

# 群衆避難行動モデル：人間の内部に立ち入らないアプローチの可能性 Modeling Crowd Evacuation Behavior: New Approach without Assuming Internal Model of Human

鶴島 彰

Akira Tsurushima

セコム株式会社 IS 研究所

Intelligent Systems Laboratory, SECOM CO., LTD.

a-tsurushima@secom.co.jp

## 概要

災害避難に関する研究が活発に行われており、研究者毎に様々なモデルが開発され提案されているが、一部を除いて、この分野で共通に使われるモデルは見当たらず、分析結果も使用したモデルに依存する傾向が見られる。この大きな原因は、災害避難に関する客観データの不足にあると思われる。我々は避難時の同調行動のモデル化である避難意思決定モデルを提唱し、様々な現象について分析を行ってきたが、モデルを拡張するにあたり、この客観データの不足が大きな困難となってきた。そこで新しいアプローチとして、あえて認知の内部構造には立ち入らず、より低次のモデルである生物行動モデルと高次のモデルである高次認知モデルの二つの代替モデルを考え、これら二つで上下から挟み撃ちすることにより、人間行動のモデルに近づけていくという可能性について考えてみた。ここでは客観的定量データが利用できる二つの避難事例を紹介し、これらを使った方法について考察を行った。

キーワード：避難シミュレーション、モデリング、避難意思決定モデル

## 1. はじめに

近年、災害避難に関する研究が活発に行われており [1, 2]、そのいくつかの成果は新しい避難プロトコルの提案などとして実社会にも還元されている。これらのアプローチの中心となるのは、災害時の人間行動を模倣したエージェント・モデルによるマルチエージェント・シミュレーションである。しかしその実情は、それぞれの研究毎に独自のエージェント・モデルが開発されており、研究結果もそれぞれのモデルに依存する部分があり、分野としての共通認識が得られているとは言えない状況にある。Helbing により開発されたソーシャルフォース・モデル [3] は、もっとも広く使われている例外的なものであるが、これはエージェントに影響する様々な環境要因を仮想的な「力」と見做すこ

とで集団の力学を表現し、現実の群衆避難で見られる様々な現象の再現に成功している。しかし、その内容はニュートンの方程式であり、様々な心理要因を仮想的な力にたとえてモデルに組み込む努力は見られるものの、本質的には物理モデルに他ならず、避難状況に現れる人間の自律的な意思決定を表現しているとは言いがたい。

多数の研究が重ねられているにも関わらず、避難研究における最大の障害は、客観データがほとんど得られないことにある。この分野で積み重ねられた多くの知見は、研究室室内での実験や被災者の証言やサーベイ、あるいは現実の避難の映像情報などからなり、いずれにしるほとんどが逸話的 (anecdotal) なものであり、客観的な検証に耐えられるものは少ない。この事実は災害状況における人間行動モデルの検証の難しさにつながり、この分野の研究者が共通に受け入れられるモデルが現れない大きな理由と思われる。このような状況におけるひとつの可能性として、本稿では、個々の人間の内部モデルを仮定せず（あるいは最小限の仮定により）、集団の挙動を表現するというアプローチの可能性について議論してみたい。

## 2. 生物行動モデルと高度認知モデル

我々は群衆避難における同調行動のモデルとして避難意思決定モデル [4] を提案し、現実のビデオ動画を使ったモデル検証 [6] を行い、このモデルを使うことで、出口選択における対称性の破綻 [5] や、地震避難における Flee/Drop 行動の空間分布 [8] などの分析を行ってきた。避難意思決定モデルは、生物学の反応閾値モデル [10] に基づいたもので、Gilbert によるエージェント・モデルの分類 [11] である、抽象モデル、中間モデル、ファクシミリモデルにおいては抽象モデルに分類される単純なものである。避難意思決定モデルは意識的な避難行動 ( $X = 1$ ) と無意識的な避難行動 ( $X = 0$ ) がある確率で切り替わるという構造である

