

地震避難における意思決定の同調行動による再現 Simulating Earthquake Evacuation Decisions based on Herd Behavior

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

近年、認知バイアスの一つである同調行動が避難行動に与える影響が指摘され、注目を集めている。東日本大震災の際、仙台のホテルの会議室で撮影された動画において、避難者による、逃走と退避という避難行動の選択が、出口からの距離によって分かれる現象が観察された。我々は、避難行動における同調行動を表現した、生物学の反応閾値モデルに基づいた避難意思決定モデルを使ったエージェントシミュレーションにより、この動画で見られたような現象の再現を試みた。シミュレーションにおいて、エージェントは逃走と退避をランダムに選択しているにも関わらず、動画のように、逃走と退避が出口からの距離で分かれる現象が創発した。

キーワード：同調行動、認知バイアス、避難行動、反応閾値モデル、意思決定

1. はじめに

災害避難における人間行動研究の困難な点のひとつに、資料入手の難しさが挙げられる。実際の避難状況において直接的なデータ収集は不可能に近く、これまでは被災者への事後的なアンケート [4] や統制環境における心理実験 [12] などにより代替する方法が採られてきた。しかし、前者は調査対象者の主観や記憶への依存、生存者しか対象になり得ないためサンプルに偏りが生じることなど、後者は現実の避難状況を再現するような実験環境構築の困難さや、統制された実験環境が切迫した避難状況をどれだけ再現できているかが評価できないことなど、いずれも手法としての限界があった。

近年、スマートフォンや SNS 等の普及により、災害時の映像資料が蓄積されるようになり、研究資料としての利用可能性にも目が向けられるようになってきた。しかし、限界状況での撮影や未熟な撮影技術のため、研究資料としての価値は必ずしも高いとはいいき

れない。そんな中で、東日本大震災のときに仙台市内のホテルの会議室で撮影された次の URL で示す動画

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



は、以下の点で貴重な資料だといえる。

- 地震の始まりから終わりまでがワンカットに収められている。
- 地震開始時点の人数や人々の位置が明確である。
- 冷静な撮影技術により人々の行動を追いやすい。

この動画中の 48 人の行動をひとりひとり追跡することにより、地震発生時から、動画に記録された 98 秒後までの集団の行動を理解可能な形で整理した。

本稿ではまず、この動画に映っている人々の地震発生時の行動について分析する。この分析により、災害時の行動に影響する認知バイアスである集団同調性バイアスあるいは同調行動 (Herd Behavior) [4, 5, 6, 9] の影響が動画中の人々にも見られることを確認する。

次に、我々が避難行動における同調行動のモデルとして開発している、避難意思決定モデル [11] について紹介する。避難意思決定モデルについては、先に述べた理由により、モデルを経験的に検証することは現実的には非常に困難であった。そこで我々は、避難現場において発生する特徴的な現象を、避難意思決定モデルを使って再現し、これを繰り返すことでモデル検証作業とすることを考えている。例えばこれまで、避難現場での出口選択における対称性の破れ現象 (一方の出口にのみ人が集中する現象) などこのモデルにより再現することを試みている。今回は、東日本大震災のときに撮影された動画中で観察される、人々が出口からの距離に基づいて二つの行動を選択しているように見える現象が、避難意思決定モデルによって再現可

