

# 電車の形状が乗客の降車時間に与える影響

嘉幡聰至<sup>1</sup>, 川口寿裕<sup>1</sup>

<sup>1</sup>関西大学 社会安全学部 安全マネジメント学科

## 概要

ボトルネック部における歩行者の挙動は複雑である。このことから、満員の鉄道車両から乗客が一斉に降車する際、扉付近の車両形状が乗客の降車効率に影響を与えると考えられる。本研究では、セル・オートマトンを用いた数値シミュレーションにより、鉄道車両から乗客が降車する挙動を計算した。特に扉と座席の間のスペースの有無について検討した。その結果、扉と座席の間にスペースの無い車両の方が、スペースのある車両よりも、乗客の降車時間が短くなった。

## Effects of Train Shape on Passenger Egress

Satoshi Kabata<sup>1</sup>, Toshihiro Kawaguchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Safety Management, Faculty of Safety Science, Kansai University

## Abstract

Behavior of pedestrians around a bottleneck is complicated. Thus, the shape of railway vehicle can affect the passenger egress at a terminal station. The behavior of the passenger egress is numerically simulated by using the Cellular Automaton in this study. The effect of clearance between the door and the seat on the egress time is investigated. As a result, the egress time from the vehicle without clearance between the door and the seat was shorter.

## 1 緒言

通勤ラッシュ時の電車に乗ると、大勢の人が一気に降車しようとして、降りるのが遅れることがある。電車の車両の出口のようなボトルネックにおいては障害物が歩行者の流れをスムーズにすることはよく知られており、それを裏付ける歩行者のボトルネックの脱出に関する実験も行われている。電車の車両において、扉周辺の構造を変更すれば、乗客の降車がスムーズになる可能性がある。

本研究では、終着駅で混雑した車両から全乗客が一斉に降車する様子について数値シミュレーションを行った。そのシミュレーションが実際の事象を再現しているかどうかを確かめるため、シミュレーションの検証を行った後、特に、扉と座席の間のスペースの有無に着目し、現行の車両と新たに提案する車両で降車にかかる時間を比較した。

## 2 シミュレーションモデル

### 2.1 基本モデル

本研究では歩行者の動きをセル・オートマトンで表現する。

車両の中に乗客をランダムに配置した後、扉が開いた瞬間からのシミュレーションとして、乗客を出口に向けて移動させ、降車させる。座席前のスペースが空くと、座席に座っていた乗客を発生させ、同様に移動させた。

乗客の移動については、ムーア近傍による静的フロアフィールドを適用した。ただし、座席角や戸袋部などをすり抜けないように、一部のセルにおいては斜め方向に進行することがないようにしている。

以後、今回使用したシミュレーションの特徴的な点を説明する。

### 2.2 拡張クイックスタートモデル

通常のセル・オートマトンでは進行先のセルにすで

に歩行者がいると進行できず、前を歩く人と常に1セル分の間隔をあけて歩くことになる。広い場所においては、この挙動は合理的かも知れないが、混雑した車両からはもっと間隔を詰めて降車するのが普通であると考えられる。

そこで本研究では、歩行者が間隔を空けずに移動できるようにモデルの改良を行った。

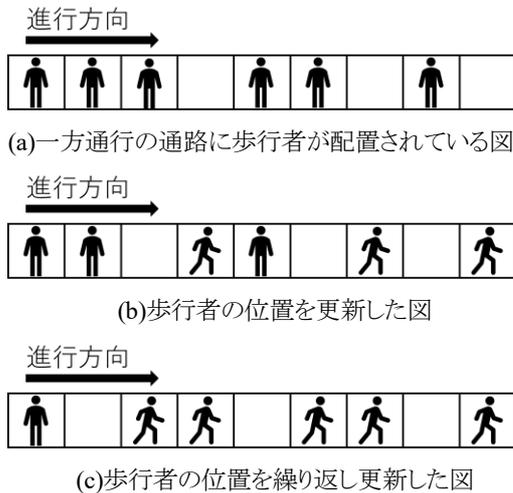


図 1: クイックスタートモデル

例えば、図 1(a)に示すように歩行者が一方通行の通路に配置された場合、通常のセル・オートマトンであれば、前方のセルが空いている歩行者(図 1(a)の左から 3, 6, 8 番目)のみが進行し、図 1(b)の状態になる。ここで、時間進行せずに前方が空いた歩行者(図 1(b)の左から 2, 5 番目)を移動させる。ただし、すでに移動した歩行者(図 1(b)の左から 4, 7, 9 番目)は前方が空いても移動しない(図 1(c))。

