

心理学理論にもとづくエージェントシミュレーションによるポイ捨て行動及び防止施策の分析

Analysis for behavior and prevention of littering by agent-based simulations with psychological theory

富樫 智章¹, 立川 雄一^{1,2}, 櫻木 俊輔¹, 谷本 潤^{2,3}
Tomoaki Togashi, Yuichi Tatsukawa, Shunsuke Sakuragi, Jun Tanimoto

概要

観光需要の増加に伴うオーバーツーリズムにより、観光地でのごみのポイ捨てに対する対策が求められている。集団としての人々の行動の理解は、社会課題の対策を考える上で重要であるが、社会実験は費用や労力、倫理的な制約から実現が難しいため、私たちはシミュレーションによる施策検討を探索している。心理学理論による場の影響として、自分の視界に入るとごみの量がポイ捨て行動に影響を与える。この場の影響を行動確率に取り入れたエージェントモデルが既存研究で検討されている。私たちは、定期的な路上の清掃をモデルに組み込み、路上のごみの量のコントロールによるポイ捨て行動の抑制効果を定量化する枠組みを、新規の視点として構築した。

1. 緒言

近年、国内外の都市部や観光地では、ごみのポイ捨て問題がますます深刻化しており、特に観光需要の増加に伴うオーバーツーリズムが一因として挙げられる[1,2]。ポイ捨てされたごみは、景観の悪化を招き観光資源の価値を低下させるだけでなく、野生動物への悪影響や水質汚染といった環境問題を引き起こす[3]。加えて、清掃やごみ処理に費用がかかるため地域社会への経済的負担増大にも繋がる[4]。このような背景から、ごみのポイ捨て問題は喫緊の対策が求められる社会課題として広く認識されている。

この問題に対処するため、罰則を伴う条例の制定や、観光客にごみ処理費用の一部負担を求めるなどの対策が講じられてきた[5]。しかし、これらの直接的な行動自制を促す施策は、罰則施行の困難さなどから、必ずしも十分な効果を上げてきたとは言えない。

効果的な対策を立案するためには、集団としての人々の行動パターンを深く理解することが不可欠であるが、大規模な社会実験を通じてこれを詳細に分析し、施策の費用対効果を評価することは、費用、労力、倫理的な観点から現実的ではないことが多い。そこで、現実社会の複雑な現象をモデル化し、仮想的な社会実験を行うための有効なアプローチとしてマルチエージェントシミュレーション (MAS) が注目されている。MAS は、ミクロ視点で個々のエージェントの行動ルールを定義することで、エージェント同士の相互作用により現れるマクロ視点での集団的行動や社会現象を分析し、様々な条件下での政策効果を仮想的に検証できる。

人間の意思決定や行動をモデル化する上で、心理学の知見は極めて重要である[6]。特にごみのポイ捨て行動に関しては、個人の態度や意図、そして社会的な規範が行動に影響を与えることが指摘されている[7]。先行研究として、

Bakker ら[8]は、各人が元来有する「個々人固有のポイ捨て率」と、周囲の状況や他者の行動を反映した「場の影響」という二つの規範概念を MAS モデルに導入し、歩行者のポイ捨て行動をシミュレートした。Bakker らの研究[8]では、エージェントの視界に入るとごみの量が多いほどポイ捨て行動が促進され、少ないほど抑制されるというメカニズムをモデル化し、環境中のごみの量がポイ捨て行動に与える状況的要因としての重要性を示唆した。

しかし、従来の MAS 研究では、環境中に存在するごみの量を変化させる能動的な介入策、例えば、清掃といった現実的な対策の効果を検証する視点が十分ではなかった。現実社会におけるポイ捨て問題の解決策を模索する上では、このような具体的な介入が人々の行動や周囲の環境にどのような影響を与え、結果としてポイ捨て行動全体がどう変化するのかを評価することが不可欠である。

そこで本稿では、Bakker らが示した心理学的知見、特に「場の影響」がポイ捨て行動に与える影響のメカニズムを基礎としつつ、彼らのモデルを拡張する形で、シミュレーション空間内に「定期的な清掃活動」という新たな枠組みを導入する。本稿の主たる目的は、この拡張 MAS モデルを用いて、路上の清掃頻度を変化させた場合に、それが「場の影響」を介してエージェントのポイ捨て行動にどのような抑制効果をもたらすのかを定量的に明らかにすることである。さらに、清掃という介入コストに対して、「場の影響」を考慮した場合としない場合とで、ポイ捨ての抑制効果にどのような差異が生じるのか、その損益分岐点を観察し、最適な清掃計画のあり方について考察する。これにより、人々の心理や行動の機微を組み込んだ MAS が、より現実に即した社会課題解決策の検討、特に費用対効果の高い政策立案支援に貢献しうることを示す。