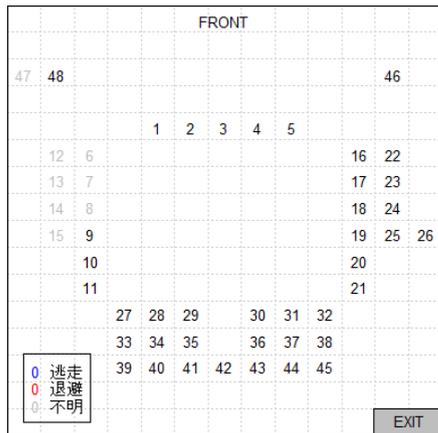


図 1: 地震前の人物配置

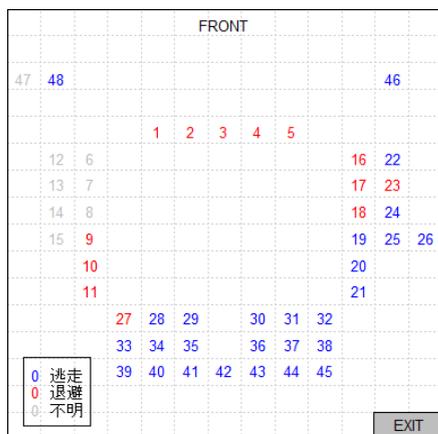


図 2: 98 秒後の各人の行動

能であることを示す。そしてこの現象が距離による意思決定ではなく、同調行動による創発現象としても一般的に説明可能であることを示す。

2. 動画の分析

図 1 は、地震開始時の室内での 48 人の位置を示している。会議室はほぼ正方形に近く、上が部屋の正面で、右下隅に部屋の出口がある。48 人は中央の空間を囲むようにして向き合って座っている。図 3 下部のチャートは、地震が始まってから室内の照明が消えてしまうまでの 98 秒間の人々の行動を示したものである。個々の人物を縦軸に、地震が始まってからの時間経過を横軸に示し、各人物の行動を記録している。地震開始時には登壇者を除く全ての人物が椅子に座って（着座）おり、その後地震が発生し、様々な行動に移る。図の緑の丸は、椅子から立ち上がった状態（立上り）を示す。青丸は、その人物が初期位置から出口に向かって移動している状態（逃走）を示す。さらに赤丸は、初期位置のまま机の下に身を隠している状態（退避）を示している。椅子から立ち上がって即座に

逃走または退避に移った場合は、立上りの状態は認めず、着座から直接、逃走か退避に移ったものとする。本稿では、逃走と退避のふたつを地震における避難行動としている。さらに、薄い灰色の丸で示された人物は、動画からは状態が追えなかった人物である。

図 3 上部のチャートは、着座、立上り、逃走、退避の各行動が切り替わったタイミングをヒストグラムにしたものである。この図を見ると、48 人が行動を切り替えるタイミングは、地震の期間中に均等に分散しているのではなく、いくつかの特定のタイミングに偏在していることが読み取れる。特に着座の状態から初めて他の行動に移るタイミングは、殆どが地震開始後 30 秒以内に集中しているが、中には 70 秒以上着座を続けてから初めて他の行動に移る人物もあり、避難開始のタイミングは非常に多様であることが分かる。このように避難者が行動を切り替えるタイミングが時間軸上に偏在することから、動画中の人物の間に、他人の行動に基づいて自分の行動を決める「同調」が働いている可能性が示唆される。

ただし、火災などと違って地震のケースでは、危険が漸増的に拡大するのではなく、強い揺れが不定期に繰り返される事がある。この動画の場合も、開始から 19 秒後と 60 秒後に強い揺れが発生している。このような要因も、行動のタイミングが時間的に偏在する原因のひとつであることは明らかであり、タイミングの偏在が同調行動のみに起因するとは言えないことに注意しなければならない。

図 2 は、地震開始から 98 秒後の状態を示したもので、図 1 の初期配置の人々が、最終的にどのような行動を採ったかを示している。図の青で示された人物は逃走を、赤で示された人物は退避を選択していた。図 2 を見ると、青と赤の境界が部屋を斜めに区切っているように見える。つまり右下の出口から一定の距離以内にいた人は逃走を選択し、その距離以上の場所にいた人は退避を選択している。このことから、人は逃走と退避の選択を、部屋の出口（図の右下）からの距離によって意思決定していると想定することができる。

