

東京ドームからの帰宅シミュレーション

浦田桂一郎, 柳澤大地, 西成活裕
東京大学 工学部 航空宇宙工学科

概要

コロナ終息以降のイベントの開催数の増加に伴い、群集事故や電車の遅延といった「混雑リスク」への対策は、ますます重要性を増している。本研究では東京ドームを例に、イベント後に最寄駅へ向かう群集の混雑緩和を目的として、ドーム退出率・駅までの帰宅経路に存在する赤信号の時間に着目し、セルオートマトンモデルを用いてシミュレーションを行った。そして、コンサートやスポーツの試合といったイベントの種類に応じて、混雑指標を最小化するドーム退出率と赤信号時間の組み合わせを明らかにした。この結果は、東京ドームにおける各イベント後の規制退場などの群集マネジメントに役立つと考えられる。また、他の商業施設の混雑緩和や施設設計段階での混雑予想への応用も期待される。

Simulation of Returning Home from Tokyo Dome

Keichiro Urata, Daichi Yanagisawa, Katsuhiko Nishinari

Department of Aeronautics and Astronautics, Faculty of Engineering, The University of Tokyo

Abstract

With the increasing number of events following the end of the COVID-19 pandemic, addressing “congestion risks” such as crowd accidents and train delays has become increasingly important. This study focuses on Tokyo Dome and aims to mitigate crowd congestion when heading to the nearest station after an event. Using a cellular automaton model, we simulate scenarios considering the Dome Exit Rate and Red Light Time on the routes to the station. We identify the combination of Dome Exit Rates and Red Light Times that minimize congestion indices for different types of events, such as concerts and sports games. These results can contribute to crowd management strategies, including regulated departures after events at Tokyo Dome, and may also be applicable to congestion mitigation in other facilities or in predicting congestion during the design phase of new venues.

1 序論

コロナウイルスが第五類に移行し、イベントの開催数・参加人数ともに増加傾向にある現在、イベントにおける混雑の緩和は非常に大きな問題となっている。特にイベント後の最寄駅の混雑や、それによる電車の遅延はニュースでも取り上げられるほどである。[1]によれば、東京都内において満員電車による遅延が年間で数兆円規模の経済損失を引き起こしているとき、その一部がこのようなイベント後の混雑に起因していることは否めず、解決優先度が高い課題であると言える。それと同時に、こうした密集した場所では群集事故が起きる可能性が高まるため、事故防止の観点からも混雑対策を考える必要がある。

これに対する「スタジアム内部」の観点からのアプローチとして、[2]は歩行者シュミレータを用いて接触回数を指標に、分散退場時における一般的な野球ドームやサッカー場の内部の様子を調べ、分散退場オペレーションの評価基準を示した。また、[3]は関門海峡花火大会を例に、実際のデータとシミュレーションのデータの同化を用いて、実際のデータから初期条件を定め信号の開閉時間を制御し、花火大会の参加者の帰宅時間を含めた混雑指標を最小化する研究を行なった。

本研究は、スタジアムの出口から駅入口の信号までをシミュレーションに組み込むことで、スタジアムからの退出と、帰宅道中の信号時間の両方の有効な制御方法について調べた。従っ

て、イベントからの帰宅全体としての最適を考えることができるため、総合的な群集マネジメントに役立つと考えられる。イベントを大きく「コンサート型」、「スポーツ型」に分け、二つのイベントの性質に注目して解析しているのも新しい要素である。

2 シミュレーションモデルと設定

2.1 モデル概要

本研究では、図 2.1 (上) に示すような東京ドームから水道橋駅東口までの帰宅シミュレーションを、時間と空間がともに離散的なセルオートマトン・フロアフィールドモデル^{*1} (図 2.1 (下))を用いて行った。なお、本シミュレータは独自に実装したものをを用いている。モデルの図の上段が1階、下段が2階に対応している。シミュレーションの入口はドームの出口である(図 2.1 の赤いピンのマーク)。ドームから退出した群集は、図 2.1 に矢印で示した経路を辿って駅に向かい、シミュレーションの出口である信号(図 2.1 の青いピンのマーク)を渡ると帰宅完了となる。(シミュレーションから消える)モデルの1セルは50 cm × 50 cm とする。人の歩く速度を1.25 m/s [7]とする

^{*1} 群集のモデルには、ソーシャルフォースモデルなど、人の細かい動きを表現できる連続時間・連続空間のもの存在する。しかし、本研究で行ったシミュレーションは広範囲・大人数の大規模なものであるため、計算時間を考慮してセルオートマトンモデルを選択した。

