

データ同化を用いた大規模イベントにおける分散退場の効果分析

Analysis of the effect of exit rules for safety
at a large-scale event using data assimilation

丹羽 了¹⁾²⁾ 鷹見 竣希¹⁾²⁾ 重中 秀介¹⁾²⁾ 大西 正輝²⁾¹⁾ 保高 徹生²⁾ 内藤 航²⁾
Ryo Niwa Shunki Takami Shusuke Shigenaka Masaki Onishi Tetsuo Yasutaka Wataru Naito

1 はじめに

COVID-19 流行下において、安全にイベントを開催するにはどのような対策が有効なのかを知ることはイベント主催者にとって重要な課題であり、対策の有効性は社会的にも関心が持たれている。大規模イベントでの感染症対策の一つとして、分散退場が実施されている。分散退場とは、イベント主催者が参加者に対して退場のタイミングや経路について指示・依頼を行うことであり、COVID-19 の流行に伴い感染リスクを下げるための混雑抑制方法として期待されている。観客数の制限以外の方法で混雑を解消することができれば、観客数を増やすことが可能となり、多くの人々がスタジアムなどでイベントを楽しむことができるとともに、イベントの収益をも向上することができる。これまでにも分散退場を採用するイベントはあったが、効果が定量的に明らかになっていないため、本格的な制御を行っていない場合が多いと考えられる。

本研究の目的は、実世界で行われた分散退場の計測データとシミュレーションを基に、分散退場の効果を明らかにすることである。実際に行われた分散退場の有効性や効果の特性を明らかにすることで、イベント主催者が分散退場を検討・導入・実施する際の一助となることを期待する。実世界の分散退場をシミュレーションを用いて評価するために、計測されたデータを入力した群衆シミュレーションでデータ同化し、歩行者の移動軌跡を再現する。データ同化はシミュレーション結果と計測データの誤差が最小となるようなパラメータを求める技術である。これにより、シミュレーションと現実の乖離を減らし、現実の状況をシミュレータ上でできる限り再現することができる。計測実験により会場全体の混雑を数値化するためには、多くの地点を計測する必要があるため、大きなコストがかかり現実的ではない。そこで、群衆シミュレータを用いて毎秒ごとの歩行者の座標を取得する(図 1)。シミュレーションによって実世界を模倣することで、低コストに分散退場の効果検証を行うことが可能である [1][2][3]。本研究では、シミュレーション結果から得た全ての歩行者の位置情報を用いて算出した混雑度について分析、考察を行う。

実験では、実際に東京ドームで行われた読売巨人軍の試合における分散退場を計測したデータを用いる。筆者らは、東京ドームで行われる野球の試合において、座席からの退場の様子とゲート付近の人の流れを計測する実験を継続している(図 2)。計測から得られる移動開始時刻データとゲート通過時刻データの 2 つのデータを用いて実験を行う。

本論文は次のように構成される。2 節では群衆制御に

- 1) 筑波大学。University of Tsukuba.
- 2) 産業技術総合研究所。National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

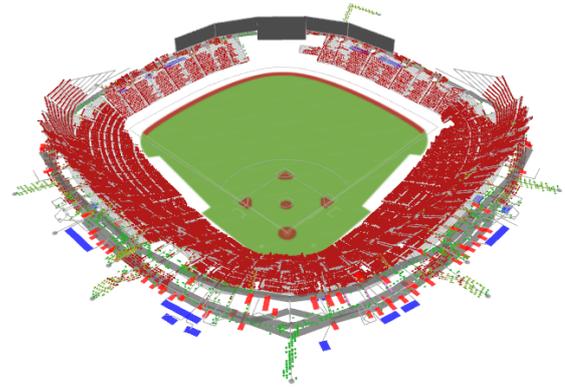


図 1 群衆シミュレータ CrowdWalk

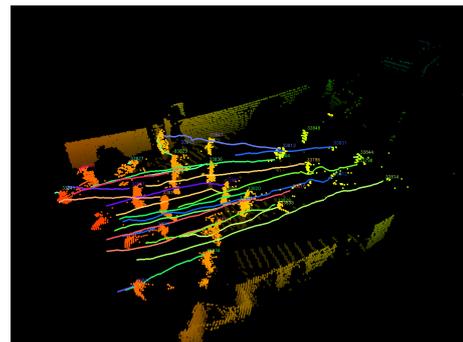


図 2 人流計測結果の一例

における分散退場や評価指標の位置づけ、用いる群衆シミュレータの特徴、データ同化の必要性、実験で扱う大規模人流データについて関連研究を説明する。3 節ではシミュレーションと評価指標について説明し分散退場の評価方法を示し、4 節で本研究におけるデータ同化の適用方法について説明する。5 節では実験目的、会場、データの詳細、実験設定について示す。6 節では実験で得られた結果を示し、分散退場の有効性、試合の得点状況や観客数による混雑度の違いについて考察する。最後に 7 節で本論文の結論、今後の展望について述べる。

2 関連研究

本節では、群衆制御における分散退場や評価指標の位置づけについて述べ、用いる群衆シミュレータの特徴、データ同化の必要性、人流計測手法について説明する。

2.1 群衆制御

分散退場は群衆制御の一つであり、群衆の歩行者行動に介入し出発時間を制御する方法である。群衆制御とは、群衆が移動し始める時刻や移動する経路などに対して、物理的な制御や情報提示、誘導を通じて群衆の移動に介入することである [4]。また、歩行者行動は Strategic Level, Tactical Level, Operational Level の