一方、図 2 の状況を行動選択の空間的な偏在としてみると、上で述べた時間的な偏在も考慮に入れて、これが同調行動に起因する現象とも考えることができる。ここで次のような仮説を設定する。人々は逃走と退避をランダムに選択しているにすぎないが、災害避難時に働く同調行動の結果として、図 2 に見られるような境界が自然に現れ、あたかも個人が出口からの距離で意思決定をしているように見せかけている。

以下の節では、この仮説が一般的に成り立つこと

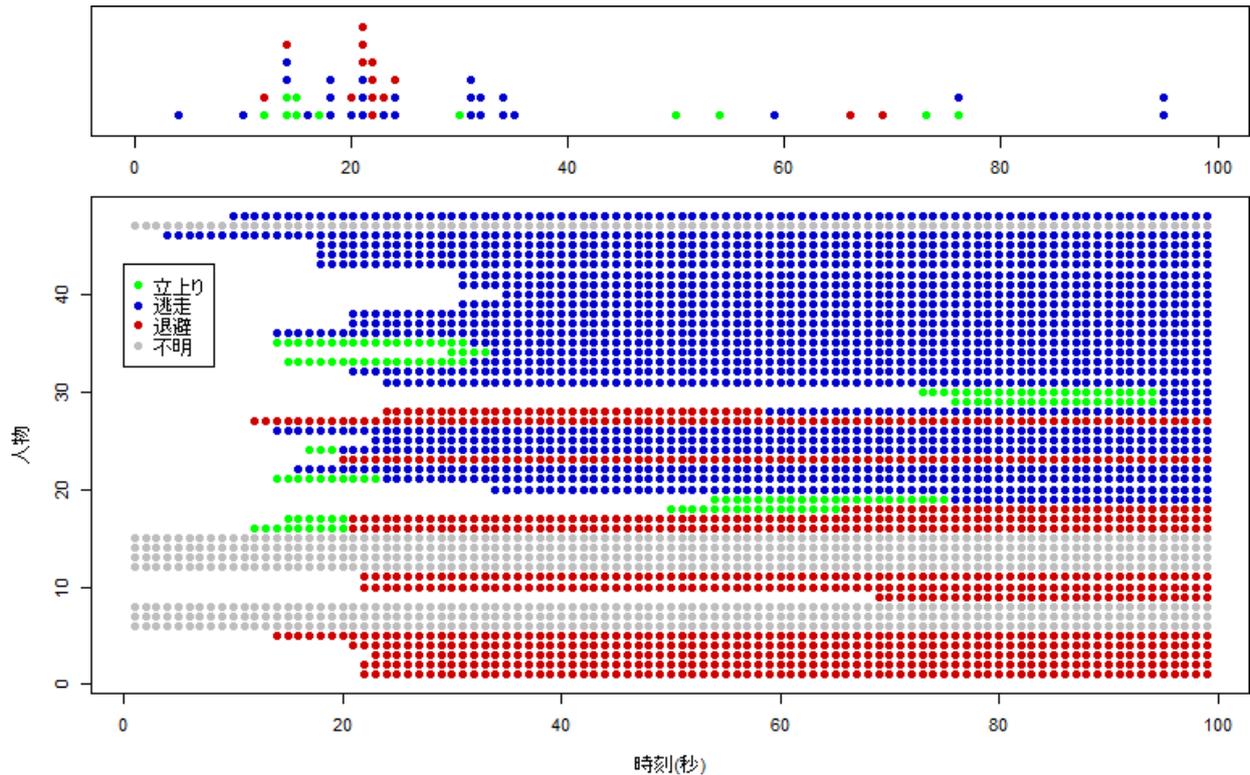


図 3: 個人別行動タイムチャート

を、同調行動のモデルである避難意思決定モデルを使ったエージェントシミュレーションにより確認する。

3. 避難意思決定モデル

避難意思決定モデルは、集団の同調行動を表現したもので、生物学の反応閾値モデル [2, 3] をベースにしている。反応閾値モデルとは、真社会性生物の分業を表す分散アルゴリズムで、各個体は、それぞれが有する反応閾値と呼ばれるランダムな値と、環境から受け取る刺激によって、タスクに携わる確率を動的に切り替える。この操作により、大域的な制御構造なしでも、コロニー全体で見ると常に必要なタスクに適切な個体数を割り当てることができる。このタスクに携わる確率を、リーダー、フォロワーと呼ぶ二つの心的状態を切り替える確率とみなしたものが避難意思決定モデルである。