が、これまでの研究では、あえて人間の高度認知機能には立ち入らず、意識的な避難行動としてランダム選択を、無意識的な避難行動として同調行動を採用してきた。ランダム選択と同調行動は多くの生物が共通で持っている避難行動で、これまでの分析は、これら二つの行動のみで人間の行動を表現しようとした、いわば人間の認知能力を過小評価したモデルであり、人間のモデルというよりもむしろアリなどの生物行動のモデルに近いものであろう。

一方、人間の高度認知が避難行動に影響することもまた事実であり、人間は避難に関する情報や知識を状況に当てはめて使用したり、最短経路を選んで避難するといった合理的な行動を採ることもできる。ところが、特に避難状況のような切迫した状況においては、人間が常に合理的な行動を採れるとは限らず、そもそも避難に必要な情報を持っていなかったり、認知バイアスの意思決定への影響などで合理的な行動が採れない場合がありうる。さらには避難に必要な情報や知識を持っていた場合でも、それらの知識を状況に当てはめて使うことが出来ないという報告 [12, 13] もある。これらの理由から、合理的意思決定を仮定した高度認知モデルは人間の認知能力を過大評価したものであり、現実的な人間行動を表したモデルとしてはやはり問題があるといえる。以上から現実的な人間行動モデルは、生物行動モデルと高度認知モデルの中間のどこかに存在すると考えることができる。

### 3. 単純なモデルと複雑なモデル

避難行動のモデル化において考慮される要因には非常に多彩なものが含まれるが [14]、実際のモデル化では一部の要因のみを採り上げた単純なものか、多様な要因を組み入れた複雑なもの [15] かに二分される傾向がある。前者は分析はしやすいが現実の記述力に欠け、後者は現実の記述には強いが結果は事例に強く依存し、分析も困難である。特に後者のアプローチでは、研究者毎に非常に多様な要因がモデルに導入される傾向がある。たとえば、歩行速度、転倒の割合、年齢や性別による規制の順守度、ソーシャル・インタラクション、他の避難者への援助、文化や類似度によるグルーピングの傾向、認知要因や感情要因がグループ意思決定に及ぼす影響などである [20]。このような要因は研究者毎に恣意的に組み上げられる傾向が強いことから、結果の分析や解釈が不透明なものになりやすい。多彩な要因が恣意的に組み上げられるのは、これまで述べてきた客観データの不足により、災害避難という特異な状況における人間行動が殆ど分かってお

らず、人間の内部モデルを組み立てる基準がほぼ無いことが原因と思われる。この問題が早急に解決するとは考えにくい。

### 4. 新しいアプローチ

そこで本稿では、この問題に対する別の角度からのアプローチとして、人間の内部モデルを仮定することを諦め、前に述べた生物行動モデルと高度認知モデルを代理モデルとして使うことを考えてみたい。イメージとしては生物行動モデルを人間の認知能力を過小評価したモデル、高度認知モデルを過大評価したモデルと考え、人間行動をブラックボックスとしたまま、ふたつの代理モデルで上と下から挟み撃ちする感じである。ふたつの代理モデルが分析可能な単純なものであれば、ブラックボックスの上界と下界を観察することはおそらく可能であり、これらの境界を狭めていくことにより観察可能な部分を少しずつ増やしていくことができるかもしれない。

以下二つのケーススタディを検討することによって、上で述べたアイデアについて検討してみたい。

### 5. 事例 1：東日本大震災

我々は東日本大震災において撮影された動画 [21] の分析により明らかになった 48 人の避難行動の再現と分析を避難意思決定モデル [4] を使って行い、避難者の視界が避難行動に与える影響についての仮説を提唱した [6, 7, 8, 9]。

この分析において我々は、避難者の Flee/Drop 行動が出口からの距離によって分かれる現象について次の二つの作業仮説を立てた。

1. 個々の避難者が出口からの距離に基づいて個別に Flee/Drop 行動を選択する。
2. 個々の避難者は Flee/Drop をランダムに選択するに過ぎないが、避難者間に働く同調行動が対角空間パターンを創発させる。

我々は上記 2 に基づいて分析を行ったが、この仮説はランダム選択と同調行動という多くの生物に共通する低レベルの認知機能のみに基づく生物行動モデルである。一方、上記 1 についてはトリビアルであるとして以降の分析から除外し、何の検討も行わなかった。

