



Title	大規模イベント終了後の群集制御に関するマルチエージェントシミュレーションの適用性
Author(s)	高橋, 彰; 安福, 健祐; ヘガジー, ムハンマド
Citation	日本建築学会計画系論文集. 2024, 89(819), p. 808-817
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/100990
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

大規模イベント終了後の群集制御に関する マルチエージェントシミュレーションの適用性

APPLICABILITY OF MULTI-AGENT SIMULATION FOR CROWD CONTROL AFTER A LARGE-SCALE EVENT

高橋 彰^{*1}, 安福 健祐^{*2}, ムハンマド ヘガジー^{*3}
Akira TAKAHASHI, Kensuke YASUFUKU and Muhammad HEGAZY

This study aims to assess the applicability of multi-agent simulation for crowd control after large-scale events. It focuses on pedestrian pathways around a stadium in urban area. By utilizing real-world pedestrian flow data, we investigated the parameters essential for simulation and analyzed crowd control. Consequently, we identified critical simulation parameters, such as speed-density relationships and personal distance, which produced highly accurate results across different days. In terms of congestion control, we established an acceptable congestion range based on data and illustrated that averaging peak bottleneck flows effectively alleviates congestion using the simulation.

Keywords: multi-agent simulation, large-scale events, normal conditions, crowd control

マルチエージェントシミュレーション, 大規模イベント, 平常時, 群集制御

1. はじめに

スポーツ観戦やコンサートなどの大規模イベントでは、開始前と終了後に一斉に人が移動するため、施設内はもとより施設周辺の公共交通機関につながる歩行者通路などで群集の集中が発生する。群集の集中は重大な事故などにつながる可能性があるため^{注1)}、そのリスクを評価するとともに、適切な群集制御によりリスクを低減する方策が求められている。一方で、群集警備などのリスク管理の多くは熟練者の経験や知恵に基づいて行われることが一般的であり、科学的に体系化されているとは言い難く、科学的研究の知見を取り入れることが期待されている^{注2)}。そうした中で、マルチエージェントシミュレーション（以下、MAS）^{注3)}は、群集制御の安全性や効率性の評価に有効な手法の一つとして注目されている。しかしながら、MAS 利用の議論の中心は、火災や地震など緊急時の避難計画のシミュレーションで行われており^{注4)}、大規模イベントの群集制御の MAS の適用事例は限られており^{注5)}、実際のイベントの群集を計測したデータを基に安全性を評価した事例は希少である。また、MAS は個々のエージェントが異なる行動パターンや意思決定ルールを持つことができ、自律的に行動することでシステム全体の挙動をモデル化することに特徴を持つが、実際の状況に即したシミュレーションを行うには、速度や密度に関連した群集の定量的な特性をエージェント特性に反映することが必要不可欠である。しかし、MAS を搭載したシミュレーターの多くは火災等における避難

時を想定したものであり、定期的にイベントが開催される大規模な施設を対象にした日常的な群集の特性に適用できるとは限らない。また、大規模イベントの帰宅時に関する群集特性の科学的知見は十分とはいえず、MAS への適用事例は少ない。そこで本研究は、大規模なスポーツイベントが定期的に開催されるスタジアム施設周辺の歩行者通路を対象に、①実環境での人流データを計測し、②そのデータを用いて MAS のパラメータを調整することによる再現性を検証した後、③MAS を用いて制御する人流を定量的に分析することで、定期的に開催されるスポーツイベントにおける群集制御の知見を得ることを目的とする。なお、本研究で使用する MAS は商用ソフトウェアの Pathfinder を使用し、当該ソフトウェアについては6. で後述する。

2. 研究方法の概要

本研究では、図1の研究の手順に従い、以下の分析を行う。

(1) 通過人数、群集特性の計測

歩行者の帰宅動線上にカメラを設置し、2022年6月1日、3日、4日の3日間の試合終了時間を起点に前60分、後120分の通過人数、歩行速度、群集密度を計測する。計測方法は4. で詳述する。

(2) 群集シミュレーションのパラメータ設定

使用するシミュレーションソフトの初期パラメータは避難時の状況に即して設定されているため、本研究が対象とする平常の帰宅時

*1 大阪大学サイバーメディアセンター 特任助教（常勤）・博士（工学）

*2 大阪大学サイバーメディアセンター 准教授・博士（工学）

*3 大阪大学サイバーメディアセンター 招へい研究員・博士（工学）

Specially Appointed Assistant Professor (full time), Cybermedia Center, Osaka Univ., Dr.Eng.

Associate Professor, Cybermedia Center, Osaka Univ., Dr.Eng.

Invited Researcher, Cybermedia Center, Osaka Univ., Dr.Eng.