ため、モデル内での1ステップは0.4 [s]とする。本研究ではムーア近傍を採用しているが、縦横方向と斜め方向の移動時間の違いは考慮していない。これは、本研究のシミュレーションは縦横方向の直線経路が多く、定常的な流れとなっている時間が長いからである。また、本モデル上での移動は確率的であり、直線経路であっても斜め移動する可能性があるため、縦横方向と斜め方向の移動時間を同等に扱った方が、直線経路においてはむしろ自然な移動を再現できる。

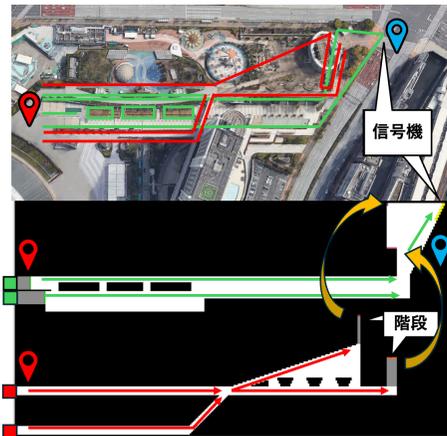


図 2.1: 実際のルート (Google Earth(上)とモデル(下))
上段に Google Earth 上で示したシミュレーション領域と、下段の上・下段の下で再現した歩行可能領域の輪郭を赤・緑で示した。下段の上・下段の下ではそれぞれ、1階・2階の歩行可能領域と、人の流れを緑・赤矢印で示した。またオレンジ色の矢印は階段の移動先を示している。

2.2 ドームからの退出について

1ステップあたりに群集が東京ドームから退出する人数の期待値をドーム退出率と定義する。1回で退出する人数は0~最大人数のランダムな値を採用している。最大人数とは、モデルの入り口の最大幅に相当し、1階は22人(図2.1(下)の緑の四角形)、2階は35人(図2.1(下)の赤い四角形)である。また、イベントを「コンサート型」と「スポーツ型」に分けた。スポーツ型イベントの場合、イベントの特徴上、試合終了後に観客は勝利した側の全観客(以下、勝者)と敗北した側の観客(以下、敗者)で分かれることになる。勝者の割合を勝者率と定義する。例えば野球の試合の場合、試合後には勝者のチームでヒーローインタビュー等が行われ、勝者はこれを見てから帰ると考えられることから、両方で帰り始めるタイミングが異なると考えられる。そこで、勝者は退出開始から15分後に退場を開始するものとした。

2.3 信号について

図2.1を見るとわかる通り、青のマーカー部分には水道橋駅東口への信号がある。そこで、本モデルでは出口部分を一定時間ごとに開閉する。青信号時間は現実のデータである40[s]に設定し、赤信号時間をパラメータとして変化させることとする。

2.4 混雑指標について

本研究における混雑指標 (Congestion Index, 以下 CI) を以下のように定義する。

$$CI = a \times (\text{全体帰宅時間}) + b \times (\text{個人帰宅時間}) + c \times \frac{1}{(\text{信号効率})} + d \times (\text{出口の最高密度})$$

a, b, c, d はそれぞれの指標の重み付けである。信号効率とは「青信号一定時間あたりに通過した人数」であり、これによって車道側の効率も考えられているため、常に青信号の状況が最適とはならない。以下では表記を簡単にするためドーム退出率・赤信号時間・全体帰宅時間・個人帰宅時間・信号効率・密度の最大値をそれぞれ $\lambda, \tau, T, I, S, D$ と表記することにする。また T, I, S, D のオーダーが揃うように、今回は $(a, b, c, d) = (1, 1, 10000, 10000)$ とした。

3 近似計算

CIを構成する4つの指標の近似式の導出について述べる。

3.1 Iについて

Iは以下のように分解できる。

$$I = (\text{信号機まで歩いてかかる時間}) + (\text{信号機付近で待たされる時間})$$

前者はシミュレーションデータから900ステップ(6 [min])程度と考えられる。そこで後者について考える。ドーム退出口から信号機手前までにいる人数は $\lambda \times 900$ で計算でき、シミュレーションデータから青信号100ステップ(40 [s])で渡ることができる人数は240人程度と考えられる。そのため、信号の一周期 $(100 + \tau)$ を用いると、Iは、

$$I = 900 + k_I \times \frac{\lambda \times 900}{240} \times (100 + \tau)$$

という式で表される。ドームから退出した人が信号機に到達するまでにすでに信号を通過してしている人もいると考えられる。 k_I はこの効果を表すパラメータであり、シミュレーションデータを用いて τ の関数として求められる。