ここまでの結果はクイックスタートモデルで時間進行させたものと同様である。2 次元モデルになると、複数の歩行者が特定のセルに進行しようとするところがあるが、通常の 2 次元平面内の移動ルールと同様に一様乱数を用いて進行する歩行者を決定している。本研究では時間進行させずに移動させる操作を繰り返すことにより、一部の歩行者が進めないようにすること以外に複雑なルールを追加することなく、3 人以上の歩行者が間隔を空けずに移動できるようクイックスタートモデルを拡張した。本計算においては、車両の出口から最も遠い歩行者が出口に向かうまでに必要とする最小位置更新回数が 10 回であることから、最大 10 人までが間隔を空けずに移動できるように設定した。

### 2.3 乗客の歩行速度

シミュレーション上の位置更新 1 回当たりの経過時間

(時間刻み幅)は、セルのサイズと歩行者の歩行速度から決定される。鉄道車両内における実際の乗客の歩行速度を計測した。

鉄道車両内での歩行速度は一般的な平面歩行速度よりも小さいと考えられる。そこで、実際に JR 京都線大阪駅に停車している車両内を標準的な速度で歩行している乗客の歩行速度をストップウォッチで実測したところ、1.16[m/s]であった。本研究において、セルは一边 0.45[m]の正方形としたため、この速度に対しての位置更新 1 回当たりの経過時間は 0.38[s]となる。

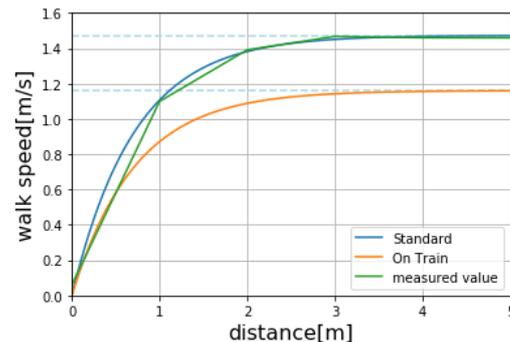


図 2: 歩行距離による歩行速度の変化

人間健康工学研究センター[1]によると、歩行速度が最大になるまでに 2~3m の距離が必要である。歩行距離ごとの歩行速度の変化のデータ[1]から、20~70 歳の男女の平均歩行速度を歩行距離に対してプロットすると、図 2 の緑色の折れ線のようになる。

この変化が指数関数の形をとると仮定して近似する(図 2 の青色の曲線)と、式(1)が得られる。

$$V = V_{Max}(1 - e^{-\frac{x}{0.72}}) \quad (1)$$

ここで、 $x$ は停止位置からの歩行距離、 $V$ は距離 $x$ における歩行速度、 $V_{Max}$ は最大歩行速度である。図 2 の橙色の曲線は  $V_{Max}$ として上記の 1.16[m/s]を適用した曲線である。本研究では、乗客が移動する際の加速についても考慮した。

### 2.4 位置更新1回当たりの秒数

歩行速度の異なる歩行者が混在する場合、前方セルが空いているときの進行確率を歩行者ごとに設定することで表現することができる。

しかし、本計算のように歩行者の進行回数が最大 10 回程度と少ない場合、統計平均としての歩行速度をうまく表現できない。加えて、車両内に密集している状況では、前方の歩行者が進行するかどうかが大きく影響するため、1 人の歩行者の進行確率のブレによって計算結果が大きく左右されることになる。

実際に、進行確率によって歩行速度を表現する手法を用いて混雑した鉄道車両からの降車シミュレーションを実施したところ、実測値の2倍以上の降車時間がかかったことから、この手法を用いることは適切ではないと考えられる。

そこで、本研究では位置更新 1 回ごとに、すべての歩行者に対して、停止していた状態から何連続で進行している状態かを表す連続進行数を歩行者ごとに取得して、車両内での歩行速度の変化の近似曲線の関数をもとに、位置更新内で動いた歩行者の歩行速度の平均値と、セルのサイズから位置更新 1 回当たりの時間刻み幅を計算することとした。