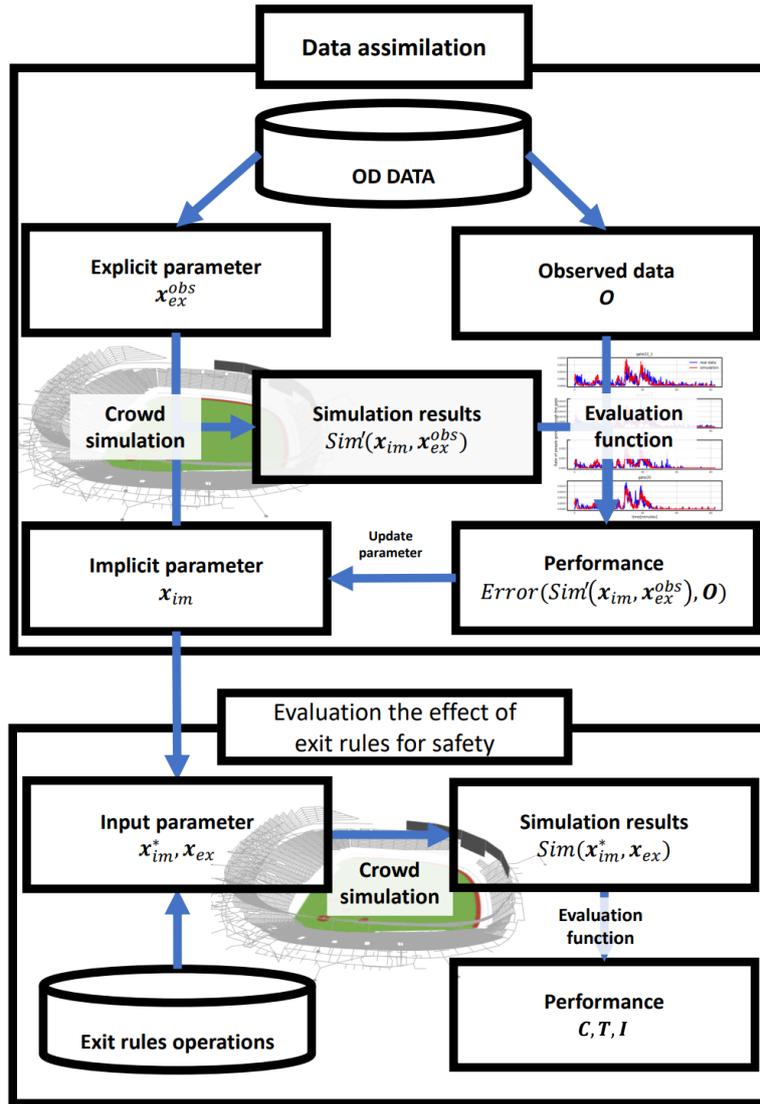


図 3 データ同化を用いた分散退場評価の流れ

3 つの段階に分類される [5]。歩行者のある特定の区間における行動を論じる際には、Strategic Level は行動を開始する前の意思決定で移動開始時刻や活動内容を選択する段階であり、Tactical Level は Strategic Level で決定した行動を達成するために、経路する出口や扉など経路を選択する段階である。Operational Level は Tactical Level で選択した経路上で、他人や障害物を回避する行動を行う段階である。分散退場は歩行者が行動を開始する前の意思決定に対してイベント主催者が影響を与え、歩行者の移動開始時刻の変更を依頼するものである。座席から退場ゲートへ移動する歩行者行動を対象として考えると、分散退場は Strategic Level に対する施策であると言える。Strategic Level での群衆制御は、主に移動開始時刻の制御である。避難を対象とした研究では、出口と移動開始時刻を最適化した結果、出口に近い人から順に移動を開始するのが良いことがわかっている [6]。また、スタジアムからの帰宅を対象とした研究では、勝利チーム側の退場を遅らせることで移動完了時間が短くなることがシミュレーションで示されている [7]。一方で、

状況によっては移動開始時刻を分散させるよりも、全員同時に移動を開始するのが良いという研究結果も報告されている [8]。これは、混雑による物理的圧力が事故を引き起こすレベルに達しない限り、移動開始時刻の分散による移動開始の遅れが、混雑によって生じる遅れより大きくなるためだと考えられる。高層建築物における火災発生時の避難では、火災発生階とその1つ上の階から避難させる順次避難が採用されている。この場合、必ずしも避難時間を短縮できるとは限らないものの、階段での合流による混雑を回避できる [9]。分散退場も同様に、Strategic Level での制御であることから以上の特徴と類似する特徴をもつ可能性が高い。実験を通してこれらの特徴が見られるかを明らかにする必要がある。

2.2 評価指標

一般的に群衆制御の評価指標には、効率性と安全性が用いられている。効率性では、移動時間や流量、速度などが用いられていて、安全性では、群衆の密度や密度をレベル分けした Level of Service [10]、合計接触回数などの混雑度に関する指標がある。Level of Service は Fruin

が定義したもので、歩行者の密度をもとに安全性を評価する基準である。近年では COVID-19 の流行に伴い感染者数を評価している研究もあり、合計接触回数は感染率を算出する際にも用いられる指標である。本研究では、COVID-19 の影響から分散退場が盛んになった背景を踏まえて、合計接触回数を評価指標として用いる。また、感染率はウイルスの特性に応じて算出する必要があるが、合計接触回数は各イベントの感染リスク単体を評価することができる。したがって、合計接触回数はイベント主催者視点のリスクを考えることから、本研究で用いる評価指標として適している。

2.3 群衆シミュレータ

手軽に利用可能な群衆シミュレータには、構造計画研究所の artisoc (教育向けは無償) [11] や A & A 社の SimTread[12], Bentley 社の LEGION[13], または汎用的なマルチエージェントシミュレータの NetLogo[14] などがある。本研究では、人の流れを分析するために 1 次元歩行者シミュレータ CrowdWalk[15] を用いてシミュレーションを行う。CrowdWalk は 1 次元歩行者モデルが採用されているため、他のモデルよりも高速でシミュレーションを行うことができる。実験では、2 万人近くの大規模なシミュレーションをデータ同化の際に繰り返し計算する必要があるため、計算コストの低い CrowdWalk が適している。