の状況にパラメータを設定する必要がある。そのため、歩行速度等のパラメータは実測値の結果から設定する。詳細は 6.1、6.2、6.3 で説明する。

(3) 群集シミュレーション

帰宅動線のの上流側で計測した通過人数をシミュレーションで発生させる人流の初期値とするとともに (2) で設定したパラメータを用いて、群集シミュレーションを実施する。詳細は 6.4 で説明する。

(4) シミュレーション結果の精度検証

混雑が発生する箇所を設置した計測線を通して通過人数について、実測値とシミュレーション結果の誤差を評価する。評価方法は、Nash-Sutcliffe 係数(以下、NSE)^{⑤⑥}を用いる。詳細は 7. で説明する。

(5) パラメータの調整

(4) の評価値が向上するように、パラメータを調整し (2) から (4) を繰り返す。

(6) 群集制御の考察

計測結果およびシミュレーション結果をもとに、群集制御について考察する。

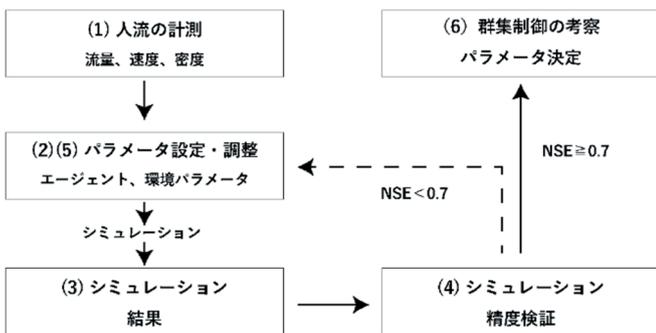


図 1 研究の手順

3. 研究の対象

本研究では、都市部に位置するドーム施設周辺の歩行者通路を対象に野球の試合終了直後の人流を分析する。特に、試合終了後の混雑が常態化しているドーム施設からA駅西口に向かうルートに焦点をあてる。図 2 は研究対象である歩行ルートと歩行者の計測箇所を示している。A 駅西口に向かう歩行者の順路は大きく 2 通りあり、

一つ目は主順路であるドーム施設を出た後、計測線 L1 (以下、L1) を通り歩行者デッキレベルで歩道橋 (計測線 L3、以下 L3)、横断歩道 2、A 駅西口という順路で進む (以下、ルート 1)。2 つ目は、計測線 L2 から階段を下り地上レベルから、横断歩道 1、計測線 L4 (以下、L4)、横断歩道 2、A 駅西口へ向かう順路である (以下、ルート 2)。また、ルート 1 に関して、L1 を通過後、一部の歩行者は歩道橋上での混雑を回避するために迂回して、駅の東口に向かうなど他の順路 (以下、ルート 3) を選択することが考えられる。その他にも細かな抜け道のような順路は複数存在するが、通過人数は上記 2 つのルートに比べ少ないと考えられるため、本研究では考慮しないものとする。

計測日時及び来場者数等を表 1 に示す。計測日時は 2022 年 6 月 1 日、3 日、4 日の 3 日間でいずれも試合開始時刻は 18 時、天候は曇りまたは晴であった。また、観客は約 3 万 2 千人から約 4 万人であり、Covid-19 による観客数制限の規制は解除されている。一斉に観客が帰宅を始めることで、群集の混雑が発生する試合終了後の群集について分析するために、歩行者数の計測時間は試合終了時間を起点として前 60 分、後 120 分の計 180 分とした。

表 1 計測日時と試合情報

	試合開始時間	試合終了時間	試合時間	観客数	天気
6 月 1 日 (水)	18:00	20:44	2:44	32,058	曇り
6 月 3 日 (金)	18:00	21:19	3:19	40,392	晴
6 月 4 日 (土)	18:00	20:21	2:21	40,444	晴

4. 群集の計測方法

群集の計測はビデオカメラを歩行者動線上に設置し、映像を解析することで行った^③。歩行者の通過人数の計測は映像をモニターに映しながら、画面上に計測線 (高さ 1500 mm) を設定して 1 分間にラインを通過する頭の数にカウントし、1 分毎の人数を記録した。計測は 2 人で行い、分析では平均値を使用することとした^④。群集の密度の計測は L3 に近接するように歩道橋上に 4450 mm×4450 mm (歩道橋の幅員) の計測エリア 1 を設定し、撮影データを 1 分ごとに静止画として切りだして、範囲内にある頭の数を目視によりカウントすることで群集密度を算出した。カウントは計測者 1 が静止画上の頭部に丸印を付けていくことで行い、計測者 2 が映像から歩行者の重なりなどを確認し補正した。歩行速度の計測は、6 月 4 日