3.2 T, Sについて

Tは次の様に分解できる。

$$T = (\text{全観客がドームから退出するまでの時間}) + (\text{最後の一人が帰宅にかかる時間})$$

前者は全観客数(5000人)をドーム退出率で割ることで得られ、後者は個人帰宅時間を用いることで計算できるので、

$$T = \frac{(\text{全観客数})}{\lambda} + k_T I$$

という式で表される。ただし k_T はシミュレーションデータを用いて τ の関数として求められるパラメータである。信号効率 S は T と τ を用いて

$$S = \frac{(\text{全観客数})}{T \times \frac{(\text{青信号時間})}{(\text{青信号時間}) + \tau}}$$

という式で計算される。

3.3 Dについて

密度が最大になるのは流入量と流出量が等しくなるときである。今、流入量はドーム退出率であり、流出量は信号機付近の人数、つまり密度に比例すると考えられるから、Dは

$$D = k_D \lambda$$

という式で表される。 k_D は τ の関数であり、シミュレーションデータを用いて求めることで計算できる。

4 コンサート型イベントの場合の結果

図 4.1(左) は実際にコンサートが行われた日時の信号機付近の群集密度の時間変化と、そこから推算される条件でシミュレーションした結果である。このシミュレーションでは、ドーム退出率を決定するために JST 未来社会創造プロジェクトで AI カメラを用いて計測されたデータを用いている。しかし、実際よりかなり小さい値となってしまうことが分かっているため、このプロットでは流入の観測データを 5 倍と 6 倍した条件でシミュレーションした結果を影付きプロットで載せている。これを見ると、シミュレーションによって実際のデータと同様の増減のタイミング、帰宅時間を再現できていることが分かる。データとシミュレーションの誤差原因としては 2 つ考えられる。1 つは本モデルではドーム退出率が常に一定であるが、現実ではドーム退出率は変化している可能性がある。2 つ目は、モデル内のエージェントは現実の人の挙動である他人と距離を取るために止まるといった動作を行わないことが挙げられる。これらは今後の課題である。

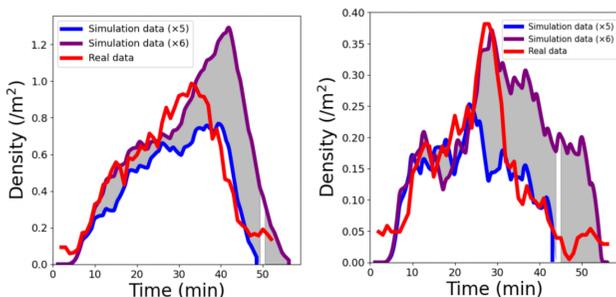


図 4.1: 信号機前の密度の時間変化 (コンサート型 (左), スポーツ型 (右))

図 4.2 は、シミュレーションから得られた赤信号時間とドーム退出率に対する CI のヒートマップである。赤の点は同ヒートマップにおいてドーム退出率を固定した断面における最小点、オレンジの点は同ヒートマップにおいて赤信号時間を固定した断面における最小点である。(すなわち、赤の点群とオレンジの点群が交わっている場所が、赤信号時間とドーム退出率の両方が可変であった場合に CI が最小となる条件である) また赤とオレンジの曲線はそれぞれ、3 節の近似関数を用いてシミュレーションとは無関係に CI の関数を求め、それをドーム退出率、赤信号時間いずれかを固定した 1 変数関数と見て CI を極小化するもう一方の値を連続的にプロットしたものである。

これを見ると、どちらの曲線もドーム退出率が小さく赤信号時間が大きい領域において、最小値の点群とずれが生じていることが分かる。この理由について考察する。

まずは赤信号時間固定の曲線がその領域においてデータと差がある原因を考察する。これは T の近似関数に原因があると考えられる。3.2 節で述べたように、 T は次式の様

$$T = \frac{(\text{全体人数})}{\lambda} + k_T I$$

I に λ に比例する項が含まれることから λ の増加に伴って第

一項が減少、第二項が増加するため T の近似曲線は下に凸となり、極小値を取るドーム退出率が存在してしまう。それゆえあるドーム退出率以上で一定となる実際のデータとの誤差が生じ、この傾向が赤信号時間が大きくなるにつれ顕著になるため、固定する赤信号時間が大きい領域ではドーム退出率がデータよりも大きい点で CI の近似曲線が極小値をとっていると考えられる。