Raafat らは、同調行動を”the alignment of thoughts or behaviours of individuals in a group (herd) through local interactions rather than centralized coordination” と定義した [10]。この定義によれば、同調は大域的な制御構造を排した、あくまで局所的な相互作用のみに基づいて生み出される現象であり、さらに同調が集団行動として発現するためには、少なくとも自分自身の意思で行動する個体と、他人の行動に基づい

て行動する個体の二種類の混合が必要であることがいえる。なぜなら前者のみでは、行動は発生してもそこに同調は存在せず、後者のみではどんな行動も発生しないからだ。ここでは前者をリーダー、後者をフォロワーと呼ぶことにする。すなわち同調行動のモデルとは、集団内のリーダーとフォロワーの混合のダイナミクスを、大域的な制御構造に頼らずに実現する機能を内包すると考えることができ、反応閾値モデルはこの条件に極めて巧く適合すると考えられる。

エージェント i は心的状態を表す確率変数 X とランダムな反応閾値 θ_i を持つ。エージェントは $X = 1$ のときリーダーとして意図的に行動するが、 $X = 0$ のときはフォロワーとなり他者の行動をベースに自分の行動を決める。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。

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

ただし、 g はシグモイド関数の曲率で、 μ_i はエージェントのリスク感受性を表しており、 θ_i 同様個体ごとにランダムな値が与えられている。

反応閾値モデルでは、コロニー全体の個体数に対する、タスクに従事している個体数の比率によりタスクの進捗を判断しているが、避難意思決定モデルではこのような大域的な情報は扱わず、各個体は自分の周辺の情報のみからタスク進捗を推定すると考える。具体的には、エージェントは近傍の人数が多ければタスクの進捗度合いは低く、少なければ進捗度合いは高いと考え、以下の関数の F によりタスク進捗を推定する。

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

ただし、 n は近傍のエージェント数、 N_{max} は近傍の最大エージェント数を表す固定値とする。また、近傍とはエージェントの進行方向に対して 120 度かつ 5 グリッドの範囲としている。

エージェントが $X = 1$ 、 $X = 0$ を採った時の具体的な行動内容は、問題ごとに定めるべきとの考えから特に規定しておらず、モデルの利用者に委ねられている。

4. シミュレーション

本説では、2. 節の動画に記録された、逃走と退避の選択が出口からの距離によって決まるように見える現象の、避難意思決定モデルによる再現を試みる。ここで示すシミュレーションは、動画の状況そのままの再現を目的としたものではなく、エージェントがランダムに選択を行ったとしても、同調行動により出口からの距離で二つの選択が分離するという現象が、一般的に起こりうることを確認するためのものである。

シミュレーションが始まると、環境リスクは $r = 0$ からスタートし 1 タイムステップにつき 0.5 の割合で単調に増加する。また、環境の刺激値も、 $s_0 = 0$ から 1 タイムステップに δ ずつ増加 (初期は $F \approx 0$ だから) するので、各エージェントの $P_i(X = 0 \rightarrow X = 1)$ は、それぞれの反応閾値に応じて増加し、リーダーとなる

