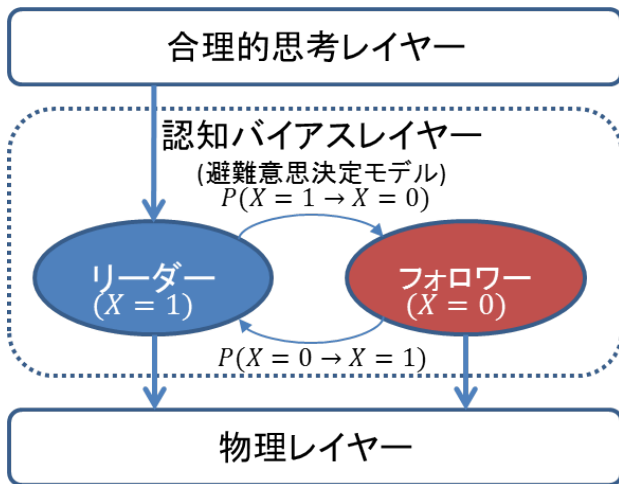


図2 避難エージェント・アーキテクチャ

する。さらに、それぞれのモデルをノックアウトしたシミュレーションを行い、結果を比較することにより、合理的意思決定、認知バイアス、物理要因のそれぞれが、「留まる」と「逃げる」という行動の選択が出口からの距離に応じて分かれる現象に対してどのように影響するかについて分析する。

2. 避難エージェント・アーキテクチャ

EDMを認知バイアスレイヤーとし、これを人間の合理的意思決定を表現する合理的思考レイヤーと、環境の物理要因を表現する物理レイヤーで挟んだ三層構造を、避難エージェント・アーキテクチャ(図2)と呼ぶ。

EDMは、エージェントが意識的に行動するリーダー状態と、他のエージェントの行動を真似するフォロワー状態の、ふたつの心的状態を確率的に切り替えるものだが、避難エージェント・アーキテクチャでは、リーダー状態のときには合理的思考レイヤーを使って意思決定し、またリーダー、フォロワー両状態の出力を物理レイヤーへの入力とすることにより、合理的意思決定と物理要因の両者に対応することができる。合理的思考レイヤーと物理レイヤーはEDMとは独立であり、それぞれのレイヤーにおいて問題に対して適切なモデルを選ぶ事ができる。

避難エージェント・アーキテクチャを使った分析により、出口選択における対称性破綻現象では、物理要因を考慮することにより対称性破綻発生の頻度が高まることが明らかになった[8]。

2.1 避難意思決定モデル (EDM)

避難エージェント・アーキテクチャの中心となる、避難意思決定モデル (EDM) について説明する。EDMは、生物学の反応閾値モデル [1, 2] に基づいて、災害避難時の同調行動を表現したものである。モデルは環境とエージェントからなり、エージェント i は反応閾値 (θ_i)、リスク感受性 (μ_i) というランダムに振られた二つのパラメータをもつ。またエージェントは、時刻 t での行動を表す決定変数 $\pi_i(t) = \{\text{undecided}, \text{flee}, \text{drop}\}$ を持ち、それぞれ「未定」「逃げる」「隠れる」を表す。さらにエージェントは $X = 0$, $X = 1$ の二つの内部状態を持ち、それぞれフォロワー、リーダー状態とよぶ。リーダー状態の時、エージェントは自分の意思で主体的に行動を決めるが、フォロワー状態の時は周囲のエージェントの行動を模倣する。具体的には、リーダー状態の時は合理的思考レイヤーに与えられたモデルによって $\pi_i(t)$ の値を定め、フォロワー状態の時は、自分を中心にある一定範囲内のエージェントの中で最も多く採用されている $\pi_i(t)$ と同じ値を選ぶ。

二つの内部状態は、以下に示す確率関数に基づいて確率的に遷移する。

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

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

ただし s_i は、エージェント i における環境からの刺激の推定値であり、以下の式で表される。

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

ただし $\hat{\delta}$ は、上記差分方程式の増分であり、 R と F はそれぞれリスク認知とタスク進捗を表す関数である。リスク認知 R は、環境の客観的なリスク値 r の関数であり、以下のように表される。

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

ただし、 g はシグモイド関数の曲率である。タスク進捗 F は、周囲の人数 n の関数であり、以下のように表される。

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

ただし N_{max} は、周囲の人数の最大値とする。ここで、本モデルにおけるタスクは避難行動なので、上記 n は正確には、まだ避難行動を採っていない ($\pi_i(t) =$

undecided の) エージェントの人数である。最後に、式 2 の ϵ は、シミュレーションパラメータとして与えられるリーダーがフォロワーに遷移する固定確率で、この確率は全エージェントで等しいものとする。