また、後方を歩行する歩行者 a が前方を歩行する歩行者 b よりも歩行速度が大きいのに後ろについて歩くことは現実的ではないので、歩行者 a の連続進行数を歩行者 b の連続進行数以下の値にしている。

この手法は個々の歩行者が加速しながら移動する挙動を正確に表現できるものではないが、加速しながら移動する歩行者を含む集団の全体的な挙動を定量的に模擬できるものと考えられ、混雑した鉄道車両からの降車時間について精度向上につながると期待できる。

## 2.5 衝突関数の導入

全ての歩行者が進行方向を決定した後、複数の歩行者の進行するセルが、重複することがある。本研究では柳澤[3]を参考に、衝突関数を導入した。

衝突が起こっても無理矢理進むとする確率は、柳澤ら[4]を参考に、衝突を発生させている人数と衝突係数から与えた。

## 2.6 歩行者の初動

人は歩行速度が最大になるまでにだけでなく、動き出すまでもある程度時間がかかる。

人間健康工学研究センター[1]によると、音と光による合図を受けてから動き出すのにかかる時間は、満員電車をよく利用すると考えられる 20~70 歳の男女で平均値をとると、0.88 秒であった。

前方の歩行者が動き出す瞬間を多少予測できるとはいえ、乗客全員が停止した状態から一斉に動き出すことは現実的ではないため、本計算は、乗客の歩行速度を求めるのに必要となる連続進行数が 0 回目である歩行者については、位置更新の繰り返しを 2 回までとした。

## 3 シミュレーション検証

JR 京都線大阪駅において、大阪駅を終着駅とする

快速列車に対して、乗客全員が降車し終えるのにかかる時間、合計人数、5 秒ごとの降車人数をビデオカメラの映像を用いて個人で測定した。

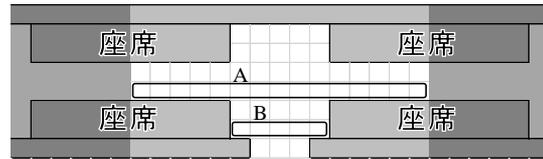


図 3:JR 京都線の快速急行列車の形状

現状の快速列車車両を模した領域(図 3)から乗客が降車する様子をシミュレーションし測定結果と比較した。経過時間に対して車両から降車した乗客の累積人数をプロットした結果を図 4 に示す。計測した車両からの降車人数が 44 人であったため、シミュレーション上にも乗客を 44 人配置した。計算は初期状態を変化させ、5 回行なったものをプロットしている。初期状態において乗客をランダムに配置しているため、5 回の計算における降車挙動にはばらつきが見られる。

5 秒、10 秒において、本計算結果は実測値とよく一致していることがわかる。しかし、時間の経過とともに、本計算における降車人数は実測値を上回っていくことがわかる。つまり、本計算における乗客は実際の乗客よりも早く降車していることになる。

この違いについては、実際の乗客の降車挙動に原因があると考えられる。つまり、扉が開いてしばらくは普通に乗客が降車するが、急がない乗客は混雑を避けてゆっくり降車しようとするため、時間の経過とともに降車のペースが落ちる。本シミュレーションではこのことを考慮しておらず、全乗客が同じペースで降車しようとするため、前述の計測結果との差が生じたものと考えられる。

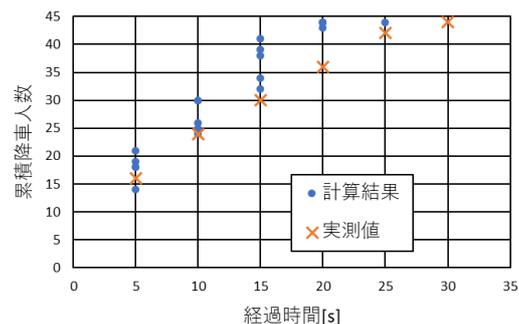


図 4: 降車人数の推移の実測値と計算結果の比較

## 4 結果と考察

現状の車両形状(図 3)に対して、図 5 のように扉と座席の間のスペースがない車両を考え、乗客の降車の様子をシミュレーションした。2 つの車両に対する計

算結果を比較することで、鉄道車両の扉付近の形状が乗客の降車挙動に与える影響について調べた。乗客の合計人数はどちらも座席に座っている人も合わせて60人とし、座席に座る人数も片側に10人ずつ、両側を合わせて20人と統一した。