上記 1 の行動は、出口までの距離の推定や、距離に基づいて避難行動を選択するルールの保持と、ルールを現状に当てはめて避難方法を演繹する手続きなど、人間ならではの高度の認知機能を必要とする高度認知モデルであると見立てることが可能である。

## 6. 事例 2：河北省唐山地震

群衆避難における同調行動の影響は、この分野において最も活発に研究されているテーマの一つで、とりわけ出口選択や避難経路選択などの避難意思決定における同調行動の影響は重要なテーマである。避難行動中の出口選択における対称性破綻現象は、群衆避難における人間の非合理的な行動が現れた興味深い現象として有名であり、これまで多くの研究者により研究されてきた [17, 18]。しかし避難時の対称性破綻現象に関する客観データはほとんどなく、その多くは避難者の言説によるものや、アリなどを使った動物実験、あるいはコンピューター・シミュレーションなどにより保証されてきたにすぎず、人間を使った実験による経験的な研究者からは否定的な結論も出されてきた。たとえば、Haghani et al. (2019) は、人間の被験者を使った避難実験の結果から、アリなどの動物実験の結果とは違い、人間の避難者は避難選択において非対称が生じれば、空いている方を選ぶため、避難選択における同調行動 (対称性破綻現象) は発生しないとしている [19]。

2012年5月28日10時22分、中国河北省唐山市で発生したマグニチュード4.8の地震における、Middle School of Tangshan Yucaiでの授業中の教室から35人の生徒が避難する映像を分析した研究は、出口選択における対称性破綻現象を記録した貴重な映像資料である [16]。この分析において、前と後ろに出口のある教室から避難した生徒たちは、12人が前の出口を選び、23人が後ろの出口を選んでいる。この現象を、等確率で二つの出口が選ばれる35回の繰り返しベルヌーイ事象と考えると、二項分布  $X \sim B(n=35, p=0.5)$  として表される。この時、12人が前の扉を選んだことから、累積分布関数  $F(12) = P(X \leq 12) = 0.045$  により発生確率5%以下の現象となり、これは偶然発生した事とは考えにくい。この現象を生物行動モデルと高度認知モデルを使って再現することを試みる。

## 7. 新しいアプローチの可能性

5., 6. 節で示した二つの事例は、現実に発生した災害避難を記録した映像分析による客観データが利用できる。前者は Flee/Drop 行動の選択の空間パターンについて、後者は前後二つの扉を利用した避難の非対称性についての定量データが分析から得られている。これらの事例データに対して、避難意思決定モデルを適用することにより、避難者が行った避難意思決定について次の二点から分析が可能と思われる。

### 1. 事例で得られた客観データの再現

### 2. 生物行動モデルと高度認知モデル適用による分析

1. は避難意思決定モデルの検証が主な目的だが、2. によって避難意思決定モデルに組み込まれる意識的な避難行動 ( $X = 1$ ) を低レベル認知を仮定したものと、高レベル認知を仮定したもので比較することにより、モデルの説明力の何が変化したかを観察・分析することにより、二つの認知レベルの間にあると考えられる人間の避難行動を表した真のモデルに対する示唆を得ることができるだろう。

どちらの事例においても、避難意思決定モデルの無意識的な避難行動 ( $X = 0$ ) は、これまでどおり同調行動を採用するつもりだが、意識的行動については次のように考えている。

### 事例 1

事例 1 の先行研究では二つの作業仮説、1. 出口からの距離によって Flee/Drop 行動を選択する、2. ランダムに Flee/Drop 行動を選択するが同調行動により空間パターンが創発することを仮定し、 $X = 1$  としてランダム選択を組み込んだシミュレーションにより 2. が成り立つことを示した。ここでは、 $X = 1$  として距離により Flee/Drop を切り替える行動 (扉からの距離が  $\delta$  以下であれば Flee を、 $\delta$  以上であれば Drop を選択するというルール) を避難意思決定モデルに組み込むことにより、シミュレーション結果がどう変わるかについて分析する。ここで、エージェントが常に意識的避難行動しか行わない場合、すなわち避難意思決定モデルにおける  $\epsilon = 0$  の場合については、対角空間パターンの発生は自明であると考えられる。