2.4 データ同化

データ同化は天気や海洋情報などの自然現象の再現に用いられる手法である。自然現象を計算機上で再現する際に、実世界全体を計測して入力として与えることが難しいため、データ同化を用いて計測することができないデータを補完する。群衆制御でも同様の問題があり、重中らはカメラや GPS による計測データに群衆シミュレーションの結果を同化することで、イベントの群衆を高精度に再現することに成功している [16]。本研究では、計測できない入力値を補い、シミュレーションの精度を向上させるために重中らと同様の手法を用いてデータ同化を行う。

2.5 人流計測

一般的に群衆移動の計測手法としては、手動、Wi-Fi, Bluetooth, カメラ, GPS, LiDAR(Light Detection And Ranging)などが挙げられる。2次元の画像からは3次元の位置を計測するのは困難であるが、LiDARは3次元空間における点群を計測でき、比較的容易に群衆の算出が可能である。有効距離は最大 100 メートル程度であり、1 秒以下の精度で人流計測が可能である。本研究では実験対象である東京ドームにおける数万人規模の群衆を対象として、継続的な計測を行うため観客席からの退場はカメラ、ゲートからの退場は LiDAR を用いた。

3 分散退場評価

提案手法は、データ同化によりシミュレーションで再現した全ての歩行者の位置情報から混雑度を算出し、分散退場の効果分析をする。図 3 にデータ同化を行い、分散退場の効果分析を行うまでの流れを示す。実世界の分散退場を評価するために、まず計測されたデータ(OD DATA)を用いて群衆シミュレーションに与えるパラメータをデータ同化する。データ同化ではシミュレーション結果と計測データの誤差が最小となるようなパラメータを求める。次にデータ同化をして得られたパラ

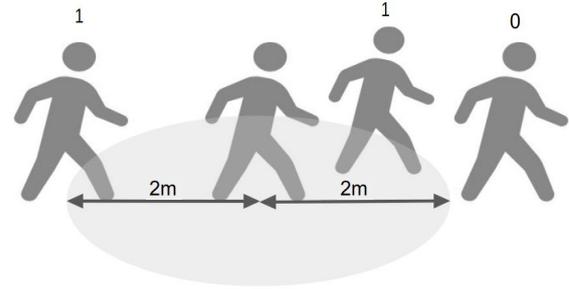


図 4 合計接触回数の算出イメージ

メータでシミュレーションを行い、歩行者の軌跡を再現、歩行者の位置関係を取得することで3つの評価指標を算出する。

本節では、大規模イベントにおける分散退場のシミュレーション方法と、用いる評価指標について示し、次節で現実との乖離を減らすために行うデータ同化について説明する。

3.1 シミュレーション

利用する群衆シミュレータ CrowdWalk に計測データなどを入力し、シミュレーションを行い、歩行者の座標情報を取得する。CrowdWalk は \mathbf{x}_{im}^* と \mathbf{x}_{ex} を入力として受け、 $sim(\mathbf{x}_{im}^*, \mathbf{x}_{ex})$ を出力する。シミュレータの入力パラメータについて表 1 に示す。 \mathbf{x}_{im}^* は 4 節に示すデータ同化によって推定される未知のパラメータであり、寄り道を再現するために必要となる。 \mathbf{x}_{ex} は計測や今までの研究などで明らかにされている既知のパラメータであり、観客数や移動開始時刻データ、退場方法などが該当する。 $sim(\mathbf{x}_{im}^*, \mathbf{x}_{ex})$ は毎秒ごとのエージェントの座標や退場に要する時間であり、集計することにより次項で説明する合計接触回数 C を算出できる。

表 1 シミュレータの入力パラメータ

変数	具体的な値
\mathbf{x}_{im}^*	移動開始後待機率, 移動開始後待機位置
\mathbf{x}_{ex}	観客数, 退場方法, 移動開始時刻データ

3.2 分散退場の評価指標

評価指標として合計接触回数 C , 改善度 I , 退場に要する時間 T を用いる。合計接触回数は感染率など同様に感染シミュレーションの評価に用いられる指標である。改善度は一斉退場と分散退場の合計接触回数の差によって計算される。退場に要する時間はシミュレーション上で退場がすべて完了するまでにかかった時間である。合計接触回数の評価式は、エージェント間のユークリッド距離が閾値を下回った回数によって計算される。式 (1) $d_{i,j}(t)$ は歩行者 i と j のユークリッド距離, 式 (2) C は接触合計回数を表す。

$$d_{i,j}(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2} \quad (1)$$

$$C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^i \begin{cases} 1 & (\text{if } d_{i,j}(t) < 2) \\ 0 & (\text{else}) \end{cases} \quad (2)$$

T はシミュレーションの全体時間, N は観客数, (x, y) は座標情報を表している. 接触回数は観客の距離が 2m 以内の時に加算される. 2m という距離は, 厚生労働省が示した飛沫感染防止のために取るべき距離である [17]. また, 世界保健機関 (World Health Organization:WHO) は physical distancing として少なくとも 1m の距離を確保すべきと提唱している [18]. そのため, 両者に当てはまる 2m を採用した. 毎秒全てのエージェントに対して接触回数を計算し, T 秒間の接触回数の総和が合計接触回数となる. 本評価指標は, 全ての歩行者の接触合計回数の総和であり, 接触回数を 0 に近づくほど混雑が少ない. また, イベント参加者視点ではなくイベント主催者視点であり, イベントを開催する際に発生するリスクを考えるための指標となっている.