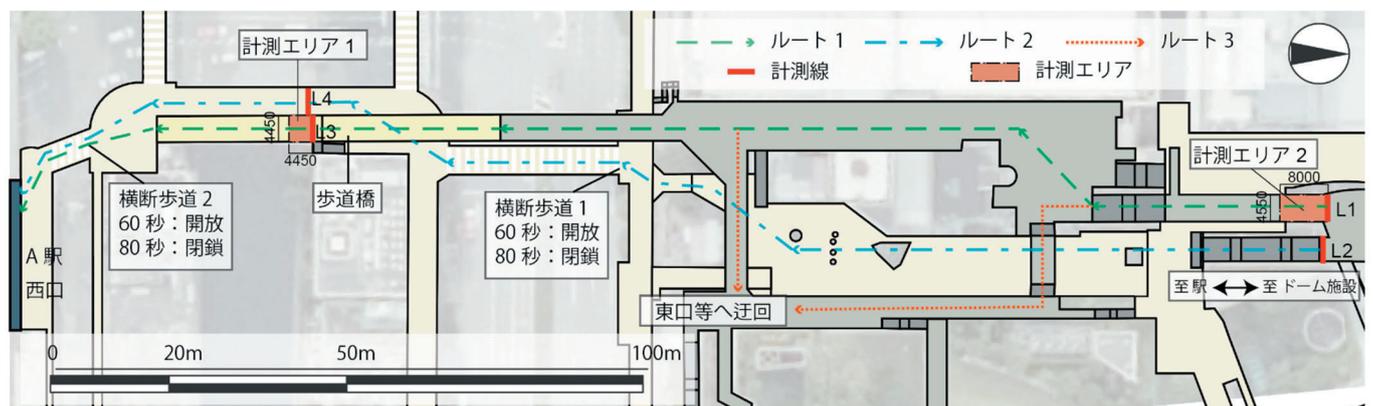


図 2 研究対象の範囲 注 2)

の試合終了 60 分前から 10 分間の混雑が発生していない時間帯を利用して、計測エリア 2 (4550 mm×8000 mm) を通過した歩行者 110 名をランダムに抽出して行った^{注 5)}。

5. 計測結果

表 2 は、各計測日の計測線通過人数を示しており、各計測日の試合終了時間 t_0 を起点に前 60 分、後 120 分の計 180 分間 (以下、全範囲を $t_{-60\sim 120}$ とする) および t_0 から後 60 分 (以下、 $t_{0\sim 60}$) および t_0 から L3 上の混雑が終了する時間 t_{ec} (以下、 $t_{0\sim ec}$) の計測線の通過人数を示している。 $t_{-60\sim 120}$ で A 駅西口に向かったと想定される L3 と L4 を通過した人は入場者数の約 26-28% で、その内の約 58% -70% が $t_{0\sim 60}$ に集中している。

図 3、5、7 は各計測日の時系列計測線通過人数を図 4、6、8 は $t_{0\sim 60}$ における L3 の通過人数と群集密度 (計測エリア 1) の関係を示している。いずれの計測日も試合終了直後に急激な人流の増加が見られ、終了約 5 分後に L1 で約 200-230 人/分の最大通過人数が計測され、流動係数は約 44.9-51.7 人/m/分であった。L3 を見ると、いずれの計測日も試合終了後 10 分を過ぎたあたりから 60-130 人/分 (13.2-28.6 人/m/分) で通過人数に大きな振幅が見られ、それとともに密度が急上昇しているのがわかる。これは歩道橋の先にある横断歩道 2 (図 2) に起因するストップアンドゴーを繰り返す混雑が定常的に発生しているためである。定常的な混雑が発生する時間 (以下、定常区間) の開始と終了は、図 4、6、8 に示す 2 本の黒い縦線の範囲で示しており、密度の最大値から両側に範囲を拡張し、密度と計測線通過人数の推移の傾向が大きく変わるところを手動で決定した。定常的な混雑状態は横断歩道 2 を通過できる流量よりも L3 と L4 を合わせた流量が大きくなることで発生すると考えられるが、定常区間の 5 分の移動平均 (以下、MA5 分) から横断歩道 2 で混雑が発生しないおおよその許容値は 160-170 人/分と推定され、そのときの流動係数は 22.9-24.3 人/m/分^{注 6)} 程度で、L1 の最大通過人数時の 50% 程度である。

次に、映像から定常区間で歩道橋上が混雑していることを確認し、各計測日で歩行が完全に停止している密度 (以下、最大密度) があることを確認した (図 9 の点線楕円で示す)^{注 7)}。定常区間における平均密度は 1.23 ± 0.27 人/m² でサービスレベル^{注 7)} (以下、LOS)^{注 8)} はレベル E が中心であり、完全に歩行が止まった状態の最大密度の平均は 1.87 人/m² であった。これは、直ちに危険な状況を想定しなければならない状態ではないものの、歩行が制限された状況であること、かつ歩道橋上の混雑であることを考慮すると混雑緩和する対策することが望ましい状態といえる。

