

# 歩行者相互作用モデルを用いた広尾学園の 一斉下校シミュレーション

Simulation of simultaneous departure from Hiroo Gakuen using a pedestrian interaction model

川村 綺佳  
広尾学園高等学校

広尾学園中学校・高等学校では定期試験中に中学3学年が一斉下校することがあり学年ごとに教室を出る時間を5分ずつずらしているが、エントランスや駅構内で混雑が起きている。この混雑緩和を目指して、「A universal power law governing pedestrian interactions」[1]にある歩行者相互作用のモデルを一斉下校する際のシミュレーションに応用した。[1]以前の先行研究において、歩行者同士の動きは粒子同士の動きで表現でき、相互作用が働いていることがわかっている。しかし、一対の相互作用をそれぞれ分離して定量化しづらいという問題点があり、[1]では歩行者相互作用のモデル化にあたり、歩行者対の存在確率を確率密度関数を用いて定義し、ボルツマン分布に従うと仮定して、この問題点を解決している。学年ごとに教室を出る時間をずらして一斉下校シミュレーションを行った結果、その時間は9分が妥当であるという結論に至った。

キーワード：歩行者相互作用モデル, 確率密度関数, ボルツマン分布

## 1. はじめに

広尾学園中学校・高等学校では定期試験中に中学3学年が一斉下校することがあり学年ごとに教室を出る時間を5分ずつずらしている。しかし、1学年約250人が一度に下校する為、歩道に生徒が溢れて迷惑にならないように先生方がエントランスの出口で出る生徒の人数を制限して下校させている。そのため、教室を早く出たにも関わらず、エントランスの出口で待つ事となってしまっている。また、生徒達は試験終了後には試験中の他学年の迷惑にならないように、速やかに教室を出て下校するように促される。従って、教室に残る生徒はおらず、1学年分の生徒が一度にエントランスに集中してしまっている。そのため、最初に下校し始めた学年がエントランスで人数制限により待たされ、1学年分の生徒がエントランスを出切らないまま2学年目が下校を始め、再びエントランスで足止めを食らうという状況が繰り返されてしまっている。そこで、本研究では教室を早く出たにも関わらずエントランスで待たされるという現状を改善するために、多少教室を出る時間が遅くなってもエントランスで足止め

される事なく効率的に生徒が下校できるように、教室を出る時間が混雑の原因ではないかと考え、時間をずらしてシミュレーションを行った。

## 2. 先行研究

### 2.1. 歩行者相互作用モデル

論文[1]では歩行者対の存在確率を確率密度関数を用いて定義し、相互作用エネルギーはボルツマン分布に従うと仮定して、歩行者相互作用モデルの導出をしていた。

#### 2.1.1 確率密度関数

歩行者対の存在確率  $g(x)$  を、以下のように定義した。

$$g(x) = P(x) / P_M(x), \quad \lim_{x \rightarrow \infty} g(x) = 1$$

$x$ : 歩行者間の距離,  $P(x)$ : データセット内の歩行者間の距離  $x$  による確率密度関数,  $P_M(x)$ : 相互作用していないときに生じるであろう歩行者間での確率密度関数とする。データセットとは、モーションキャプチャーなどの技術を用いて得た、歩行者の歩行

経路のデータのことである。この先行研究では、354人の歩行者による図2の Bottle neck データセットと1146人の歩行者による図3の Hall way データセットを使用している。

データセットの歩行者経路の一例は下記の図1のようになる。密集した群衆が狭いくびれを通過して歩く状態での歩行者経路である。濃い赤色は、平均時間密度が低い状態、白色が平均時間密度が高い状態を表している。縦軸と横軸は、中心からの距離(m)を表している。