2. モデル

本稿では、縦 25m×横 70m の四角平面エリアの一方から歩行者エージェント (以下、歩行者) が一定の時間密度 (以下、「人流」[人/秒]) で確率的に流入し、もう片方の終点までの距離 d_1 [m] を最短経路で移動する状況を想定する。ここで、歩行者は一定の歩行速度 v [m/秒] 移動すると仮定し、 v は文献[9]で男女比 1:1 とした場合の平均値 0.9645-1.412[m/秒] からランダムに設定する。歩行者はエリアを移動中にごみを獲得し、手元のごみをポイ捨てするか否かに関する意思決定を毎時間ステップで行う。ポイ捨てを選択した場合、歩行者の意思決定時の座標にごみが残る。以下

1. エム・アール・アイリサーチアソシエイツ株式会社
2. 九州大学 大学院総合理工学府
3. 九州大学 総合理工学研究院 環境工学部門

では、ポイ捨て行動の意思決定のメカニズム及び本稿で検討したポイ捨て抑制対策を詳細に述べる。

2.1. ポイ捨て行動確率

Bakker ら[8]はポイ捨て行動を取る確率を 2つの要素に分けて考えた。1つは「個人固有のポイ捨て率」であり、周囲の環境によって影響されず、元来個人が固有に有する姿勢や性向を反映したポイ捨て行動確率である。もう 1つは「場の影響」として周囲の環境、すなわち視界に入る路上ごみの量に依存して、ポイ捨て行動に影響を与えるファクターである。Bakker らの考え方の基となった Cialdini らの研究[7]によると、「場の影響」は視界に入る路上ごみの量が少ない場合はポイ捨て行動を抑制し、一方で視界に入る路上ごみの量が多い場合はポイ捨て行動を促進させる。本稿では、Bakker らの考え方に従い、

ポイ捨て行動確率 q
 $=$ 「個人固有のポイ捨て率」 \times 「場の影響」
 として定義した。なお元の文献では、2つの要素を心理学の用語を用いて「個人的規範」「記述的規範」としていたが、本稿では、ポイ捨て行動確率を理解しやすくするために、上記の「個人固有のポイ捨て率」「場の影響」の呼称を用いることとする。

Bakker ら[8]の考え方の基となった Cialdini らの研究[7]では、路上のごみが無い・大量に散乱したケースに加え、他者のポイ捨て行動を目撃する・しないケースについて、それぞれの集団のポイ捨て率を実験により計測した(表 1)。他者のポイ捨て行動を目撃するケースでは、目撃しないケースと比較して、路上のごみが無いケースでは集団のポイ捨て率がより減少し、一方で、路上のごみが大量に散乱したケースでは集団のポイ捨て率がさらに増加した。このことから、Bakker らは、全ての人が最初から「場の影響」を受けるのではなく、最初はある一定の割合(「場の影響を受ける初期割合」)の人のみが「場の影響」を受け(「場の影響」を受けない場合は、ポイ捨て行動確率 q =「個人固有のポイ捨て率」となる)、残りは他者のポイ捨て行動を目撃することで活性化し「場の影響」を受けようになると考えた。本稿では、この考えを踏襲することとした。

「個人固有のポイ捨て率」は、個人が固有に有する姿勢や性向を反映したものであるため、本来はエージェントごとに設定されるべきである。しかし、本稿では結果の理解や解釈を明確にするため、集団の平均値として同一の値を全てのエージェントに適用した。また、Bakker ら[8]が言及しているように、ポイ捨て行動を取る傾向は性別や年齢層によって異なっており、集団の構成により平均値は様々に変動すると考えられる。そのため、本稿では「個人固有のポイ捨て率」について、特定の値に固定せず、値を変動させて感度分析を行うこととした。

2.2. 場の影響

本稿では、Bakker らの研究[8]の基となった Cialdini らの研究[7]での実験結果を引用し、前節での考え方に基づいて、独自に「場の影響」に関するパラメータを決定した。

前節で説明した Cialdini らの実験結果(Study1)を表 1 に引用した。ここで集団のポイ捨て率については%表記ではなく、実数表記としている。 $f(L)$ (L は路上ごみの数)は