歩行速度に関して、ビデオ分析ツールソフトウェア Tracker を用いて、L1 を通過した歩行者の歩行速度を測定エリア 2 で計測した結果、 1.36 ± 0.21 m/s であった^{注 5)}。群集の歩行速度は計測対象、計測環境で様々な違いがあることが知られているが、実験結果から Pan ら^{注 9)} は 1.57 ± 0.12 m/s、Ren ら^{注 9)} は 1.55 ± 0.13 m/s としている。しかし、歩行者速度は 20 歳ぐらいまで年齢があがるにつれて速くなり、それ以降遅くなる傾向があることが知られており、これらの実験の被験者は大学生のみであるため、様々な属性を含む群集の歩行速度はこれらよりも遅いことが想定される。一方で、岡田ら^{注 10)} は平常歩行時で $1.17\sim 1.25$ m/s としており、高齢者の歩行速

度は平均 0.94 m/s と報告されている。また、Weidmann^{注 11)} は 12 の既往研究の分析から 1.34 ± 0.26 m/s としており、本計測の結果はこれに近い。

表 2 計測線通過人数

計測日	計測時間 (分)	通過人数 (人)				入場者数 (人)	x 1-(L3/L1)
		L1	L2	L3	L4		
6月1日	全体 $t_{-60\sim 120}$	6685	1603	6659	1870	32058	0.23
	60分 $t_{0\sim 60}$	4493	1392	4162	1329		
	定常区間 $t_{0\sim 28}$	3732	1290	2871	1059		
6月3日	全体 $t_{-60\sim 120}$	9167	1998	8701	2467	40392	0.29
	60分 $t_{0\sim 60}$	5645	1689	4565	1857		
	定常区間 $t_{0\sim 35}$	4965	1640	3535	1689		
6月4日	全体 $t_{-60\sim 120}$	8757	2476	7642	2627	40444	0.35
	60分 $t_{0\sim 60}$	6979	2256	4992	2210		
	定常区間 $t_{0\sim 43}$	6379	2225	4162	2057		

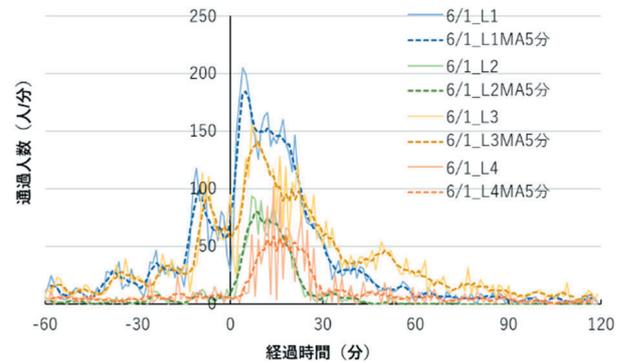


図 3 計測線通過人数の時系列変化 (6月1日)

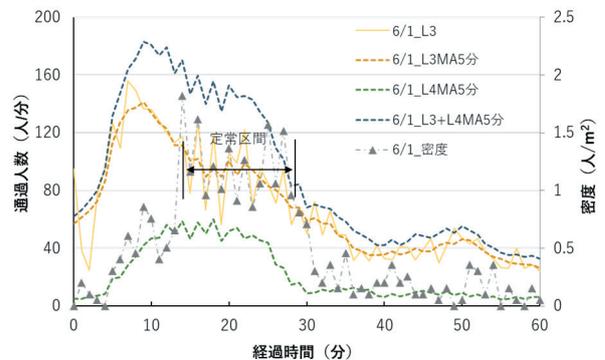


図 4 $t_{0\sim 60}$ における L3 の通過人数と群集密度 (6月1日)

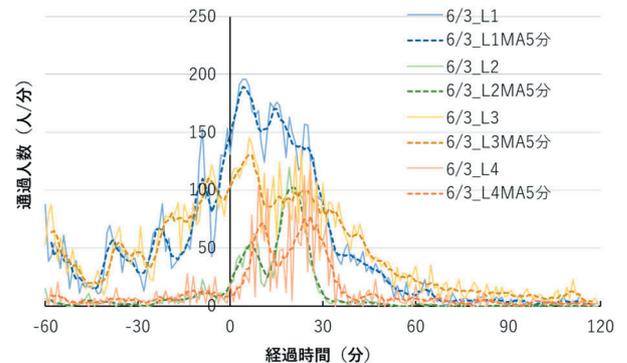


図 5 計測線通過人数時間変化 (6月3日)