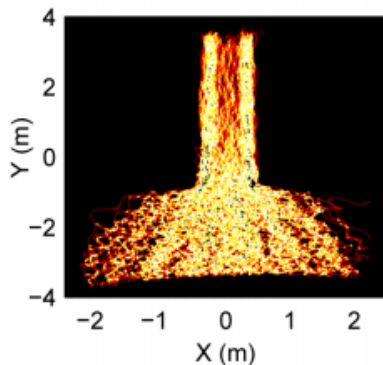


図1 データセットの歩行者経路

### 2.1.2. 相互作用エネルギー

$\tau$ : 衝突する前に現在の速度で歩く時間とし、 $\tau$ における歩行者対の存在確率を  $g(\tau)$  とする。また、 $E(\tau)$  を  $\tau$  における相互作用エネルギーとし、 $E_0$  を固有の歩行者エネルギーとしたときに、ボルツマン分布に従うと仮定すると、以下のような法則が成り立つ。

$$g(\tau) \propto \exp[-E(\tau)/E_0], \quad E(\tau) \propto \ln[1/g(\tau)]$$

### 2.1.3 歩行者相互作用モデルの導出

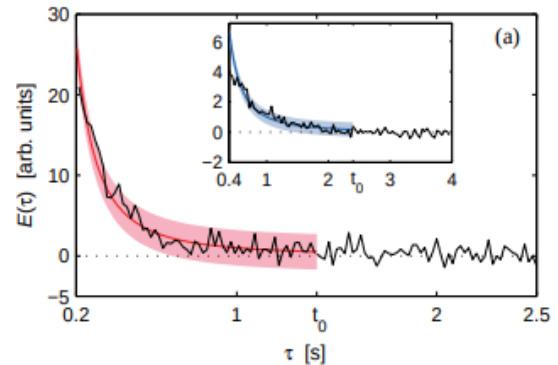
先行研究では Bottle neck データセットから177672対、Hall way データセットからは119774対の  $\tau$  のサンプルが得られている。

データセットのグラフ①を  $E(\tau) \propto \ln[1/g(\tau)]$  を用いてプロットしていくとデータセットのグラフ②となり、確率密度関数の分布はべき乗則が成り立つため、以下のような式が成り立つ。

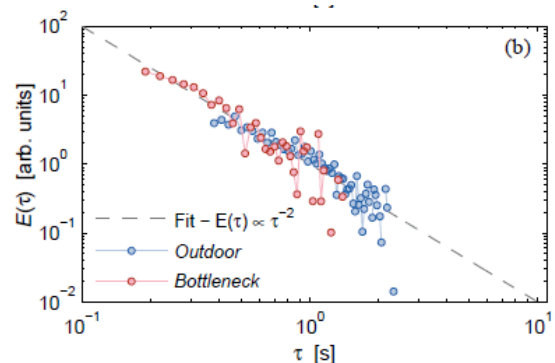
$$E(\tau) \propto 1/\tau^2 \quad \dots(a)$$

また、2.1.1 で述べたデータセットのグラフが下記のグラフである。赤色で塗られているグラフが

Hall way の状況、青色で塗られているグラフが Bottle neck の状況を表している。縦軸が相互作用エネルギー、横軸が衝突する前に現在の速度で歩く時間である。