「場の影響」の効用関数で、以下のフェルミ分布型関数を仮定した。

$$f(L) = A_0 + (A_F - A_0) / (1 + \exp(-(L - L_T)/a_T))$$

「場の影響を受ける割合」 R^A 、「個人固有のポイ捨て率」 X_p (前節の考え方から、サンプル集団全員で平均値の同一とする)から、集団のポイ捨て率 X は

$$X = (1 - R^A) \cdot X_p + R^A \cdot X_p \cdot f(L)$$

となる。ここで、他者のポイ捨て行動を目撃しない場合 $R^A =$ 「場の影響を受ける初期割合」 R_0^A 、他者のポイ捨て行動を目撃する場合 $R^A = 1.0$ とした。表 1 の実験データ値と上式から $A_0 = 0.32$, $A_F = 2.88$, $R_0^A = 0.37$, $X_p = 0.19$ と決定された。

表 1 集団のポイ捨て率の実験結果 1

集団のポイ捨て率[7]	路上ごみ無し	路上ごみ大量に散乱	場の影響を受ける割合 R^A
ポイ捨て目撃なし	0.14	0.32	R_0^A
ポイ捨て目撃あり	0.06	0.54	1.0
場の影響効用関数 $f(L)$	$f(L=0) = A_0$	$f(L \rightarrow \infty) = A_F$	

次に、 $f(L)$ の残りのパラメータ L_T , a_T を、Cialdini らの実験結果(Study2)を基に決定した。Study2では被験者が他者のポイ捨て行動を目撃することはないため、 $R^A =$ 「場の影響を受ける初期割合」 $R_0^A = 0.37$ として、先述の集団のポイ捨て率 X の式を適用した。Study2の実験データ値に対して L_T , a_T 及び「個人固有のポイ捨て率」 X_p (Study1とはサンプル集団が異なるため、別途求める必要がある)をフィッティングにより求めた。図 1 はフィッティング結果と実験データ値[7]との比較である。結果として $L_T = 5.2$, $a_T = 1.0$, $X_p = 0.24$ と決定された。以上から「場の影響」効用関数 $f(L)$ 、及び「場の影響を受ける初期割合」 R_0^A がパラメータとして決定された。

シミュレーションで「場の影響」を取り入れるために、エージェントに路上のごみの数と他者のポイ捨て行動を観測させる必要がある。人の視界の広さは文献[10]によると通常 12[m]程であるが、簡単のためエージェントは円状に観測を行い、後方視界分で面積 1/2 となることを考慮して、エージェントの視界の広さを $12/\sqrt{2}$ [m]と設定した。

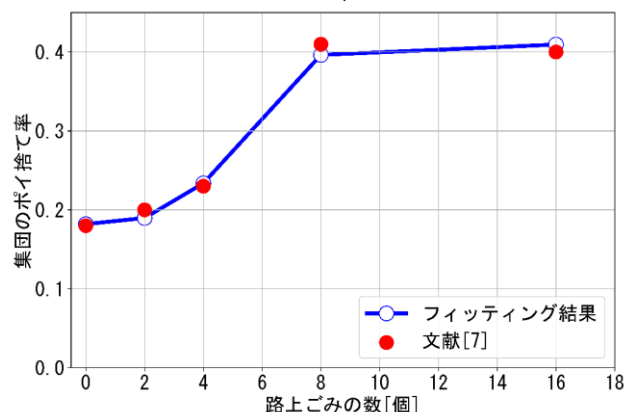


図 1 集団のポイ捨て率の実験結果 2 とフィッティング結果

2.3. ごみの発生条件及びポイ捨て行動の意思決定

各歩行者はエリアを移動中に一定の確率でゴミが手元に発生する。エリアを通過する間、歩行者 3 人に 1 人が 1 個のゴミを獲得すると仮定すると、各ステップでのゴミの発生確率 p_{step} は

$$p_{step} = 1 - \sqrt[3]{1-p}$$

となる。ここで、 $s_1(=d_1/v)$ は歩行者がエリアを通過するまでに必要なステップ数、 $p(=1/3)$ はエリアを通過する間にゴミが発生する確率を意味する。ただし、1 度ゴミが発生した歩行者は再度ゴミが発生しないとする。