### 事例 2

事例 2 のケースについては、出口選択の非対称性を再現することが目的となるが、高度認知モデルとして次の三つの行動を組み込んだ避難意思決定モデルを考える。

1. 出口からの距離によって近い方の出口を選ぶ。
2. 二つの出口をランダム選択するが、そのうえで空いている方の出口に選択を切り替える。
3. オリジナル論文の著者の解釈である教師の影響をモデルに組み込む。後ろの出口近くにいた教師の影響がアトラクタとなり非対称性が発生したとする解釈であるが、アトラクタの影響をどう実装するかの課題が残る。

## 8. 考察

人間の群衆避難行動モデルを考えるにあたって、直接人間の内部の認知構造を推定するのではなく、高度認知モデルと生物行動モデルという、それぞれ人間の認知能力を過大評価したモデルと過小評価したモデルによって上下から挟み込むことにより、徐々に接近していこうというアプローチについて提案した。このアプローチの動機となったのは、災害避難における客観データの収集が極めて難しいこと、実験室内での実験により得られる情報に限界があることなどである。

具体的な手段として、事例1と事例2という地震避難時の動画分析に基づいたデータを使った分析についてとりあげ、それぞれについて高度認知モデルと生物行動モデルを具体的にどのように設定すべきかについて考察した。これらの事例について、まだ具体的な実験や分析は行っていないが、現時点における予想をここに記しておきたい。

### 事例1

**高度認知モデル** 同調行動が行われない場合 ( $\epsilon = 0$ ) には必ずルールによる意思決定が行われるので常に同じ結果 (同じ対角空間パターンが現れる) になる。同調行動が同時に行われる場合についても基本的に対角空間パターンが現れ、この場合は毎回同じパターンではないが分散は極めて小さいものと推測する。

**生物行動モデル** これについては先行研究にて行っている。対角空間パターンは発生するが分散はある程度大きい (常に発生するわけではない)。また初期配置や物理条件、モデルパラメータなどに左右される。

### 事例2

**高度認知モデル** 1. 前後の出口をほぼ同数の避難者が利用し、出口選択の非対称性は発生しない。同調行動がある場合であっても同じで、前後を選ぶ人数の揺れは発生しても、その差は統計的に有意になるほどではない。  
2. 最終的にほぼ同数の避難者が前後の出口を利用するが、その仮定で二つの出口間を移動する (選択を変える) 避難者がそれなりの数発生する。しかし統計的に有意になるほどの偏りが出るわけではない。  
3. アトラクタの存在はあえて偏りを発生させるためのものなので、論文に示されたよう

な出口選択の非対称性を発生させることは可能であろう。しかしこの結論に意味を持たせるためには、アトラクタをどのように実装し、実験を条件付けるかについては未解決である。

**生物行動モデル** このケースについては既に一部実験を進めているが、論文に示されたような結果の再現に成功している。

上記の予想には、驚くような内容はなにも無いので、現状の考えでは、事例1と事例2を独立に分析しただけでは、あまり面白い結論は見えてこないと想像する。二つの事例の分析結果を組合せ、さらにある程度大胆な仮説を導入することのよっては、なにかヒントが見えてくるかもしれないと期待する。またさらに多くの事例を見つけて、分析に追加していくことにより、より豊かな内容が得られるのではないかと期待したい。

## 9. 展望

さらに踏み込んだ可能性として、本稿の対象である群衆の避難行動を、ふたつの代理モデルの混合と考えることができるかもしれない。すなわち群衆を人間のモデルの集合として捉えるのではなく、(どちらも人間の行動とは違う) 生物行動モデルと高度認知モデルを一定の割合で混合したものとして捉えるのである。このアプローチにより、どれだけの精度で群衆行動を表現できるかは未知数であるが、少なくとも分析可能な二つのモデルとその割合という明確な基準によって対象の表現が可能となり、群衆行動の定量評価への可能性も見えてくるかもしれない。恣意的モデルにより表された人間モデルの集合としての群衆表現につきまとう不透明性という問題に対して、ひとつの対案となる可能性があるのではないかと考える。