データセットのグラフ①



データセットのグラフ②

Bottle neck とは、図2のような窄まった1つの出口へ青色の歩行者が向かって進んでいくシミュレーションである。

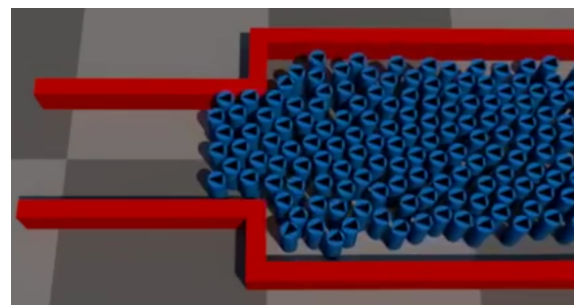


図2 Bottle neck

Hall way とは、図3のような両側が廊下のように仕切られていて赤色の歩行者が右方向へ、青色の歩行者が左方向へ進むシミュレーションである。

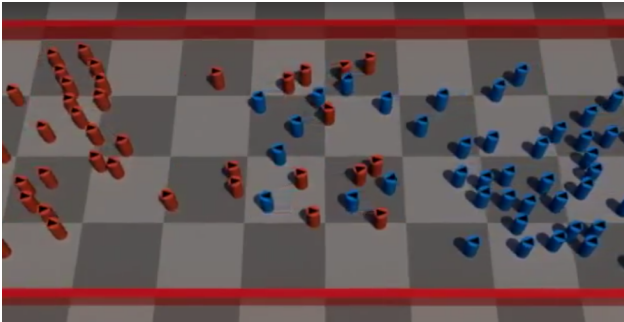
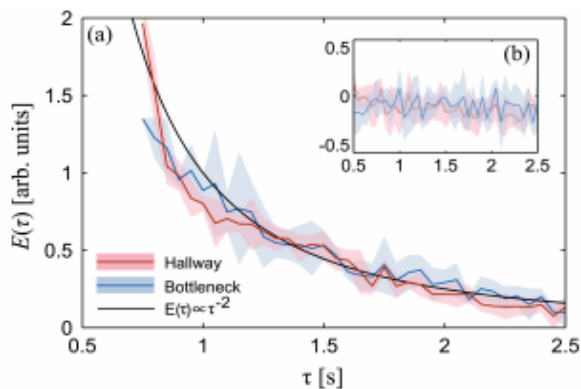


図 3 Hall way

データセットのグラフから  $\tau_0$ :遮蔽の時間とすると  $E(\tau) \propto \exp[-\tau/\tau_0]$ ...(b)が得られる。式(a)と式(b)を  $k$ :エネルギーの単位定数として整理すると  $E(\tau) = \frac{k}{\tau^2} e^{-\tau/\tau_0}$  という式が得られる。また、 $r$ :歩行者間の距離として変形すると  $F = \nabla_r \left( \frac{k}{\tau^2} e^{-\tau/\tau_0} \right)$  という式が得られる。

得られた式から Hall way と Bottle neck のシミュレーションを行った結果のグラフが以下のグラフ③である。赤色で塗られているグラフが Hall way の状況、青色で塗られているグラフが Bottle neck の状況を表している。縦軸は相互作用エネルギー、横軸が衝突する前に現在の速度で歩く時間である。黒色はべき乗則のグラフ  $E(\tau) \propto 1/\tau^2$  を表している。このグラフから、歩行者相互作用モデル導出の際の仮定である、べき乗則にシミュレーションが従ったことから、論文[1]では歩行者相互作用モデルの妥当性を述べていた。



グラフ③ 歩行者相互作用モデルのシミュレーション結果

### 3. 一斉下校シミュレーション

#### 3.1.シミュレーション条件

プログラミング言語はJavaScriptを用いた。駅は広尾学園中学校・高等学校の最寄り駅である広尾駅を選ぶこととした。広尾駅は日比谷線のみが通り、改札は5つある。ホームは中目黒方面行と六本木方面行でそれぞれ2つに分かれている。電車は約5分で1本くる。学校の立地としては、図4のように校内のエントランスから駅の改札口までは真っ直ぐな歩道のみで信号や横断歩道は無い。また、渋滞が起きていない場合は校内のエントランスから駅の改札口までは徒歩2分で到着する。



図 4 広尾学園から駅までの経路

1 学年の人数を 250 人として 3 学年分考えた。5分から 20 分まで 1 分おきに学年ごとに教室を出る時間を変更した。シミュレーションでは、混雑が無い時はエントランスから目的地まで 320step で到着したため 1step2.66 秒として換算した。生徒の流入は 1step で 5 人ずつ生成するため 1 学年分の生徒は 50step で流入が終わる。

エントランスは図5のように2段のBottle neckの形を取っていて、1段目は校内のエントランスの出口、2段目は歩道を表している。歩道の幅は他の歩行者の迷惑にならないように、生徒が横並びで2人通れる幅の大きさにしている。生徒の流入場所は固定し、生徒がエントランスまで辿り着く経路は、最短距離を取るものとした。青丸は歩行者(生徒)、赤丸は目的地である