ゴミを保有すると、歩行者はポイ捨てをするか否かの意思決定を行う。ポイ捨て行動確率 q は、先述の 2.1 の形で与えられる。各ステップでポイ捨て行動を取る確率 q_{step} は

$$q_{step} = 1 - \sqrt[3]{1-q}$$

となる。ここで、 $s_2(=d_2/v)$ はゴミが発生した地点から終点までのステップ数 (d_2 はゴミが発生した地点から終点までの距離) を意味する。

2.4. ポイ捨て抑制対策及び計算条件

前節の通り、本稿モデルでは、周囲のゴミの量や他者のポイ捨て行動といった「場の影響」により各歩行者のポイ捨て確率が変動する。つまり、能動的にエリアのゴミの量を削減することでポイ捨て行動を抑制できる。エリアのゴミの量を削減する枠組みとして、本稿では定期的な清掃活動とゴミ袋の配布を検討した。定期的な清掃活動では、任意の一定時間間隔でエリア上のゴミの数を 0 とする。ゴミ袋の配布では、歩行者のエリア侵入時にゴミ袋を配布することで、移動中に発生したゴミを持ち帰るように促す。

MAS による数値実験では、シミュレーション開始から 1 秒ごとに 16 時間後までの計 57,600 ステップを 1 エピソードとし、最終ステップ及び途中経過における評価指標の値を 1000 エピソードで平均を取り解析対象とした。評価指標は、エリアにポイ捨てされたゴミの総量を意味する「ポイ捨て数」、発生したゴミのうちエリアにポイ捨てされたゴミの割合を意味する「集団のポイ捨て率」である。「場の影響」の感度分析として、「人流」と「個々人固有のポイ捨て率」を変化させながら、「場の影響」の有無により評価指標がどのように変化するかを分析した。

3. 結果と議論

3.1. ポイ捨て数の時間変化及び集団のポイ捨て率

図 2 は、「個々人固有のポイ捨て率」が 0.25、「人流」が 20 秒に 1 人の場合の「ポイ捨て数」の時間変化を示す。シミュレーション開始以降、「ポイ捨て数」は単調増加する。また、清掃間隔を短くするほど「ポイ捨て数」の増加幅が緩やかになり、最終的な「ポイ捨て数」が減少する。

図 3 は、「個々人固有のポイ捨て率」が 0.25、「人流」が 20 秒に 1 人の場合における場の影響の有無による「集団のポイ捨て率」を示す。「場の影響」を考慮すると、清掃間隔が短いほど、最終的な「集団のポイ捨て率」は減少する。つまり、清掃回数 (コスト) をかけるほどポイ捨て行動は抑制される。ここで、図中の 2 直線が交わる点 (赤枠) は、「場の影響」の効力により「集団のポイ捨て率」が本来の集団より抑制される境界を示しており、清掃における損益分岐点を意味する。

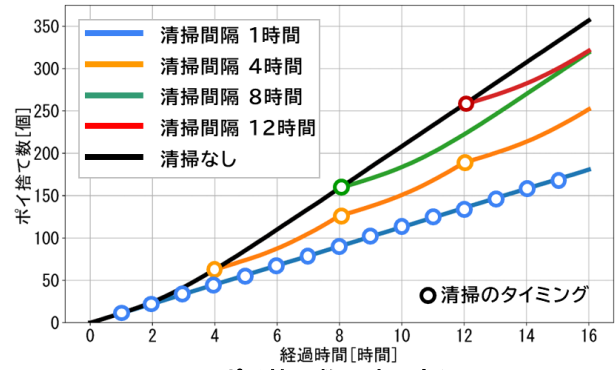


図 2 ポイ捨て数の時間変化

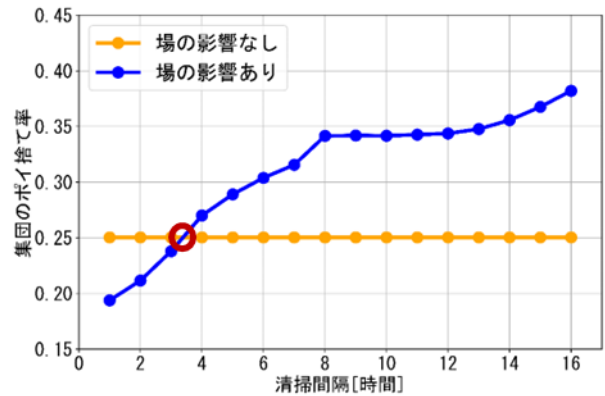


図 3 場の影響の有無による集団のポイ捨て率

3.2. 損益分岐点となる清掃回数の分析

図 4 は、「人流」(60 秒に 1 人, 20 秒に 1 人, 10 秒に 1 人, 5 秒に 1 人の 4 条件) と「個々人固有のポイ捨て率」(0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 の 5 条件) による損益分岐点の遷移を示す。「人流」が多くなるほど、あるいは「個々人固有のポイ捨て率」が大きくなるほど損益分岐点となる清掃回数 (コスト) が高くなる。言い換えると、ゴミのポイ捨てが多くなる環境ほどポイ捨て行動の抑制に必要な清掃回数 (コスト) が増加し経済的負担が増大する。