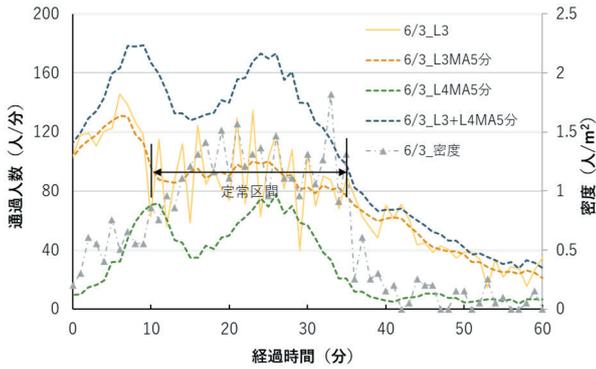


図6 t_{0-60} におけるL3の通過人数と群集密度(6月3日)

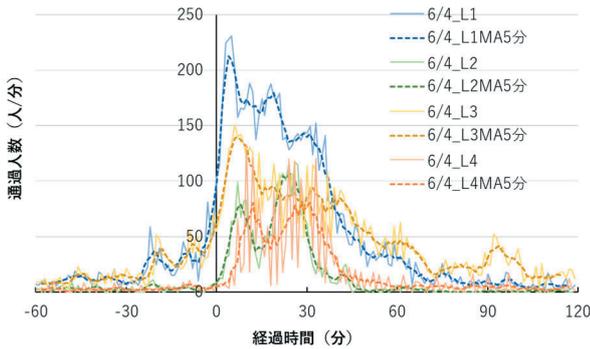


図7 計測線通過人数時間変化(6月4日)

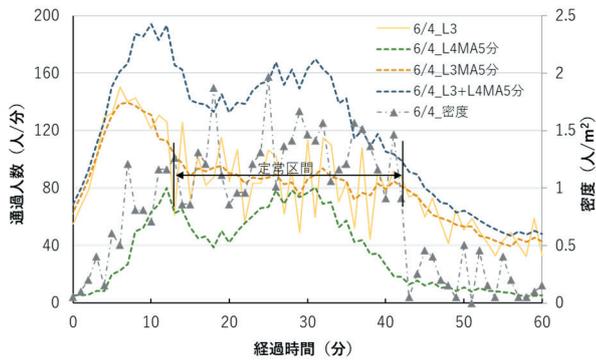


図8 t_{0-60} におけるL3の通過人数と群集密度(6月4日)

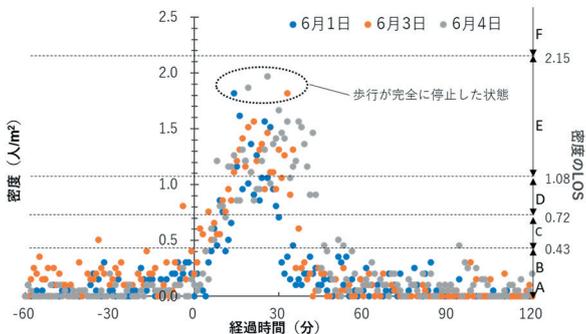


図9 群集密度の時系列変化

6. シミュレーション

6.1. シミュレーションソフトウェアの概要

MAS のアルゴリズムを使用した群集シミュレーション環境は多

く存在しており^{注9) 文12~文16)}、実際の避難実験等との比較検証から一定の再現性が確認されている^{文17)}。本研究では、平常時に実測した歩行者の特性をシミュレーションに十分反映させる観点から、エージェントの歩行速度の設定が密度と関連付けられており、かつ、エージェント同士の距離を規定することで群集の密度を制御できること、エージェントの行動制御が多岐にわたること、現実空間を再現するために複雑な形状をモデル化できることなどの理由から、Pathfinder 2022 を利用することとした。

Pathfinder は三角形サーフェスで構成されたナビゲーションメッシュによって、構造をモデル化することができ、ナビゲーションメッシュは部屋 (Room) ごとにグループ化され、ドア (Door) や階段 (Stair) で接続される。ナビゲーションメッシュを移動するエージェント (Occupant) は、プロフィール (Profile) により属性を与えることができ、身体寸法 (Shape)、移動速度 (Speed) などの特性を設定できる (図 10)。また、行動 (Behavior) によってエージェントに対して様々な指示 (目的地に向かう、待機、行動の変更など) を指定することができ、プロフィールと行動の組合せを変更することによって、エージェントグループを複雑に分類することができる^{文18)}。

ここでは、本実験で調整するプロフィールのパラメータについてのみ紹介することとするが、その他のパラメータの詳細は参考文献 18 のユーザーマニュアルを参照されたい。