## 文献

- [1] M. Haghani, "Empirical methods in pedestrian, crowd and evacuation dynamics: Part I. Experimental methods and emergent topics" *Safety Science*, 129, 2020, pp. 104743
- [2] M. Haghani, "Empirical methods in pedestrian, crowd and evacuation dynamics: Part II. Field methods and contrivance topics" *Safety Science*, 129, 2020, pp. 104760
- [3] D. Helbing, "Simulating Dynamical Features of Escape panic" *Nature*, 407, 28, 2000, pp. 487-490.
- [4] A. Tsurushima, "Modeling Herd behavior Caused by Evacuation Decision Making Using Response Threshold" *Multi-Agent-Based Simulation XIX (MABS 2018)*, Springer, 2019, pp. 138-152.

- [5] A. Tsurushima, “Reproducing Symmetry Breaking in Exit Choice under Emergency Evacuation Situation using Response Threshold Model” Proceedings of the 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, vol. 1, 2010, pp. 31–41.
- [6] A. Tsurushima, “Validation of Evacuation Decision Model: An Attempt to Reproducing Human Evacuation Behaviors during the Great East Japan Earthquake” Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, vol. 1, 2020, pp. 17–27.
- [7] A. Tsurushima, “Herd behavior Is Sufficient to Reproduce Human Evacuation Decisions During the Great East Japan Earthquake” Agents and Artificial Intelligence. ICAART2020, LNCS vol12613, Springer, 2021, pp. 3–25.
- [8] A. Tsurushima, “Reproducing Evacuation Behaviors of Evacuees during the Great East Japan Earthquake using the Evacuation Decision Model with Realistic Settings” Proceedings of the 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, vol. 1, 2021, pp. 17–27.
- [9] A. Tsurushima, “Tunnel Vision Hypothesis: Cognitive Factor Affecting Crowd Evacuation Decisions” SN Computer Science, volume 3, Article number 332, 2022.
- [10] E. Bonabeau et al., “Quantitative study of the fixed threshold model for the regulation of division of labour in insect societies” Proceedings of The Royal Society B, 263, 1376, 1996, pp. 1565–1569.
- [11] N. Gilbert, “Agent-Based Models (second edition)” SAGE Publishing, 2019.
- [12] 田中孝治 et al., “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, 2015, pp. 356–367.
- [13] X. Lu et al., “Optimized Guidance for Building Fires Considering Occupants’ Route Choice” Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 561, 2021, pp. 125247.
- [14] N. Siyam et al., “Research Issues in Agent-Based Simulation for Pedestrians Evacuation” IEEE Access, 8, 2020, pp. 134435–134455.
- [15] J. Tsai et al., “ESCAPES - evacuation simulation with children, authorities, parents, emotions, and social comparison” Proceedings of 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2011), 2021, pp. 457–464.
- [16] J. Zhou et al., “Developing a database for pedestrians’ earthquake emergency evacuation in indoor scenarios” Plos ONE, 13 (6), 2018.
- [17] E. Altshuler et al., “Symmetry Breaking in Escaping Ants” The American Naturalist, 166 (6), 2005, pp. 643–649.
- [18] Q. Ji et al., “Symmetry Associate with Symmetry Breaking: Revisiting Ants and Human Escaping from Multiple-Exit Rooms” Physica A, 492 (15), 2018, pp. 941–947
- [19] M. Haghani and M. Sarvi, “‘Herding’ in Direction Choice-Makeing During Collective Escape of Crowd: How Likely Is It and Moderates It?” Safety Science, 115, 2019, pp. 362–375.
- [20] CN. van der Wal et al., “Simulating crowd evacuation with socio-cultural, cognitive, and emotional elements” Transactions on Computational Collective Intelligence XXVII, LNCS 10480, 2017, pp. 139–177
- [21] 東日本大震災時のホテルの会議室 (動画) <https://www.fnn.jp/common/311/articles/201103110012.html>.