3. 地震避難における合理的意思決定、認知バイアス、物理要因

本稿では、[7]の地震避難行動に対し避難エージェント・アーキテクチャを適用することにより、地震避難に対して合理的意思決定、認知バイアス、物理要因の与える影響について分析する。この分析では避難エージェント・アーキテクチャの三つのレイヤーに対し、次のようなモデルを仮定する。

合理的思考レイヤー 出口から一定距離以内なら「逃げる」($\pi_i(t) = flee$)、そうでなければ「留まる」($\pi_i(t) = drop$) を選ぶ (DST)

認知バイアスレイヤー 避難意思決定モデル (EDM)
物理レイヤー Social Force Model (SFM) [3]

上記三つのレイヤーについて、上で示したモデルを使う/使わないを切り替えることで、 $2^3 = 8$ 通りの構成を試すことにより、各レイヤーのモデルがシミュレーション結果に及ぼす影響を調べる。

ここで、モデルを使わなかった場合に関しては、以下のとおりとする。

合理的思考レイヤー $\pi_i(t) = undecided$ ならば、「逃げる」($\pi_i(t) = flee$) と「留まる」($\pi_i(t) = drop$) をランダムに選ぶ

認知バイアスレイヤー 常に $X = 1$ (リーダー状態) とする

物理レイヤー 認知バイアスレイヤーから与えられた差分ベクトルによって得られる座標を a そのまま出力とする

認知バイアスレイヤーが出力し、物理レイヤーの入力となる差分ベクトルは、 $\pi_i(t) = flee$ であれば現在地から出口への直線距離で 1 ステップ分、それ以外であれば $(0,0)$ である。物理レイヤーに SFM を使用している場合は、このベクトルが *desired vector* として SFM の入力値となる。

さらに、[7]で示した地震避難行動(出口からの距離により行動選択が分かれる)を数値評価するために、以下のエントロピーを定義する。

$$H = -r_d \log_2(r_d) - r_f \log_2(r_f) \quad (6)$$

ただし、 r_d, r_f は、シミュレーション終了時に残ったエージェントのうちその座標が $y > x$ の者の数を N_d 、 $y \leq x$ の者の数を N_f としたときの $r_d = N_d / (N_d +$

$N_f)$ 、 $r_f = N_f / (N_d + N_f)$ である。 H の値が小さいほど図 1 の様になり、大きいほど室内全体に一樣にエージェントが残る。

4. 実験と結果

レイヤー毎のモデル構成を変えた 8 通りに対して、それぞれ 300 回シミュレーションを行った結果の H の分布を図 3 に示す。

- A. EDM と SFM を使用し、合理的思考レイヤーはランダム選択とした場合。室内全体にエージェントが残る場合が大多数だが、低い頻度で図 1 のパターンが現れる。
- B. DST, EDM, SFM の全てを使用した場合。図 1 のパターンがほとんどのケースで観察され、室内全体にエージェントが広がって残ることはほぼない。
- C. EDM のみ使用。合理的思考レイヤーとしてランダム選択、さらに物理レイヤーでは、EDM の出力がそのままエージェントの座標として出力される場合 ([7] で扱われたケースと同じ)。室内全体にエージェントが残る場合が大多数だが、低い頻度で図 1 のパターンが現れる。A の結果とほぼ同じであるが、図 1 のパターン発生頻度が僅かに大きくなっている。
- D. DST と EDM のみ使用し、物理レイヤーに SFM を使用しなかった場合。図 1 のパターンがほとんどのケースで観察され、B の結果とほぼ同じであるが、図 1 のパターン発生頻度はわずかに弱められている。
- E. SFM のみ使用した場合。これはランダム選択と SFM の組合せであり、ほぼ全てのケースでエージェントは室内一樣に散らばっている。EDM が無いため偏りが発生する理由がなく、この結果はトリビアルである。
- F. DST と SFM のみ使用した場合。これは距離による「逃げる」と「留まる」の選択が行われているだけであり、ほぼ全ての結果が図 1 のパターンのみになっている。この結果はトリビアルである。
- G. DST, EDM, SFM の全てが使われなかった場合。これはランダム選択のみが行われている場合であり、当然エージェントは室内に一樣に散らばる。この結果はトリビアルである。
- H. DST のみが使われた場合。距離による「逃げる」と「留まる」の選択のみが行われており、結果は図 1 のパターンのみとなる。この結果はトリビアルである。