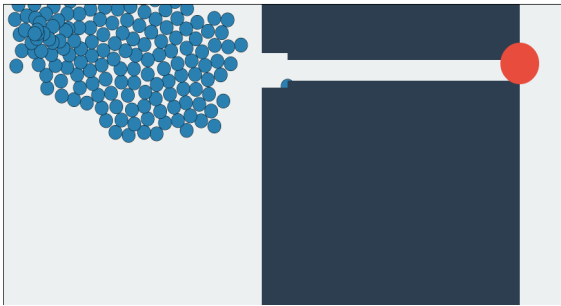


図 5 エントランス

改札は図 6 のように改札機が Bottle neck の形をしていて、本来は 5 つ改札があるが入り口専用の改札機として 2 つ設置した。また、本来は改札に入った後、上り方面と下り方面のホームに分かれるが、分かれる人数比が不明であったため、目的地は分けずに 1 つとした。青丸は歩行者(生徒)、赤丸は目的地である。

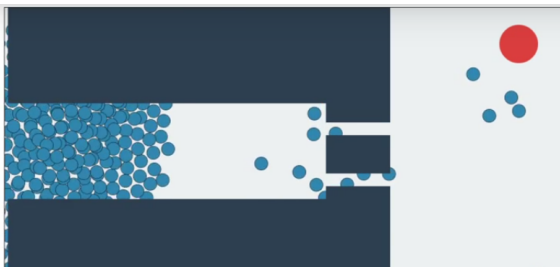
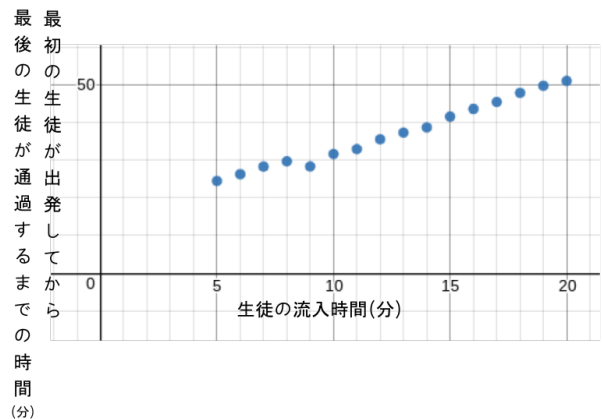


図 6 改札

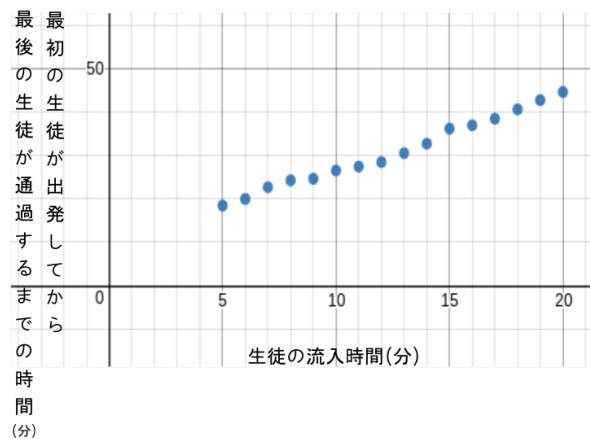
### 3.2. シミュレーション結果

#### 3.2.1. 全体の所要時間

最初の生徒が出発してから第 3 学年目の最後の生徒が目的地へ到着するまでの時間(分)を縦軸を取った。また、最初の学年が下校し終えてから次の学年が下校し始めるまで教室で待つ時間(分)を、生徒の流入時間(分)として横軸に取った。