改善度 I は一斉退場と分散退場の合計接触回数の差で計算される.

$$I = C_{no\ rule} - C_{rule} \quad (3)$$

$C_{no\ rule}$ は一斉退場を行った際の合計接触回数であり, C_{rule} は分散退場を行った際の合計接触回数である. この指標は分散退場によってどれほど混雑が解消されたかを表す.

4 データ同化

本節では, データ同化の概要と本問題への適用方法について示す.

4.1 概要

重中らが提案した群衆に対するデータ同化手法を用いて, シミュレーション結果と実際の計測データの誤差が最小となるようなシミュレーションの入力値である未知のパラメータを推定する [16]. この手続きは, 図 3 に示した分散退場評価の流れの上部にあたる. シミュレータ CrowdWalk に \mathbf{x}_{ex} と \mathbf{x}_{im} を入力し, $sim'(\mathbf{x}_{ex}, \mathbf{x}_{im})$ を出力させる. \mathbf{x}_{ex} は既知のパラメータ, \mathbf{x}_{im} は推定する未知のパラメータである. $sim'(\mathbf{x}_{ex}, \mathbf{x}_{im})$ はシミュレーションから出力されるゲート通過時刻データで, シミュレーションの精度を評価する際に用いる. シミュレーション結果 $sim'(\mathbf{x}_{ex}, \mathbf{x}_{im})$ と答えとなる観測データ \mathbf{O} の誤差 $Error$ を算出し, シミュレーションの精度を評価する.

$$\arg \min_{\mathbf{x}_{im}} Error(sim'(\mathbf{x}_{ex}, \mathbf{x}_{im}), \mathbf{O}) \quad (4)$$

評価結果とともに最適化アルゴリズム CMA-ES を用いて, パラメータ \mathbf{x}_{im} を更新する. 以上の操作を繰り返し, 誤差が最小となるパラメータを求める.

4.2 分散退場再現への適用

ここでは観客席からの離席とゲートから退出するタイミングは計測できているもののトイレなどのその途中の寄り道の行動は計測できていない. そこで本研究では歩行者の寄り道の行動を対象としてデータ同化手法を適用する. ここでは同化対象のパラメータと誤差関数について示す.

歩行者は寄り道をするものである. 寄り道は家や会社などの最終目的地の他に道端の自販機やお店, トイレ, ごみ箱などの小さな目的地へ向かうことである. シミュレーションでは移動開始時刻と最終目的地だけでは寄り

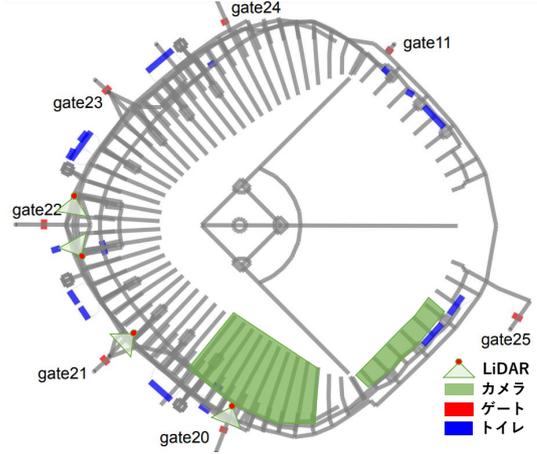


図 5 東京ドームのマップ

道を表現することはできない. これは, 小さな目的地の場所や所要時間に関するパラメータを入力することで解決できる. 本研究では, 小さな目的地をトイレとした.

\mathbf{x}_{im} はトイレの利用率と利用場所, \mathbf{x}_{ex} に各試合の移動開始時刻データや観客数が入る. \mathbf{x}_{ex} は座席をカメラで計測することによって算出可能である. シミュレーションは CrowdWalk を用いる. 評価指標算出に必要な観測データ \mathbf{O} にはゲートを LiDAR で計測し算出したゲート通過時刻データを代入する. パラメータの詳細を表 2 にまとめる.

表 2 データ同化のパラメータ

変数	具体的な値
\mathbf{x}_{im}	トイレの利用率, 利用場所
\mathbf{x}_{ex}^{obs}	各試合の移動開始時刻データ, 観客数
\mathbf{O}	ゲート通過時刻データ

評価指標 $Error$ には式 (5) の平均二乗偏差 (RMSE) を用いる.

$$Error = \sqrt{\frac{1}{LK} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K (sim'_{l,k}(\mathbf{x}_{im}, \mathbf{x}_{ex}) - o_{l,k})^2} \quad (5)$$

$$K = \frac{T}{\Delta t} \quad (6)$$

T は退場に要する時間, K は評価回数, Δt は評価時間間隔である. $L = 4$ は設置された LiDAR の数を表す. $o_{l,k} \in \mathbf{O}$ は l 番目の LiDAR の k 番目の通過人数である. ここでは, $\Delta t = 15$ 秒ごとに誤差の評価を行う.

5 実験

提案手法を用いて, 東京ドームで実際に行われた巨人戦に対して, 分散退場の有効性と試合時間や観客数による分散退場の効果の違いを評価する. 本節では東京ドームの特性や計測データの詳細, データ同化の結果, 実験設定について示す.