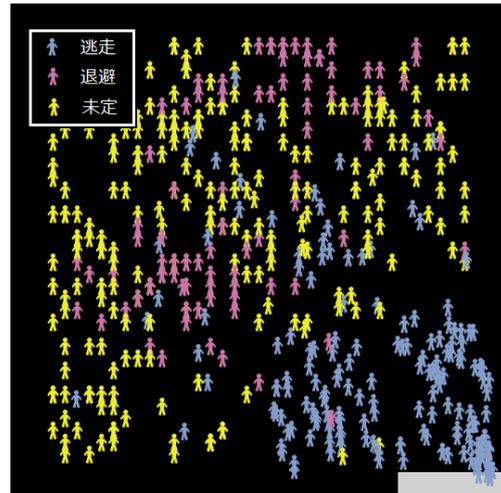


図 4: シミュレーションの例 (途中)

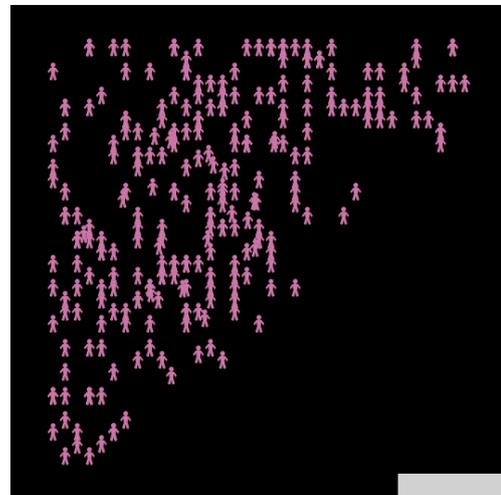


図 5: シミュレーションの例 (終了時)

エージェントが出現する。さらにそれに伴ってフォロワーがリーダーの行動に同調する。シミュレーション終了時には、全てのエージェントが逃走もしくは退避のいずれかの行動を採り定常状態となる。

図 4 は、右下に出口 (灰色の部分) のある、左下を原点として、 x 方向に 40 グリッド、 y 方向に 40 グリッドの正方形の部屋における、500 人のエージェントによるシミュレーションの一例である。

図 4 はシミュレーション途中のもので、青のエージェントは逃走行動を採ったもの、赤のエージェントは退避行動を採ったもの、黄色のエージェントは未だ行動が未定のものを表している。図 5 は、シミュレーション終了時のもので、退避行動を採ったエージェントが、出口から遠い区画に三角形に取り残されている。

このシミュレーションにおける $X = 1$ (リーダー)

Algorithm 1 リーダーの行動 ($X = 1$)

```

if 現在の行動が未定である then
  確率 0.5 で逃走か退避のどちらかを選び現在の行動とする
end if
if 現在の行動が逃走である then
  出口に向かって 1 ステップ移動する
else
  その場にとどまる
end if

```

Algorithm 2 フォロワーの行動 ($X = 0$)

```

N0 : 近傍の個体の中で行動が未定のもの数
N1 : 近傍の個体の中で行動が逃走のもの数
N2 : 近傍の個体の中で行動が退避のもの数
max(N0, N1, N2) の行動と同じ行動を採る
if 現在の行動が逃走である then
  出口に向かって 1 ステップ移動する
else
  その場にとどまる
end if

```

の行動は、Algorithm 1 であり、 $X = 0$ (フォロワー) の行動は、Algorithm 2 である。また、逃走を選んだエージェントは、右下の出口に向かって移動するが、未定と退避のエージェントは移動しないでその場に待機する。シミュレーションの初期状態は、全てのエージェントが行動未定の状態である。シミュレーションの結果から、エージェントは逃走と退避をランダムに選択しているにも関わらず、二つの行動がほぼ対角線で分かれている事が示されている。

ここで、シミュレーション終了時に部屋に残った N 人のエージェントの集合を $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ とし、 $a_i \in A$ の座標を x_i, y_i とする。二つの集合 $U \oplus L = A$ 、ただし $U = \{a_i | x_i \leq y_i\}$ かつ $L = \{a_i | x_i > y_i\}$ 、を考えたとき、 $d = |U| - |L|$ は、室内に残されたエージェントを対角線 $y = x$ で区切ったときの、上下の人数差を表す。