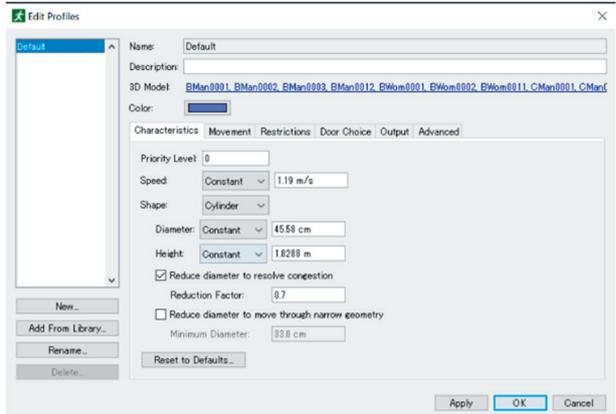


図10 パスファインダーのプロファイル編集ウィンドウ

6.2. プロファイルの設定

6.2.1. 移動速度 (Speed)

Pathfinder において、エージェントが水平面を移動する速度 v は、SFPE^{文19)}の歩行速度やドア流量から参照されており、式(1)で与えられる。最大速度 v_{max} は、図10のSpeedで入力される数値であり、初期値は1.19m/sとなっている。 v_{ft} はエージェントが移動する地形からの影響を考慮するための係数であり、階段やスロープの影響を考慮することができる(式(2))。ただし、水平面とスロープに関する初期値は $k=1.4$ で、 $v_{ft}=1.0$ である。また、 $v_f(D)$ は歩行速度の群集密度による重みづけ係数であり式(3)で与えられる。 D はエージェントのいる部屋の群集密度(人/m²)、 v_{fmin} は最小速度係数(初期値0.15)を示す(図11)。

$$v = v_{max} * v_f(D) * v_{ft} \quad \dots (1)$$

$$v_{ft} = \frac{k}{1.4} \quad \dots (2)$$

$$v_f(D) = \begin{cases} 1, & D < 0.55 \text{ pers/m}^2 \\ \max \left[v_{fmin}, \frac{1}{0.85} (1 - 0.266D) \right], & D \geq 0.55 \text{ pers/m}^2 \end{cases} \dots (3)$$

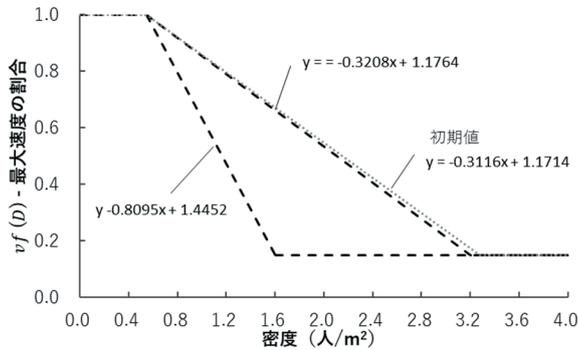


図 11 $v_f(D)$ と密度の関係

Pathfinder の歩行速度の初期設定パラメータは避難時の行動に適するように調節されているため、イベントから帰宅する際の平常時を対象とする本研究とは環境が異なると考えられる。そのため本研究では計測された群集の平均速度より $v_{max}=1.36 \pm 0.21 \text{ m/s}$ とし、 $v_f(D)$ の値を変更し、複数のモデルでシミュレーションを行う。図 11 は本実験で検討する $v_f(D)$ と密度の関係を示しており、 v_{fmin} を初期値 0.15 とした上で、 v_{fmin} に至る密度（以下、 $v_{fmin}(D)$ ）を 1.6-3.2 (人/m²) の範囲で変更してシミュレーションを実施することとした。

6.2.2. パーソナルディスタンス (Personal Distance)

パーソナルディスタンス（以下、PD）とは、あるエージェントが他のエージェントと維持しようとする距離のことであり、距離、密度、占有面積のいずれかから定義できる。本実験における $PD=c=0.33\text{m}$ は歩道橋上で完全に歩行停止した状態で計測された群集密度の平均 $\rho=1.87 \text{ 人/m}^2$ から式 (4)、(5) で与えられる。 d は肩幅 (Diameter) を示しており、本研究では初期値の $d = 45.58\text{cm}$ を用いる。

$$c = \frac{2}{\sqrt[4]{12}} \sqrt{a} - d \quad \dots (4)$$

$$a = \frac{1}{\rho} \quad \dots (5)$$

6.3. ナビゲーションメッシュの作成と横断歩道の開閉時間の設定

シミュレーションで使用するナビゲーションメッシュは、インターネット上で公開されている Google Maps から歩行者通路の 3 次元ネットワーク構造を抽出し、現地調査を行って各通路の幅員などの確認と修正を行った 3D モデルを基に作成した²⁰⁾ (図 2)。Pathfinder では、ナビゲーションメッシュ以外の環境要因として、ドアの開閉も設定できるため、より実際に即した環境を構築するため、横断歩道 1、2 の信号の切り替わる時間を計測し、初期値とし