5.1 東京ドーム

実験で扱う東京ドームの構造や再現したシミュレータ環境について示す. 東京ドームは, 野球やコンサート,

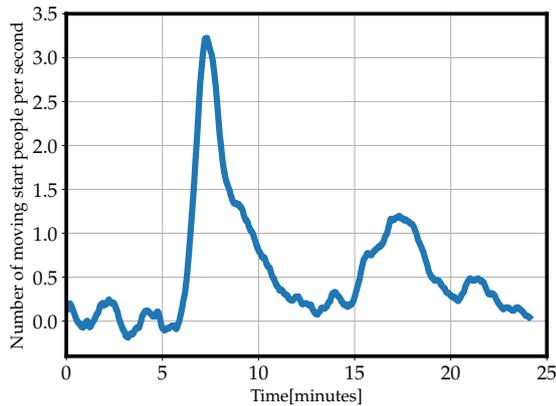


図6 内野席における時間あたりの退席者人数

展示会など年間を通して多種多様なビッグイベントが開催される。本研究では野球の試合を分析対象とした。野球試合時の収容人数はおよそ 43,000 人で、3 層の座席と 4 層のコンコースで構成される。屋根膜を支えるための気圧管理が必要であるため、ゲートは回転扉を採用している。回転扉は 1 つのゲートに 2~5 基設置されているが、一箇所につき 1 人ずつしか通れないため広い出口に比べてボトルネックになりやすい。シミュレータ環境は、上記の特徴を踏まえ、地図を参考に東京ドームの構造を再現した。座席につながる通路やコンコース、ゲート、階段に加えてデータ同化によるパラメータ推定の対象としたトイレについても実装を行った。図 5 のように実際の東京ドームのゲートやトイレの配置を再現した。

5.2 計測内容

次に、シミュレーションやデータ同化で利用する大規模な人流データの計測方法について詳細を示す。計測データは、移動開始時刻データとゲート通過時刻データの 2 種類があり、それぞれコロナ禍の 2021 年に計測した 15 試合分のデータを使用して実験を行った。この 2 つのデータには 1 秒単位で人の動きが計測されており、人流の大規模なデータとして価値の高いものである。

移動開始時刻データは座席を 4K ビデオカメラで撮影し¹⁾、映る人数の変化から退場人数を算出したものである。図 5 の緑の領域で表す箇所を撮影した。図 6 は内野の座席を計測した移動開始時刻データの例である。大きく 2 つの山に分かれており、分散退場が行われていたことがはっきりとわかる。最初に帰る人の方が多く、後に帰るグループは約 10 分ほど間隔を開けて退場を始めている。各試合毎に計測した図 6 のようなデータを移動開始時刻として実験に使用する。

ゲート通過時刻データはゲート付近の通路を LiDAR で計測したものである。LiDAR は東京ドームに常設されており、ゲート付近の混雑具合を計測している。図 5 に示したようにメインゲートである 22 ゲート付近に 2 台、20、21 ゲート付近にそれぞれ 1 台ずつ計 4 台設置されている。

5.3 データ同化結果

同化前と同化後のシミュレーション結果とゲート通過時刻データの誤差を図 7 に示す。青が同化前の誤差、赤が同化後の誤差である。すべての日付においてデータ同

1) 撮影についてはホームページやコンコースの張り紙で告知し、個人が特定できない程度の解像度のカメラ映像を取得した。

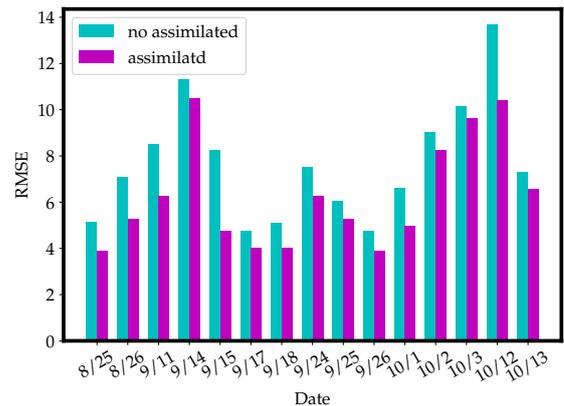


図7 データ同化によるシミュレーション誤差の改善

化によって誤差が改善していることが確認できる。この同化後のパラメータを用いて実験を行う。

5.4 シミュレーション実験設定

試合時間や観客数による分散退場の効果の違いと分散退場の有効性を評価するため、東京ドームにおいて計測した値と、データ同化した値を取り込んでシミュレーション実験を行う。

シミュレータの入力パラメータは 3.1 節で示した表 1 の通りである。 x_{im}^* の移動開始後待機率や移動開始後待機位置はデータ同化により推定されたパラメータである。移動開始後待機率は、移動開始後にトイレを利用してから退場する人数の観客数に対する割合であり、移動開始後待機位置は、移動開始後にどのトイレを利用するかを表す。 x_{ex} の観客数や退場方法、移動開始時刻データは主に計測して得られた値を入力する。移動開始時刻データは 1 秒単位で観客一人ひとりが座席から移動を開始する時刻をまとめたものである。15 試合分の計測データがあり、それぞれについて実験を行う。

計測して得られた移動開始時刻データは実際に分散退場を実施した際のデータであり、この値を利用してシミュレーションを行うことで、試合時間や観客数の違いによる混雑度の違いを得ることができる。また、実際に分散退場した際の計測データを一斉退場した時の状況を想定した仮想データに置換し、一斉退場した際にどのような状況になるか再現する。一斉退場を想定した仮想データは観戦者数と下限を 0 上限を 1,800 (30 分 × 60 秒) とする切断正規分布 $N(\mu = 900, \sigma = 300)$ の確率密度によって作成する。このデータによるシミュレーション結果を分散退場時のシミュレーション結果と比較することで分散退場の有効性を評価する。したがって、15 試合分の計測データに対して、分散退場時と一斉退場時の 2 パターン、計 30 シミュレーションを行った。