次にドーム退出率固定の曲線がデータと差がある原因を考察する。これは D の近似関数に問題がある。3.3 節で述べたように、今回は密度を一次関数で近似した。しかし、赤信号時間が大きい領域ではドーム退出率がある一定値を超えると D はほぼ一定値を取る。これを一次関数で近似すると、図 4.3 のようにその影響で近似曲線の傾きが小さくなり、ドーム退出率が小さい領域ではデータより大きい値を近似値として計算してしまう。このため、固定するドーム退出率が小さいときは実際よりも小さい赤信号時間で CI が最小になっていると考えられる。

しかしある程度の精度はあり、この曲線を用いることで、例えばコンサート型イベントの際にドーム退出率が 3.56 [人/s] 付近になれば、赤信号時間は 80 [s] に調整すると良いとわかる。

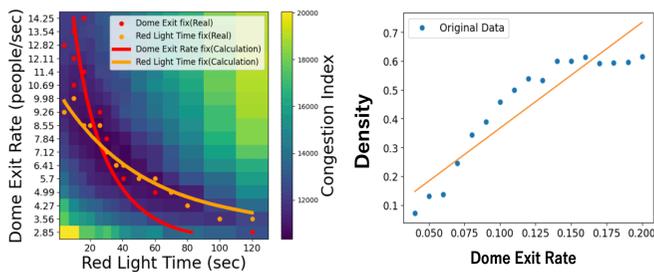


図 4.2: 混雑指標 CI のヒートマップ (コンサート型) 図 4.3: ドーム退出率と最高密度の関係 ($\tau=100$)

5 スポーツ型イベントの場合の結果

図 4.1(右) に実際に野球の試合が行われた際の信号機付近の群集密度の時間変化と、そこから推算される条件でシミュレーションした結果を載せる。この図を見ると、シミュレーションによって、敗者と勝者のファンでピークが二つある特徴、密度の増減のタイミング、帰宅終了時間などを再現できていることが分かる。

スポーツ型では、ドーム退出率と赤信号時間に加えて、三つ目のパラメータとして勝者率を考える必要がある。図 5.1 は、現実的に当てはまる場合が多いと考えられる 2 通りの勝者率についてコンサート型と同様のデータプロットを行った結果である。左が勝者率が 0.4, 右が勝者率 0.6 の場合である。多少ばらつきはあるものの近似曲線はヒートマップの特性を捉えている。これを見ると、コンサート型と比べて特にドーム退出率、赤信号時間が中程度のところではばらつきが大きいことが分かる。これはスポーツ型というイベントの特性が一番影響を与えるのが、この領域であるからであると考えられる。赤信号時間が短いところでは多くの人が信号を渡ることができるためド

ム退出率のばらつきの影響は小さく、また赤信号時間が長いところではドーム退出率にばらつきがあっても結局信号機付近で混雑するので影響は少ない。それに対し、15分というインターバルがある状況でドーム退出率、赤信号時間が中程度だと信号機前の群集密度がドーム退出率の影響を受けやすい。つまり、後から退出してくる勝者のドーム退出率のばらつきによって密度の時間変化の仕方もばらついてしまう。実際にシミュレーションデータを確認したところスポーツ型の密度のグラフはこの領域でばらつきが大きい傾向にあることがわかった。またこれによって近似曲線の精度も悪くなるためこの様な結果になったと考えられる。

しかしある程度の精度はあるため、この曲線から最適なパラメータを求めることができる。具体的には、現実では勝者率は席の予約状況から事前に推定できるため、ドーム退出率と赤信号時間の片方が定まればもう片方の最適な値を推算することができる。例えば、A対Bの試合でファン数が6:4であるときにAが勝ち、赤信号時間が100[s]であるとする、ドーム退出率は4.27[人/s]になるよう規制退場させるのが良いとわかる。

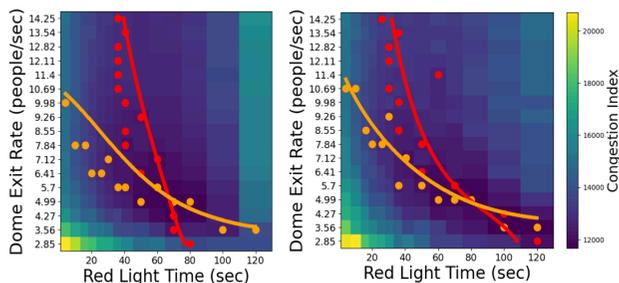


図 5.1: 混雑指標 CI のヒートマップ (スポーツ型)