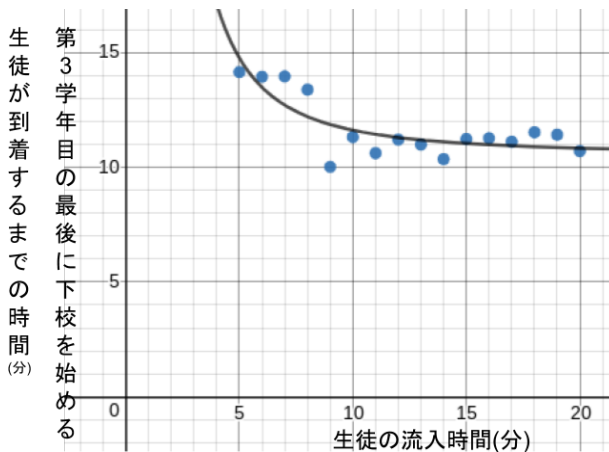
最初の生徒が出発してから第 3 学年目の最後の生徒が目的地へ到着するまでの時間(エントランス)



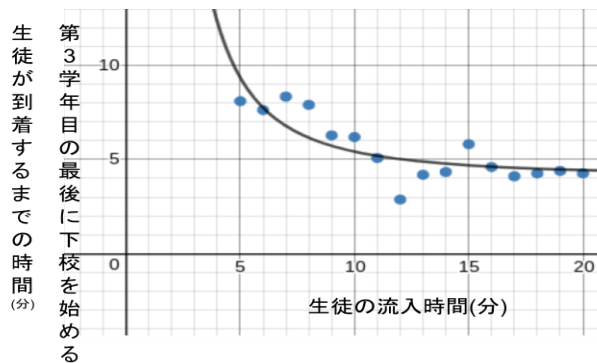
最初の生徒が出発してから第 3 学年目の最後の生徒が目的地へ到着するまでの時間(改札)

#### 3.2.2. 最後に下校する生徒の到着所要時間

最後に下校する生徒は前の学年の生徒が残ってしまっていれば、目的地への到着時間が遅くなるが、前の学年が残っていない状況ならば目的地への到着時間が短くなるため、渋滞を測る指標になると考えた。従って、全生徒が到着するまでの時間と第 3 学年目の最後に下校を始める生徒が出発するまで待つ時間の差を、第 3 学年目の最後に下校を始める生徒が到着するまでの時間(分)とし縦軸を取った。また、最初の学年が下校してから次の学年が下校するまで教室で待つ時間(分)を生徒の流入時間(分)として横軸に取った。さらに、2.1.3 で述べたように、今回使用した歩行者相互作用モデルはべき乗則に従っているため、フィッティングはべき乗則に従うように行った。



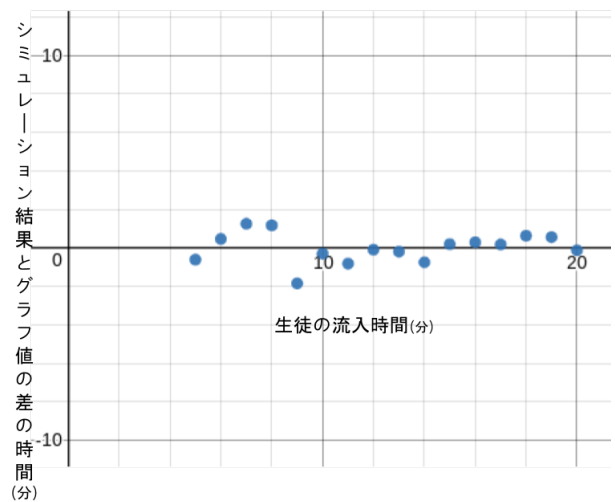
第3学年目の最後に下校を始める生徒の到着時間  
(エントランス)