6 結果・考察

本節では、実験で得られた結果を示し、分散退場の有効性、試合の得点差や観客数による混雑度の違いについて考察する。

図 8-9 は各試合の合計接触回数と退場に要する時間である。それぞれ青が分散退場、水色が一斉退場を示す。図 10 は各シミュレーションの分散退場による混雑

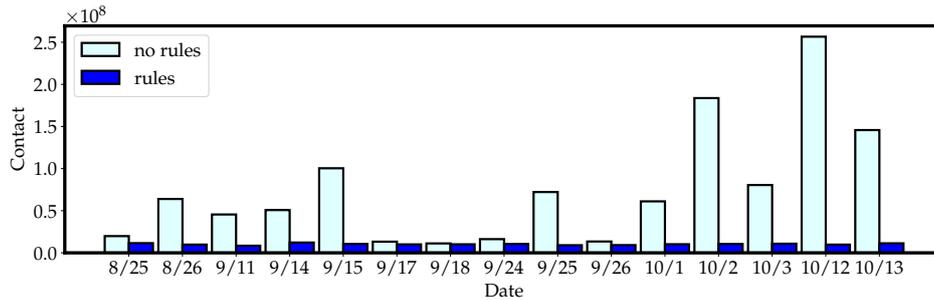


図 8 合計接触回数

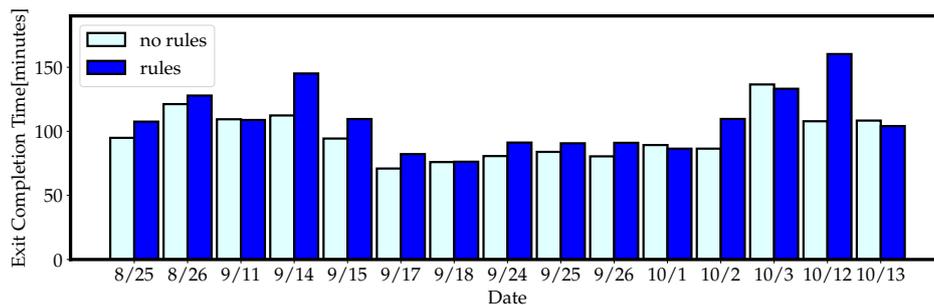


図 9 退場に要する時間

の改善度を示す。縦軸は改善度 I を表し、横軸は (a) が観客数, (b) が得点差, (c) が試合の時間帯を表す。図 11(a)–(c) に分散退場実施時の合計接触回数 C をまとめた。縦軸は (a)–(c) が合計接触回数 C を表し、横軸は (a) が観客数, (b) が得点差, (c) が試合の時間帯を表す。図 10–11 は、赤がデイゲーム、青がナイトゲームを表し、色が濃いほど観客数が多いことを示す。

本実験で明らかになった 7 つの項目について以下でそれぞれ考察する。

(1) 分散退場は混雑緩和に対して有効

図 8 は対象とした試合ごとの分散退場 (青)、一斉退場 (水色) を比較したグラフであり、全試合を通して分散退場の方が合計接触回数 C が少ないことを示している。分散退場の効果により合計接触回数は最大で 96% 減少することがわかった。また最小でも 10% の合計接触回数削減に貢献している。このことから、分散退場は混雑緩和に対して明らかな効果があることがわかる。

分散退場を行った場合の合計接触回数 C は、一斉退場を仮定した場合の合計接触回数 C の多少に関わらず同程度の回数まで削減できることが確認できる。したがって、推定される合計接触回数 C の多い日ほど、分散退場の効果は大きくなる。イベントの主催者は混雑が見込まれる日を見極め、分散退場を行うかどうかを判断することにより、分散退場にかかるコストを削減することができる。そこで分散退場の効果が高くなる日や混雑が見込まれる日は、どのような条件かを以降 (3) から (7) で考察する。

(2) 分散退場は退場完了時間に対して非効率

図 9 より一斉退場 (水色) の場合に対して、分散退場 (青) は退場に要する時間が平均で 11 分 24.6 秒長くなっていることがわかる。これは退場に要する時

間に対する効率という側面においては、分散退場が一斉退場に劣ることを意味する。関連研究で示したとおり、混雑による物理的圧力が事故を引き起こすレベルに達しない限り、移動開始時刻の分散による移動開始の遅れの方が混雑による遅れよりも大きくなることが報告されている [8]。本実験でも同様に、移動開始時刻の分散が退場に要する時間を長くするという結果になった。したがって、合計接触回数 C だけではなく退場完了時間についても考慮する場合は、分散退場の実施の有無や内容を検討する必要がある。

(3) 観客数が多い時に分散退場が効果的

ここでは分散退場の効果が高くなる日という側面から考察する。図 10 (a) を見ると、観客数が増加するに連れて改善度 I が上昇しているのがわかる。改善度と観客数の相関係数は 0.88 であり、正の相関が強い。つまり、分散退場は観客数が多いほど効果が大きいことを示している。観客数が多い試合は混雑が発生しやすいため、分散退場で解消できる混雑が多くあるからとも考えられる。このことから、観客数が多い試合は分散退場は行われるべきだといえる。

(4) 得点差が小さい時に分散退場が効果的

図 10 (b) を見ると、得点差が 0 に近い場合に改善度 I が大きくなっている。特に得点差が 0 で引き分けの時は改善度 I が平均的に大きくなっている。得点差が 1 以上の時の改善度の平均を 100% とすると得点差 0 の時の改善度の平均は 64.7% 大きい。これは、試合が拮抗していて観客が最後まで試合から目を離すことができないため、試合終了直後に移動開始する人が多くなっていると考えられる。得点差が 0 でなくても改善度 I が高い 2 試合は、どちらも観客数が非常に多い時であったため、得点差に加え観客