図 6 は、このシミュレーションを 1000 回行った時の d 値のヒストグラムである。赤のバーは避難意思決定モデルを使ったシミュレーション結果の d 値を、青のバーはベンチマークとして、全員がランダムに行動を選んだとき (全員に Algorithm 1 を適用した場合) のシミュレーション結果の d 値を表している。図から、避難意思決定モデルを使った場合は、大部分のシミュレーションにおいて対角線よりも上の領域に多

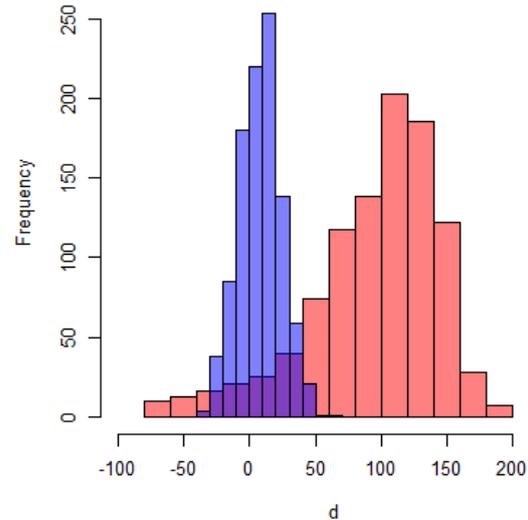


図 6: 対角線の上下での人数差 (d) のヒストグラム。避難意思決定モデル (赤)、ランダムに行動を選ぶ (青)

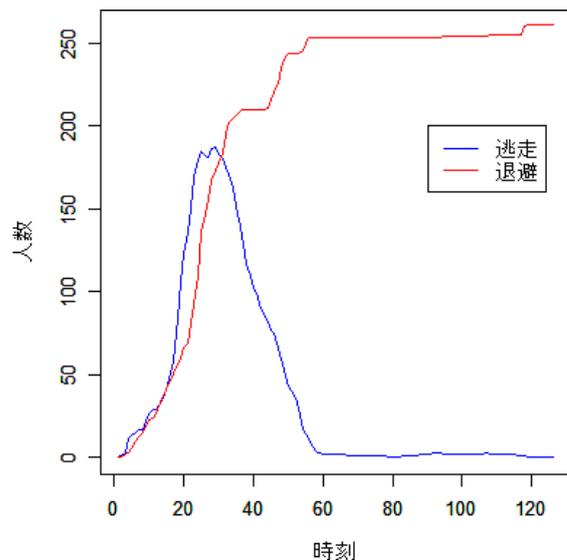


図 7: 逃走と退避の人数

くのエージェントが残されている事を示している。これらの結果から、会議室の動画に見られるような行動は、(出口からの距離による意思決定ではなく) 避難における同調現象の結果としても説明可能といえる。

最後に本シミュレーションで使ったパラメータは、 $\theta, \mu \sim U(0, 100)$ 、 $\epsilon = 0.2$ 、 $\delta = 0.5$ 、 $\alpha = 1.2$ 、 $g = 1.0$ 、 $N_{max} = 10$ である。