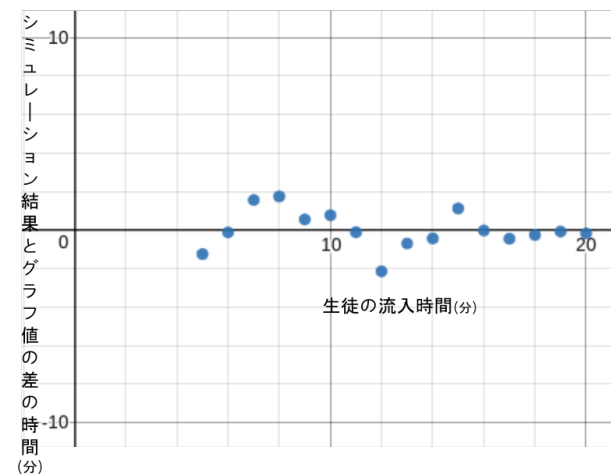
第3学年目の最後に下校を始める生徒の到着時間  
(改札)

### 3.2.3.結果の評価

3.2.2 最後に下校する生徒の到着所要時間では、次の学年が教室を出るまでの時間が長いほど、所要時間が長くなってしまいうため、第3学年目の最後に下校を始める生徒の到着時間のグラフを分析した。シミュレーション結果の評価方法として、シミュレーションで求めた値からフィッティングしたグラフの値を引いた差をプロットした。その結果が次のグラフである。



シミュレーション結果とフィッティングしたグラフの差(エントランス)



シミュレーション結果とフィッティングしたグラフの差(改札)

## 4. 考察

3.2.1 の全体の所要時間のグラフでは生徒の流入時間が長くなると、全生徒が下校するまでの時間も長くなってしまいうため、渋滞を測る指標としては不適切であったと考えた。また、実際のシミュレーションを見ると図7のように生徒の流入時間が13分以降は最初の学年から次の学年が出てくるまでの時間が空いてしまい時間のロスが生じてしまっていた。このことから、適切な流入時間は現在実施している5分から13分の間であると考えた。

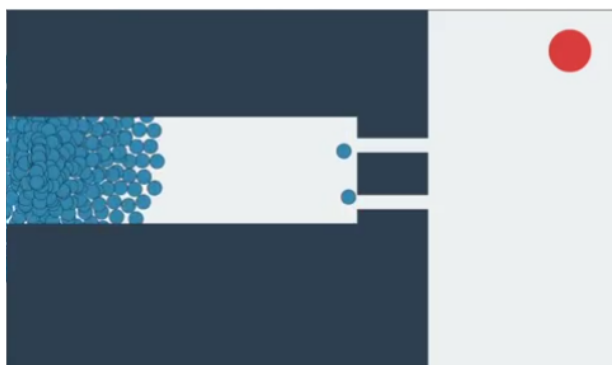


図7 流入時間 13分における第2学年目の流入の様子

さらに、3.2.2 のシミュレーション結果のグラフから、エントランスも改札も生徒の流入時間 9 分で初めてシミュレーション結果とグラフとの差が下がっているため 9 分が渋滞を起こさずかつその中で一番効率よく生徒が下校できる時間だと考えた。

本研究のシミュレーションでは渋滞が起きていた一斉下校が、流入時間の間隔を調整したことで渋滞を起こすことなく一斉下校できた。そのため下校の際の渋滞の原因として、流入量のピーク時の生徒の交通量がエントランスや改札での交通量の限界値より高くなっていたことが挙げられるのではないかと考えた。

## 5. 今後の課題と展望

本研究でのシミュレーションが実際の生徒の一斉下校の様子をどこまで再現できているか確認するために、流入時間 9 分での下校の様子動画を実データとして、結果と照らし合わせる。また、一斉下校シミュレーションを神宮球場などにおける、野球の試合やコンサート終了後の観客の一斉解散に応用できるのではないかと考えている。

### 謝辞

本研究でご指導いただいた東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター 測定器研究部助教 田中香津生先生に感謝の意を表す。また、日々の研究活動において指導や協力をして下さる広尾学園高等学校の先生方と生徒にも重ねて感謝の意を表す。

### 参考文献

- [1] Ioannis Karamouzas , Brian Skinner , Stepgen J. Guy (2014) 「A universal power law governing pedestrian interactions」 Phys. Rev. Lett. 113, 238701