て開 60 閉 80 秒で変化するように設定した。特に、横断歩道 2 はルート 1 とルート 2 の合流地点にあり、A 駅西口に向かう人流のボトルネックになっているため、その流量はシミュレーション結果に影響を与えると考えられる。一方で前方の道路がそれほど広くないため信号を無視して横断する歩行者も散見されたため、横断歩道を無視する歩行者を考慮し横断歩道の流量を補正するために、横断歩道 2 の開閉時間を 60-80 秒、62-78 秒、64-76 秒の 3 つのパターンでシミュレーションすることとした。

6.4. シミュレーションデータとモデル

シミュレーションの歩行者流入量の入力データは、図 2 の L1 と L2 における実測値を使用し、L3、L4 におけるシミュレーション結果を実測値と比較する。表 3 はシミュレーションで使用するエージェントタイプを示している。入力流量 L_n は各計測線における通行量の 1 分毎時系列データ、 x は L1 を通過後に歩道橋上での混雑を回避するために迂回して、ルート 3 を選択する割合を示している。ここで、 x は試合終了時間 t_0 から混雑終了時間 t_{ec} の期間における L_1 と L_3 の割合から算出した (表 2)。

本研究ではパラメータ v_{max} 、 c および迂回割合 x を計測結果から推定した上で、プロファイルパラメータとして $v_f(D)$ 、環境パラメータとして横断歩道 2 の開閉時間の組み合わせによってモデルを作成し、シミュレーションを実施する。

表 3 エージェントタイプ

エージェント タイプ	プロファイル		行動	入力流量			
	速度変数	PD		$t_{-60} \leq t < t_0$	$t_0 \leq t < t_{ec}$	$t_{ec} \leq t < t_{120}$	
I	v_{max}	$v_f(D)$	c	ルート1	$L_1 t$	$L_1 t(1-x)$	$L_1 t$
II	v_{max}	$v_f(D)$	c	ルート3	—	$L_1 t x$	—
III	v_{max}	$v_f(D)$	c	ルート2	$L_2 t$	$L_2 t$	$L_2 t$

7. シミュレーションの精度検証

シミュレーションの精度検証は、全体 180 分間 $t_{-60 \sim 120}$ 、試合終了から 60 分間 $t_{0 \sim 60}$ 、試合終了後から L3 の混雑が終了するまでの時間 $t_{0 \sim ec}$ の 3 区間で評価することとし、Nash-Sutcliffe 係数 (以下、NSE) を用いる。NSE は水文学などの分野でよく使用される統計的な指標で、流量のばらつきを考慮してモデルの予測精度を評価し、値が 1 に近いほど精度がよいとされ、式 (6) で与えられる。一般に 0.7 以上でモデルの再現性が高いとされる²¹⁾。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T \{(R(t) - S(t))\}^2}{\sum_{t=1}^T \{(R(t) - \bar{R})\}^2} \quad \dots (6)$$

ここで、 $R(t)$ は実空間で得られた結果、 $S(t)$ はシミュレーションで得られた結果である。 \bar{R} は実空間で得られた結果 $R(t)$ の全体平均である。

8. シミュレーション結果

8.1 $v_f(D)$ の検討

シミュレーションのパラメータの検討は最も混雑の集中が予想される 6 月 4 日¹⁰⁾ を対象に実施する。はじめに、横断歩道 2 の開

閉時間を 60-80 秒に固定して、 $v_{fmin}(D)$ を 1.6 から 0.4 ずつ増加させながら 3.2 までシミュレーションを各 10 回実施した¹¹⁾。

図 12 は、各モデルにおける L3 と L4 の MA5 分の NSE を示している。6 月 4 日の t_{ec} は 43 分である。L4 の NSE は $v_{fmin}(D)$ が小さくなるにつれて、値が大きくなる傾向がある。一方で、L3 の NSE は $t_{-60\sim120}$ (図の ×) と $t_{0\sim60}$ (図の +) はモデル 2.0、 $t_{0\sim43}$ (図の ◆) はモデル 2.4 で最大値を示したことから、L3 における定常区間に関しては、 $v_{fmin}(D)$ が 2.0-2.4 付近で再現性が高いことが推定される。