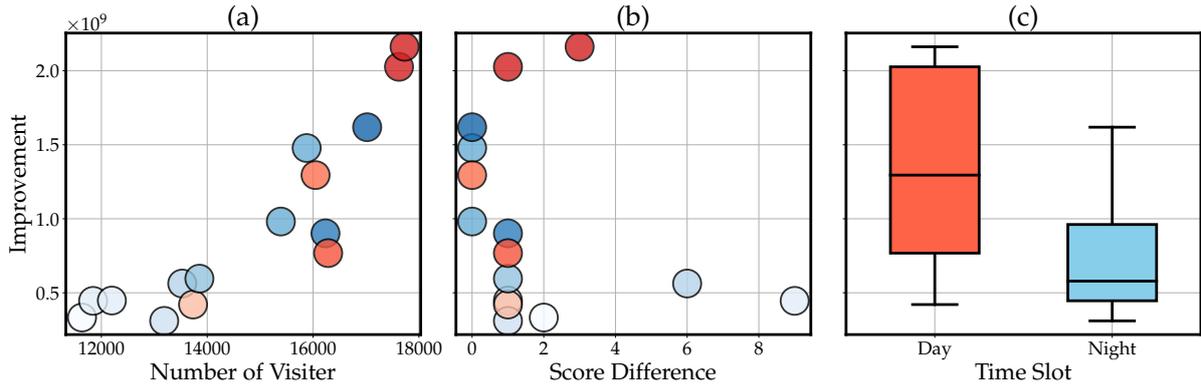


図 10 分散退場による混雑の改善度 $I = C_{no\ rule} - C_{rule}$. 各点の濃度が濃いほど観客者数が多い. 赤はデイゲーム, 青はナイトゲーム.

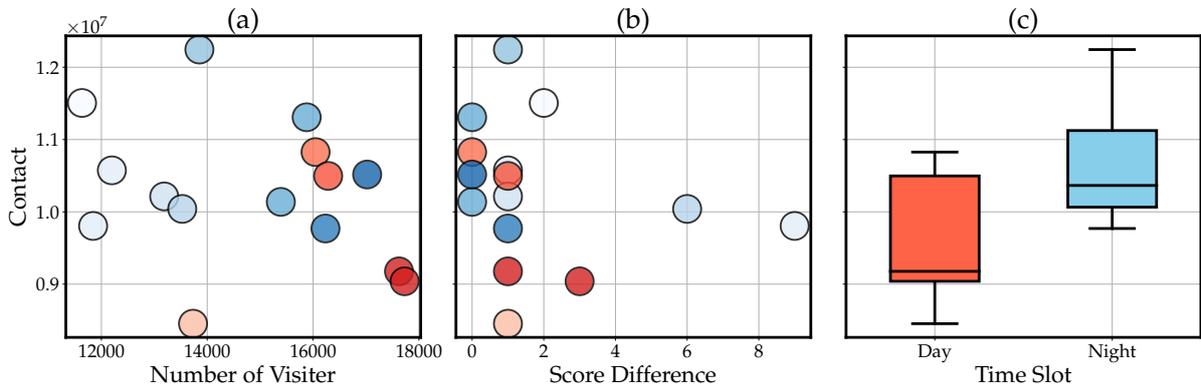


図 11 データ同化したシミュレーションから算出した合計接触回数 C . 各点の濃度が濃いほど観客者数が多い. 赤はデイゲーム, 青はナイトゲーム.

数の影響を強く受けこの結果になっていると考えられる.

(5) デイゲームの時に分散退場が効果的

図 10 (c) は改善度を, 試合終了時刻が夕方であるデイゲームと試合終了時刻が夜であるナイトゲームに分けて箱ひげ図にまとめた. デイゲームの方がナイトゲームよりも改善度が大きいことが多い. ナイトゲームの改善度の平均を 100%とすると, デイゲームの改善度の平均は 73.9%大きいという結果になった. 土日祝日に行われる野球の試合はデイゲームであることが多い傾向と, 休日の方が平日よりも集客が伸びやすい傾向があり, 2 つの傾向が重なった結果であると考えられる.

したがって, 観客数が多い, もしくは得点差が小さい状態で試合終了を迎える場合とデイゲームの試合はより慎重に分散退場のオペレーションを行う必要があると考える.

(6) 得点差が小さい時に高確率で混雑発生

分散退場をした上で混雑が見込まれる日という側面から考察するため, データ同化したシミュレーションから算出した合計接触回数 C を図 11 に示す. 分散退場を行った結果同士を比較し分散退場の効果について考察する. 図 11 (b) から得点差の多い試合では, 比較的合計接触回数が少ないことが読み取れる. これは圧倒的な得点差により試合結果が予想できる場合, 先に帰ってしまう人が多いことの影響が

考えられる. 得点差が 0 の試合の合計接触回数の平均を 100%とすると得点差 1 以上の合計接触回数の平均は 5.5%大きい. また, デイゲーム (赤) とナイトゲーム (青) を分けて見るとよりはっきり得点差が多い場合に合計接触回数が少ないことがわかる. これはデイゲーム (赤) とナイトゲーム (青) の影響を強く受けていることを示す.

(7) デイゲームの時に高確率で混雑発生

図 11 (c) では合計接触回数についてデイゲーム (赤) とナイトゲーム (青) に分けて箱ひげ図にまとめた. デイゲームの合計接触回数 C は, ナイトゲームの合計接触回数 C と比較して少ない傾向にあることがわかる. デイゲームの合計接触回数の平均を 100%とすると, ナイトゲームの合計接触回数の平均は 10.1%大きいという結果になった. つまり, ナイトゲームよりデイゲームの方が分散退場は効果を発揮することがわかる. 理由として, ナイトゲームは夜遅くに終わるため早く帰りたい人が多く, デイゲームは夕方終わるため時間に余裕のある人が多いことが挙げられる. そのため, ナイトゲームでは早く帰りたい人が試合終了間際に一斉に帰り, 混雑が発生してしまっていると考えられる.