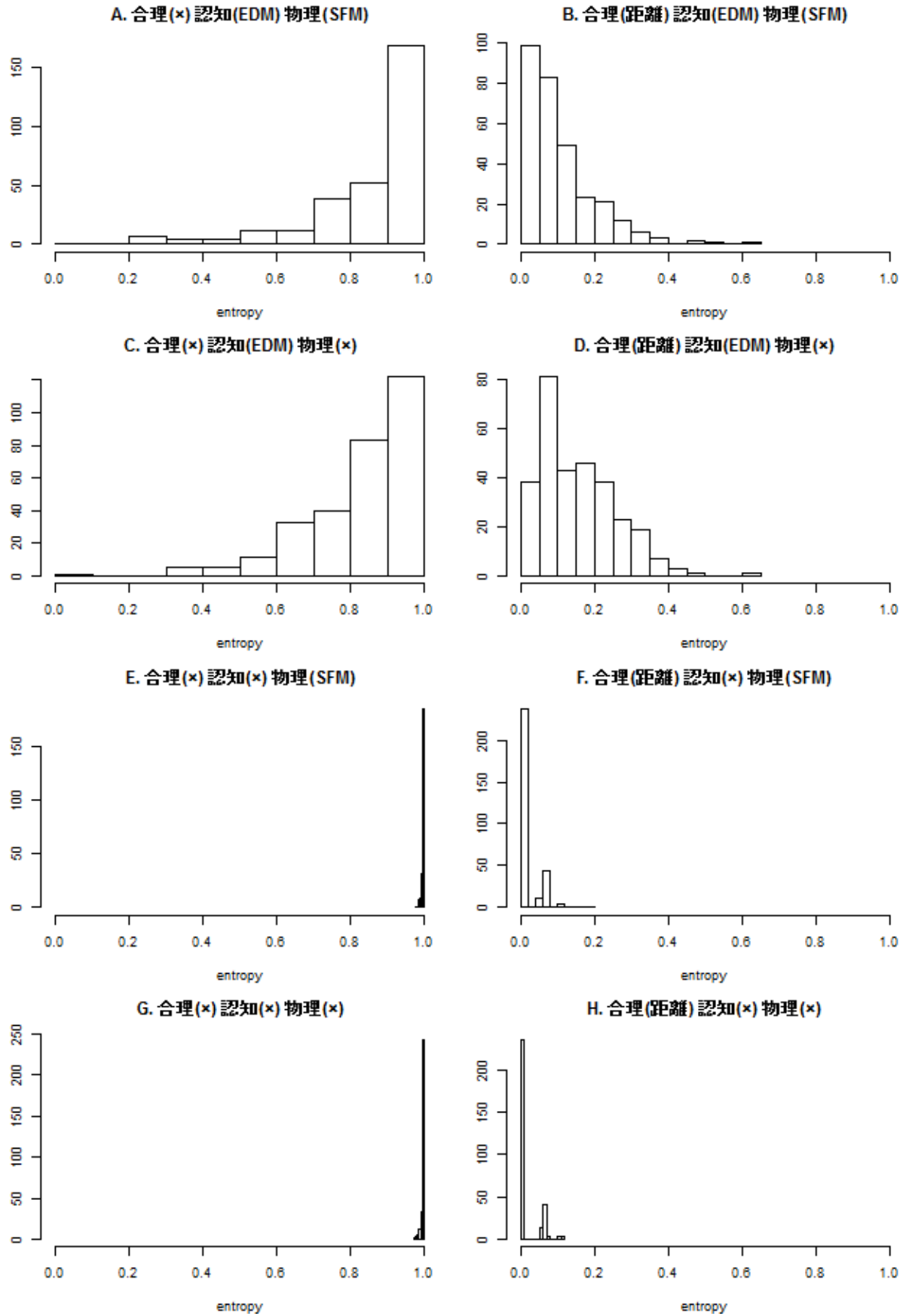


図3 レイヤーの構成毎の H の分布. (x) はそのレイヤーのモデルを使わなかった事を意味する

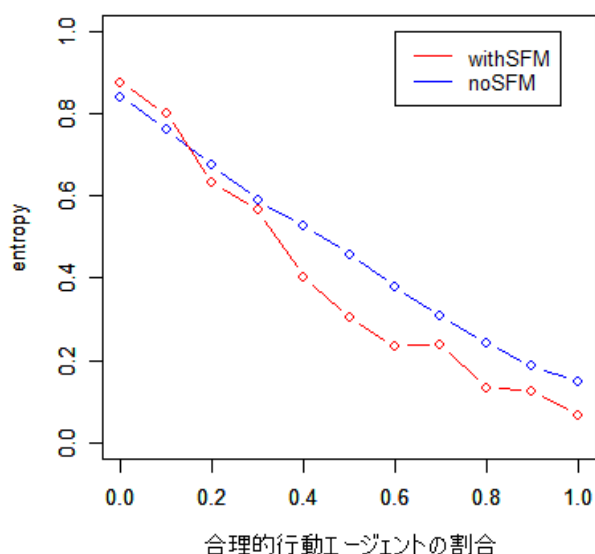


図4 合理的思考レイヤーに従うエージェントの割合を変化させた場合（認知バイアスレイヤーはEDM）

現実には全エージェントが合理的意思決定をしたり、全エージェントがランダムな行動をすることは考えづらく、その両者がある割合で混合しているものと想定することができる。そこで全エージェントのうち、合理的思考レイヤーで指定されたとおり合理的意思決定を行うエージェントの割合を変化させたシミュレーションを行った。すなわちこの割合が1.0であれば想定通り全員が合理的意思決定をするが、0.0の場合は合理的思考レイヤーを使わなかったと同じ行動になる。図4にこの割合を0.1刻みで変えたときの、100回のシミュレーションにおける H の平均値を示した。図の赤線は物理レイヤーとしてSFMを使った場合、青線は物理モデルを使わなかった場合である。

5. 考察

図3より合理的思考レイヤーを使った場合（B, D, F, H）とそうでない場合（A, C, E, G）を比較すると、全てにおいて合理的思考レイヤーを使った場合は H の平均は0.0に近づき、そうでない場合は1.0に近づいている。これは合理的思考レイヤー（DST）が距離による選択で、そうでない場合がランダム選択であるところから当然の結果といえる。

一方、これに認知バイアスレイヤーを加えてみると、認知バイアスレイヤーにEDMを使った場合（A, B, C, D）はそうでない場合（E, F, G, H）に比べて、いずれにおいても H の分散は極端に大きくなっており、合理的思考レイヤーでランダム選択を行ったとし

ても、頻度は少ないが $H = 0.0$ に近い結果が現れていることが分かる。

さらにこれらの結果に物理レイヤーを加えて考えると、物理レイヤーとしてSFMを取り入れた場合（A, B, E, F）はそうでない場合（C, D, G, H）に比べて、より頻度の高い事象がさらに発生しやすくなる傾向がみられる。CよりもAの方が若干ではあるが $H = 1$ の頻度が高くなっており、一方、DよりもBの方が $H = 0$ の頻度が高くなっている。図4を観察してみると、たしかに合理的エージェントの割合が1.0付近では青線が赤線を上回っているが、0.0の付近では逆に赤線が僅かに青線を上回っている。またこの図から、物理レイヤーとしてSFMを使わなかった場合、エントロピー H の変化（青線）は、合理的エージェントの割合に対してほぼ線形なのに対し、SFMを加えた場合のそれ（赤線）は、下に膨らむ非線形の形状を示しており、合理的エージェントの割合と物理要因の間に相関がある可能性を示唆している。

参考文献

- [1] Eric Bonabeau, Guy Theraulaz, and Jean-Louis Deneubourg. Quantitative study of the fixed threshold model for the regulation of division of labour in insect societies. *Proceedings of The Royal Society B*, Vol. 263, No. 1376, pp. 1565–1569, 1996.