5. 分析

図 7 は、図 4、5 のシミュレーション中の、逃走エージェント数 (青線) と退避エージェント数 (赤線) の時間変化を表したものである。退避エージェント数

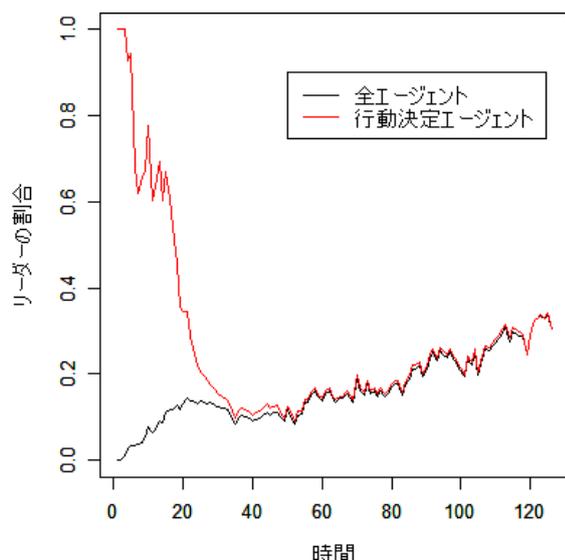


図 8: 室内全エージェントと行動決定済みエージェントに対するリーダーの割合

は時間とともに累積的に増加するが、逃走エージェント数が途中から減少に転じているのは、逃走の結果室外に出てしまったエージェントを減じたことによる。

図 8 は、エージェント数に対するリーダーの割合を示している。図の黒線は室内の全エージェント数に対するリーダーの割合を、赤線は既に行動を決定した（未定ではない）エージェント数に対するリーダーの割合を示す。リーダーには、逃走行動を採っているものと、退避行動を採っているものの両者が含まれる。

この図から室内の全エージェントに対するリーダーの割合は、時間とともに増加傾向にあるが、行動を決定した（未定でない）エージェントに対するリーダーの割合は、初期の 1.0 から、一度大きく低下して、全エージェントに対するリーダーの割合と重なり、その後一緒に上昇していく事が分かる。これはシミュレーション初期には、（リーダーの定義から）行動決定できるエージェントはリーダーのみであり、その後フォロワーが増えるとともにリーダーの割合は一旦大きく低下するが、さらにシミュレーションが進むにつれて行動未定のエージェントがいなくなり、室内の全エージェントは行動決定済みとなり、二つの割合が同じになるからである。

エージェントがどこまでを自分の近傍、すなわち同調現象の影響範囲と認識するかは、同調行動の結果に大きな影響を与える要因である。ここでは、エージェントの近傍を規定する半径と、シミュレーション結果である対角線上下での人数差 (d) の関係について調べる。図 9 は、近傍の半径を 1, 2, 5, 10, 15, 20 グリッ

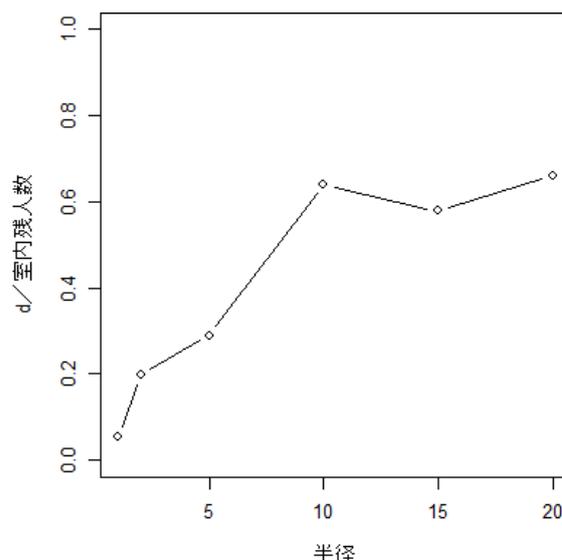


図 9: 近傍の半径と室内残存人数あたりの対角線上下での人数差 (d /室内残人数)

表 1: 近傍半径を変えたシミュレーションの結果 (50 回の平均値)

半径	室内残人数	d	上側人数	下側人数
1	275.6	14.9	145.2	120.4
2	274.0	54.4	164.2	109.8
5	317.3	91.9	204.6	112.7
10	186.3	119.3	152.8	33.5
15	136.4	78.9	107.6	28.7
20	66.4	43.9	55.2	11.2