6 コンサート型とスポーツ型の比較

最後に、コンサート型とスポーツ型の比較を行う。東京ドームは巨人のホーム球場であるので、巨人が勝利した時と敗北した時、つまり勝者率が0.6と0.4の2通りをスポーツ型では想定する。図6.1は3節で求めた近似式を用いて、CIをコンサート型とスポーツ型(勝者率0.4, 0.6)の3通りについて計算して値を比較し、最小値がコンサート型の場合は青色、勝者率が0.4の時は白色、0.6の時は赤色に色付けしたヒートマップである。これを見ればどの領域でどの場合が混雑が少ないかが分かる。例えば赤信号時間が現在実際に設定されている120[s]で固定されているとすると、巨人が勝利した時がドーム退出率に関わらず混雑が少ないということがわかる。この結果は、信号時間が長い時は信号機前で混雑が発生しやすいので、全体の6割の人数が時間を置いて退場する場合が一番混雑が少なそうであるという直感にも沿う結果である。

またこの図を用いれば、そのイベント会場がどのイベントに向いているのかを判定することができる。その会場の設計等からある程度の精度でドーム退出率は予測でき、その周辺の赤信号時間も同様に得ることができる。そのため、この二つの量から定まる点の図6.1における色を見れば、どのイベントで最も混雑が少ないのかを知ることができる。

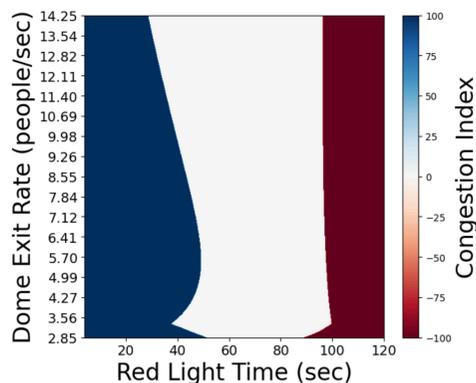


図 6.1: コンサート型とスポーツ型(勝者率0.4,0.6)のCIの比較

7 まとめと今後の課題

本研究では、東京ドームのイベントから帰宅する群集のシミュレーションを行い、その結果を実際に観測された群集密度と比較をすることにより、シミュレーションの妥当性を検証した。そして、全員が同時に帰宅するコンサート型と、ファンによってドーム退出のタイミングが異なるスポーツ型という二つのイベント様式の場合に、混雑指標を最小化するドーム退出率と駅前の赤信号時間の組み合わせを明らかにした。従って、本研究成果を用いれば、赤信号時間に応じて、最適な規制退場を実施することができる。またドーム退出率の制御が困難な場合には、逆に赤信号時間の適切な設定により混雑を緩和できる。さらに近似式を用いることでそのイベント会場がどのイベントに適しているかを判定する手法を示した。

将来的にはドーム退出率・赤信号時間を時間変化させられるようにし、実際にリアルタイムで東京ドームの混雑緩和に寄ることができるを目指す。また他人と距離を取るようなモデルをセルオートマトン上で考案し、よりモデルの精度を高めていきたい。東京ドームの場合、併施設設への誘導や、空いている分かれ道への誘導も混雑を緩和する上で大きな対策となりうるので、こうした視点からも今後研究を進めていきたい。

本研究は、JSPS 科研費 JP23K21019, JP23K20947 の助成及び JST 未来社会創造事業 JPMJMI20D1 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 佐藤信之: 通勤列車のはなし 東京・大阪, 快適通勤のために, 中央公論新社, 2017.
- [2] 丹羽了, 鷹見竣希, 重中秀介, 大西正輝 ”スタジアムにおける分散退場オペレーションの効果分析”, 第14回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM 2022), A33-3, 2015.
- [3] 大西正輝, 重中秀介, 山下倫央 ”大規模イベントにおける群集制御”, 特集: 「人間と相互理解できる次世代人工知能技術: 第1部『基盤技術編』」, 人工知能学会誌, Vol.34, No.6, p768-773, 2019.
- [4] 紙野桂人: 人の動きと街のデザイン, 彰國社, 1980.