結果として混雑が見込まれる日と (3)-(5) で示した分散退場の効果が高くなる日は同様の傾向を示すことが確認された. 効率良い退場オペレーションを検討するためには, 両方の側面から事象を観察する

ことでより実践的な条件を見出すことができると考える。

7 おわりに

本論文では、データ同化を用いた分散退場の評価手法を示し、実際の分散退場を評価しその結果について考察をした。そして、得られた実験結果に基づき、以下の分散退場の有効性およびその効果・特徴を明らかにした。

- (1) 分散退場は混雑緩和に対して有効
- (2) 分散退場は退場完了時間に対して非効率
- (3) 観客数が多い時に分散退場が効果的
- (4) 得点差が小さい時に分散退場が効果的
- (5) デイゲームの時に分散退場が効果的
- (6) 得点差が小さい時に高確率で混雑発生
- (7) デイゲームの時に高確率で混雑発生

以下で今後の展望について述べる。今回の実験では最大 17,729 人の計測結果を扱った。東京ドームは野球試合開催時の収容人数はおよそ 43,000 人である。今回の実験で扱った観客数よりも多くの観客数を収容する時に分散退場はどのような結果になるのかを明らかにする必要がある。また統計的に意味のある分析をするためには、より多くのサンプルが必要である。

本論文では東京ドームについて計測し分析を行ったが、様々な構造のイベント会場がある。東京ドーム以外のイベント会場でも分析を行い、構造による違いがあるのか、どういった違いなのかを調査することが望まれる。

分散退場オペレーションを実行するためには観客を待たせる必要があり、誘導員や掲示、アナウンスなどのコストがかかる。一般に効果とコストはトレードオフの関係にあり、その 2 つについて最適化を行いパレート解を得ることができる。パレート解を得ることで分散退場オペレーションの実行を考える際にかけることのできるコストを考慮して最適な分散退場オペレーションを選択することができる。今後よりよい分散退場オペレーションを選択できるようにするためには、効果とコストの関係について研究されることが望まれる。

観客視点で分散退場を見ると、早い時間に帰ることができる観客とできない観客がいることから不公平感が生まれる。その不平等性についてどのように対処するのか主催者に求められる。この不平等性を解決することはスタジアムやドームで行われるエンターテインメントの質向上につながるため、今後解決することが望まれる。解決策の方向性の一つとして、強制的な指示ではなく歩行者の行動に影響を与え、観客自らが判断した結果で擬似的な分散退場を実現することであれば、不平等感を解決できる見込みがある。そのような直接的ではなく間接的に歩行者の行動に影響を与える方法もこれから検証されるべきである。

謝辞

本研究を行うにあたりデータ取得のために読売新聞東京本社、読売巨人軍、東京ドームの協力を得た。この成

果の一部は、国立開発研究法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。

参考文献

- [1] 山下倫央, 副田俊介, 大西正輝, 依田育士, 野田五十樹ほか. 次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用. 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 7, pp. 1732–1744, 2012.
- [2] Tomohisa Yamashita. Exhaustive testing of evacuation plan with high-speed evacuation simulator. In *International Scientific and Technical Conference Emergency Evacuation of People from Buildings*, pp. 357–364, Mar. 2011.
- [3] Alessandro Pluchino, Cesare Garofalo, Giuseppe Inturri, Andrea Rapisarda, and Matteo Ignaccolo. Agent-based simulation of pedestrian behaviour in closed spaces: a museum case study. *arXiv preprint arXiv:1302.7153*, 2013.
- [4] 西田遼, 重中秀介, 加藤優作, 大西正輝. 群集シミュレーションによる歩行空間設計と制御に関する研究動向. 人工知能学会論文誌, Vol. 37, No. 2, pp. J-LB1_1, 2022.
- [5] Milad Haghani and Majid Sarvi. Crowd behaviour and motion: Empirical methods. *Transportation research part B: methodological*, Vol. 107, pp. 253–294, 2018.
- [6] Ahmed Abdelghany, Khaled Abdelghany, Hani Mahmassani, and Wael Alhalabi. Modeling framework for optimal evacuation of large-scale crowded pedestrian facilities. *European Journal of Operational Research*, Vol. 237, No. 3, pp. 1105–1118, 2014.
- [7] 高島凌. 京セラドーム大阪から創造する効果的な退場方法. 第 15 回 MAS コンペティション, 2020.
- [8] Milad Haghani, Majid Sarvi, and Liam Scanlon. Simulating pre-evacuation times using hazard-based duration models: Is waiting strategy more efficient than instant response? *Safety science*, Vol. 117, pp. 339–351, 2019.
- [9] Jeongin Koo, Yong Seog Kim, Byung-In Kim, and Keith M Christensen. A comparative study of evacuation strategies for people with disabilities in high-rise building evacuation. *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, No. 2, pp. 408–417, 2013.
- [10] JOHN JOSEPH FRUIN. *Designing for pedestrians a level of service concept*. Polytechnic University, 1970.
- [11] Mas コミュニティ-構造計画研究所. <https://mas.kke.co.jp/>. (Accessed on 06/09/2022).
- [12] Simtread. <https://www.aanda.co.jp/products/simtread/>. (Accessed on 06/09/2022).
- [13] Legion pedestrian movement modeling & simulation software. <https://www.bentley.com/en/products/brands/legion>. (Accessed on 06/09/2022).
- [14] U Wilensky. Netlogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. (Accessed on 06/09/2022).
- [15] Crowdwalk. <https://github.com/crest-cassia/CrowdWalk>. (Accessed on 06/09/2022).
- [16] 重中秀介, 大西正輝, 山下倫央, 野田五十樹. データ同化を用いた大規模人流推定手法. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 101, No. 9, pp. 1286–1294, 2018.
- [17] 厚生労働省労働基準局安全衛生部長. 新型コロナウイルス感染症の大規模な感染拡大防止に向けた職場における対応について (要請). 厚生労働省, 2020.
- [18] World Health Organization. Overview of public health and social measures in the context of covid-19. *Interim guidance*, 2020.