ドと変化させ、それぞれ 50 回ずつシミュレーションを行った時の、シミュレーション終了時に室内に残ったエージェント数に対する d 値の割合を示したものである。ここで、単純に d 値ではなく、室内に残ったエージェント数あたりの d 値を使った理由は、近傍の大きさはそれ自体で同調現象に大きな影響があり終了時の室内残存人数が大きく変わってしまうため、単純に d 値のみでは比較ができないからである。例えば、半径が 5 グリッド以下のときは最終的に 300 前後のエージェントが部屋に残るが、半径が 20 グリッドになると部屋に残るエージェント数は 100 以下になってしまう。図 9 を見ると、この事を考慮に入れても、近傍を規定する半径の大きさと対角線上下での人数差には、強い相関関係がある事が分かる。なお、このときの詳細なシミュレーション結果を表 1 にまとめた。

6. 考察

我々は避難行動における認知バイアスのひとつである、同調行動の影響を表現する避難意思決定モデルを開発してきた。本稿では、東日本大震災において記録された映像内で観察された避難行動が、避難意思決定モデルによって再現できることを確認した。本稿で採用した映像情報は、無数にある避難状況のひとつを示したものに過ぎず、一般性も未検証であり、この例だけでは避難意思決定モデルの検証作業としては十分なものとは言えない。本稿とは別に、避難者からの報告に基づいた定性的な知識を避難意思決定モデルで再現する試みも行っている。その一例として、複数出口のある避難状況での出口選択における対称性の破れ現象 [5, 6, 7, 1, 8] があり、我々は検証作業のひとつとしてこの現象の再現にも別途取り組んでいる。

避難状況という客観データに乏しい分野では、十分なモデルの検証作業は難しい。一般性や客観性にやや難はあっても、稀少なデータをひとつひとつ取り上げては丁寧に確認していくという地道な努力が重要だと考えている。

7. 結論

東日本大震災の際に撮影された動画の分析において、避難者の逃走と退避の行動選択が、出口からの距離によって分離する現象が観察された。避難行動における同調行動を表現した避難意思決定モデルにより、この現象の再現が可能である。この現象は、出口からの距離に基づく意思決定という解釈以外に、同調行動による、避難者の行動選択の空間的な創発現象としても解釈することができる。

参考文献

- [1] E. Altshuler, O. Ramos, Y. Nunez, J. Fernandez, A. J. Batista-Leyva, and C. Noda. Symmetry breaking in escaping ants. *The American Naturalist*, Vol. 166, No. 6, pp. 643–649, 2005.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Susan Cutter and Kent Barnes. Evacuation behavior and Three Mile island. *Disasters*, Vol. 6, No. 2, pp. 116–124, 1982.
- [5] Dominic Elliott and Denis Smith. Football stadia disasters in the United Kingdom: learning from tragedy? *Industrial and Environmental Crisis Quarterly*, Vol. 7, No. 3, pp. 205–228, 1993.
- [6] Dirk Helbing, Illes J. Farkas, Peter Molnar, and Tamas Vicsek. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Vol. 21, No. 2, pp. 21–58, 2002.
- [7] Dirk Helbing, Illes Farkas, and Tamas Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, Vol. 407, No. 28, pp. 487–490, 2000.
- [8] Q. Ji, C. Xin, S.X. Tang, and J.P. Huang. Symmetry associated with symmetry break: revisiting ants and humans escaping from multiple-exit rooms. *Physica A*, 2017.
- [9] Anthony R. Mawson. Understanding mass panic and other collective responses to threat and disaster. *Psychiatry*, Vol. 68, No. 2, pp. 95–113, 2005.
- [10] Ramsey M. Raafat, Nick Chater, and Chris Frith. Herding in humans. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 13, No. 10, pp. 420–428, 2009.
- [11] Akira Tsurushima. Modeling herd behavior caused by evacuation decision making using response threshold. In *AAMAS2018/MABS2018 workshop proceedings (to appear)*, Stockholm, Sweden, 2018.
- [12] 弘忠広瀬, 伸吉杉森. 正常性バイアスの実験的検討. 東京女子大学心理学紀要, 創刊号, pp. 81–86, 2005.