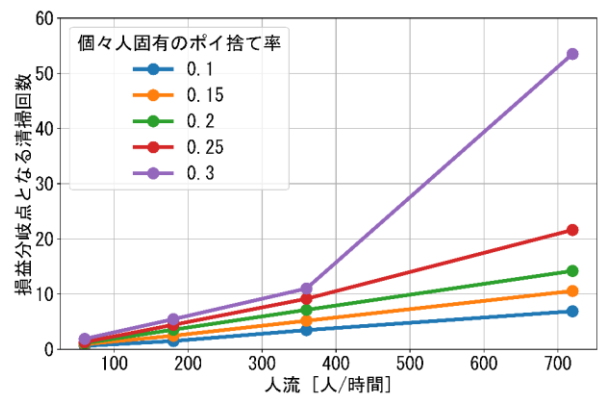


図 4 人流と個々人固有のポイ捨て率による清掃回数

3.3. ごみ袋配布によるコスト抑制効果の分析

追加の分析として、清掃に加えて、エリア進入時のエージェントに対してゴミ袋を配布し、ゴミが発生した場合に、ゴミを袋に入れて持ち帰ってもらう施策を考える。単純化のために、ゴミ袋を捨てる、あるいはゴミと袋をまとめて

ポイ捨てすることはないとして、ごみ袋の配布コストをかけて、実質的にポイ捨てする人流を削減する施策とみなして、清掃のみの場合と比較したコスト抑制効果を分析した。

全エージェント「総人流」[人]に対して、ごみ袋 1 個を配布して受け取ってもらう割合を「ごみ袋の配布率」とする。そして、ごみ袋を受け取ったエージェントの中でも、実際に施策を実行するのは、ある一定の割合とする（「施策の実行率」）。「総人流」[人]×「ごみ袋の配布率」×「施策の実行率」のエージェントが、ポイ捨て行動を取らないことになる。代わりに、ごみ袋の配布にかかるコスト「総人流」[人]×「ごみ袋の配布率」×「ごみ袋 1 個分の配布コスト」[円]が、清掃のコストに追加して加算される。ここでは、ごみ袋の配布にかかるコストを「清掃費用 1 回分コスト」[円]で除することで、清掃回数に換算して損益分岐点となる清掃回数に加算し、「損益分岐点となる（実質）清掃回数」として全コストを算出した。