- [2] Eric Bonabeau, Guy Theraulaz, and Jean-Louis Deneubourg. Fixed response thresholds and the regulation of division of labor in insect societies. *Bulletin of Mathematical Biology*, Vol. 60, pp. 753–807, 1998.
- [3] Dirk Helbing, Illés Farkas, and Tamas Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, Vol. 407, No. 28, pp. 487–490, 2000.
- [4] Ruggiero Lovreglio, Achille Fonzone, Luigi dell’Olio, and Dino Borri. A study of herding behaviour in exit choice during emergencies based on random utility theory. *Safety Science*, Vol. 82, pp. 421–431, 2016.
- [5] Akira Tsurushima. Modeling herd behavior caused by evacuation decision making using response threshold. In P. Davidsson and H. Verhagen, editors, *Multi-Agent-Based Simulation XIX. MABS2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 11463*, pp. 138–152. Springer, 2019.
- [6] Akira. Tsurushima. Reproducing symmetry breaking in exit choice under emergency evacuation situation using response threshold model. In *Proceedings of the 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence - Volume 1: ICAART*, pp. 31–41. INSTICC, SciTePress, 2019.
- [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. 日本認知科学会第35回大会発表論文集, 2018.
- [8] 鶴島彰. 避難意思決定モデルと social force model の統合 - 出口選択の symmetry breaking に与える影響 -. 情報処理学会第81回全国大会論文集, 2019.