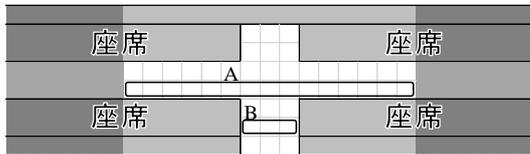


図5: 扉と座席の間にスペースがない車両モデル

それぞれの車両に対して10回ずつ計算を行い、降車にかかる時間を求めた。さらに、車両中央付近(図3, 図5のA部分)、車両扉付近(図3, 図5のB部分)、車両全体における乗客の衝突回数を計算した。結果を図6にまとめる。

ここで衝突回数とは、複数の乗客が同じセルに進行しようとした回数のことを意味し、位置更新ごとに、すべてのセルにおいて、乗客がそのセルに進行するかどうかにかかわらず、衝突回数によって進行する確率が計算されるごとに回数を加算していった。衝突の発生によりアーチアクションが発生し、降車時間の遅れへと繋がる。

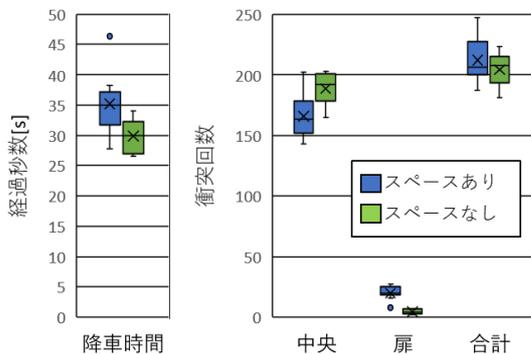


図6: それぞれの場合の降車時間と衝突回数

降車時間に注目すると、扉と座席の間にスペースがある車両(以後、スペースがある車両と記す)よりも、扉と座席の間にスペースがない車両(以後、スペースがない車両と記す)の方が平均で約5.3秒(約15%)短くなった。これは現状の車両形状をスペースがない車両に変更することで乗客の降車時間を短縮できる可能性があることを示唆している。

衝突回数に注目すると、スペースがない車両の場合、中央付近のA部分ではスペースがある車両よりも多くなっているが、扉付近のB部分では少なくなっており、車両全体での衝突回数は4%程度少なくなっている。

乗客の衝突については車両内の全てのセルにおいて同様に発生するように設定しているが、衝突の90%前後がボトルネック部を含むA部分やB部分で発生していることがわかる。特に扉付近のB部分でのアーチアクションの発生は降車時間の遅れに繋がりと考えられる。スペースがある車両では乗客はA部分とB部分の2段階でボトルネックを通過することになるが、スペースがない車両ではB部分のボトルネックが消滅している。このことによりB部分での衝突回数が少なくなり、スペースがない車両での降車時間の短縮に繋がったと考えられる。

## 5 結言

加速している歩行者を含む、混雑した鉄道車両からの降車挙動を表現するためのシミュレーション手法を提案した。扉と座席の間のスペースがない車両形状に変更することで、扉付近におけるアーチアクションが抑制され、降車時間を短縮できる可能性があることが示唆された。

## 謝辞

本研究は JSPS 科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号:19K04936)の支援を受けた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 一般社団法人人間生活工学研究センター-HQL データベースサイト, 2001, 高齢者対応基盤整備計画研究開発 第2編データベース整備(動態・視聴覚特性), 32-34, 54-60, 203-209, 222-229.
- [2] 通商産業省工業技術院生命工学工業技術研究所, 1996, 設計のための人体寸法データ集.
- [3] 柳澤大地, 2014, 群集の一方向流・双方向流・退出過程とセルオートマトンモデル, 混相流, 28-3, 312-320.
- [4] 柳澤大地, 友枝明保, 西成活祐, 2008, 拡張フロアフィールドモデルによるボトルネック周りの群集運動の解析, 応用力学研究所研究集会報告, No.19ME-S2.
- [5] Nishinari, K., Suma, Y., Yanagisawa, D., Tomoeda, A., Kimura, A. and Nishi, R., 2008, Toward Smooth Movement of Crowds, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008, 293-308.