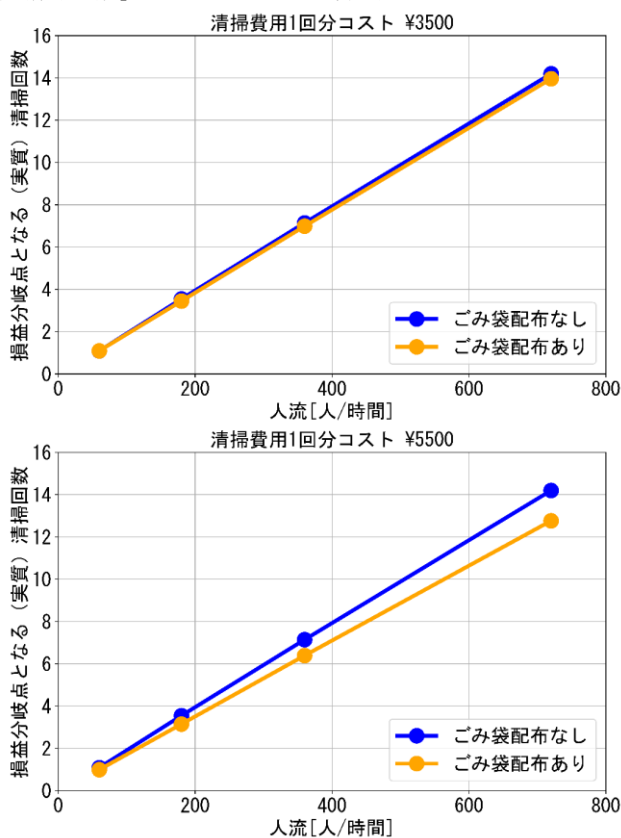


図 5 ごみ袋配布を考慮したシミュレーションの結果

シミュレーションでは、「ごみ袋の配布率」を 0.5、「施策の実行率」を 0.5 と仮定し、「ごみ袋 1 個分の配布コスト」[円]を 2 円[11]とした。そして「清掃費用 1 回分コスト」[円]の値を変動させて感度分析を行った。図 5 上は、袋配布ありの全コスト÷袋配布なしの全コストが平均して 1.0 (100%) を下回る最小の「清掃費用 1 回分コスト」[円]の結果であり、3,500 円となった。これは「清掃費用 1 回分コスト」[円]がこの値より高い場合には、清掃のみ（ごみ袋配布なし）に対して（清掃費用が割高であるため）ごみ袋配布によるコスト抑制効果が発生することを意味する。図 5 下は、袋配布ありの全コスト÷袋配布なしの全コストが平均して 0.9 (90%) を下回る場合の最小の「清掃費用 1

回分コスト」[円]の結果であり、5,500 円となった。人流が増加すると損益分岐点となる清掃回数が急激に増加することから、人流が多いケースほど実質的な人流削減の影響を受けて清掃回数がより減少し、コスト抑制効果もより大きくなることがわかった。

4. 結言

本稿では、心理学理論で示される「場の影響」を組み込んだモデルを構築し、定期的な清掃がポイ捨て行動に与える抑制効果を定量的に分析した。分析の結果、清掃頻度の向上がポイ捨てを抑制することに加え、「場の影響」を考慮することで初めて現れる費用対効果の損益分岐点が存在することを明らかにした。この損益分岐点は、外部要因である人流や内部要因である個人のポイ捨て性向に依存して変動することも示された。また、ごみ袋の配布により実質的にポイ捨てする人流を削減する場合には、人流の大きさに応じてポイ捨て行動抑制の相乗効果が異なることも示された。

本稿の成果は、現実の状況に応じた費用対効果の高いポイ捨て防止策を検討する上で、科学的根拠に基づく定量的分析の枠組みを提供するものである。

参考文献

- [1]. M. Tsukui, et al., "Repercussion effects of consumption by domestic tourists in Tokyo and Kyoto estimated using a regional waste input-output approach," *Econ. Struct.*, vol. 6, no. 1, Art. no. 1, (2017).
- [2]. C. Santos-Rojo, et al., "Overtourism and sustainability: A bibliometric study (2018–2021)," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 188, Art. no. 122285, (2023).
- [3]. M. R. Gregory, "Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions," *Phil. Trans. R. Soc. B*, vol. 364, no. 1526, pp. 2013–2025, (2009).
- [4]. I. B. L. Ong and B. K. Sovacool, "A comparative study of littering and waste in Singapore and Japan," *Resour., Conserv. Recycl.*, vol. 61, pp. 35–42, (2012).
- [5]. 環境省, "令和 3 年度「ポイ捨て」に関する調査報告書," (2022).
- [6]. A. H. Chaudhary et al., "Littering behaviour: A systematic review," *Habitat Int.*, vol. 50, pp. 123–132, (2015).
- [7]. R. B. Cialdini, et al., "A Focus Theory of Normative Conduct: A Theoretical Refinement and Reevaluation of the Role of Norms in Human Behavior," *Advances in Experimental Social Psychology*, vol. 24, M. P. Zanna, Ed., Academic Press, pp. 201–234, (1991).
- [8]. J.B. Bakker, "Beyond social experiments: Simulation of descriptive littering norms through agent-based modelling," *Utrecht University* (2019).
- [9]. R. W. Bohannon et al., "Normal walking speed: a descriptive meta-analysis," *Physiotherapy*, vol. 97, no. 3, pp. 182–189, (2011).
- [10]. 知花 弘吉, "歩行者の注視傾向からみた空間把握に関する研究," *日本建築学会*, 64 巻, 520 号, (1999).
- [11]. ASKUL, "国産レジ袋乳白 12 号 1 セット (12000 枚 : 1000 枚入 × 12 箱)," <https://www.askul.co.jp/p/3069429/>, 1 枚当たり 1.65 円のため、本稿で 1 枚 2 円として検討した。