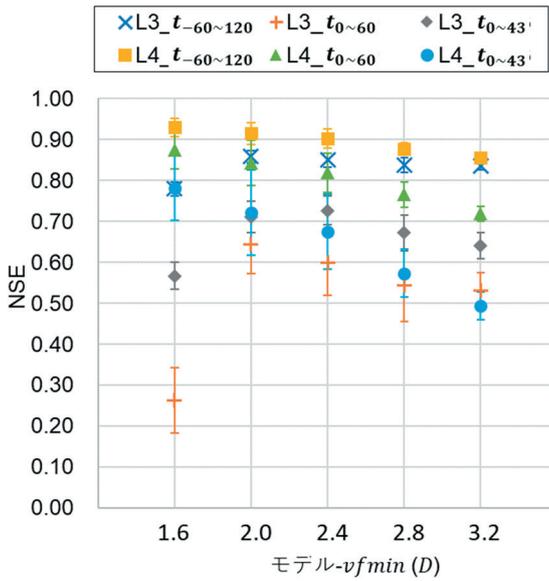


図 12 NSE_MA5 分-横断歩道 2 の開閉時間 60-80 秒 (6 月 4 日)

8.2 横断歩道 2 を考慮したシミュレーションパラメータの検討

次に、横断歩道 2 の開閉時間を 60-80 秒、62-78 秒、64-76 秒の 3 種類、定常区間の再現性を考慮し、 $v_{fmin}(D)$ を 2.0、2.2、2.4 の 3 種類で変更し、2 つのパラメータを組み合わせた 9 モデルを各 10 回シミュレーションした (表 4)。

図 13 は各モデルの MA5 分の NSE の平均値を示している。モデル E と F は全ての区間で $NSE > 0.7$ の精度を実現することができた。

横断歩道 2 の開閉時間でモデルの特徴を見ると、開時間が長くなると L3 の $t_{0\sim60}$ (図の +) では再現性が上がり、定常区間 $t_{0\sim43}$ (図の ◆) における再現性が下がる傾向がある。一方で、各モデルの定常区間の開始と終了時間を見ると、開始時間は全てのモデルでほぼ同時刻であるが、終了時間は横断歩道 2 の開閉時間が長くなるほど早くなっており、定常区間が実測値に近くなった (図 14)。これらのことから、モデル A、B、C は定常区間が実測値より長いことから $t_{0\sim60}$ 区間 (図の +) の再現性が低く、モデル G、H、I は定常区間の長さは実測値に近いものの、通過人数の時系列変化傾向が異なることから $t_{0\sim43}$ (図の ◆) の再現性が低くなっていると考えられ、モデル E、F はその中間の特性を持つモデルであると推定される。

次に、 $v_{fmin}(D)$ の大きさにモデルの特徴を見ると、図 12 と同様に L4 の NSE は $v_{fmin}(D)$ が小さくなるにつれて、値が大きくなる傾向がある。一方で、L3 の NSE は $t_{-60\sim120}$ (図の ×) と $t_{0\sim60}$ (図の

+) は 2.2 で最大となっており、 $t_{0\sim43}$ (図の ◆) も 2.2 と 2.4 でほぼ同じとなっている。このことから、モデル E が他と比べても相対的に再現性が高いといえる。

また、図 15 は定常区間を含む $t_{0\sim43}$ の 1 分間の通過人数の最大値、最小値、中央値、平均値を示している。いずれのモデルも中央値、平均値は実測値と大きく変わらないが、最大値は実測値よりも大きく、最小値は実測値よりも小さい傾向がある。

表 4 シミュレーションモデルの種類

		横断歩道2の開閉時間 (秒)		
		60-80	62-78	64-76
$v_{fmin}(D)$	2.0	A	D	G
	2.2	B	E	H
	2.4	C	F	I

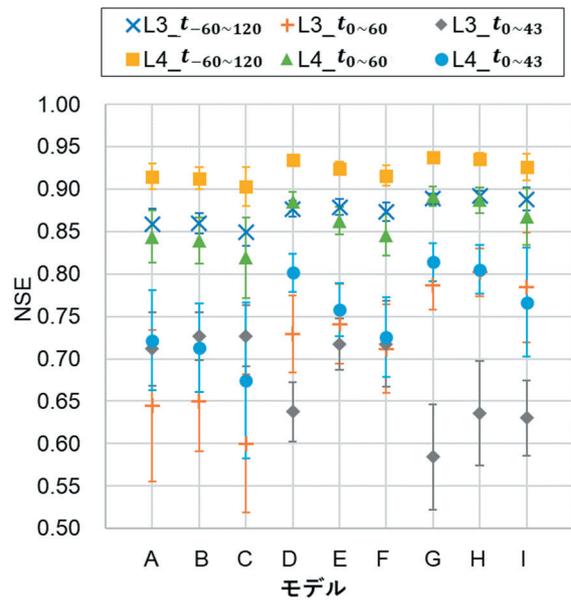


図 13 NSE_MA5 分 (6 月 4 日)

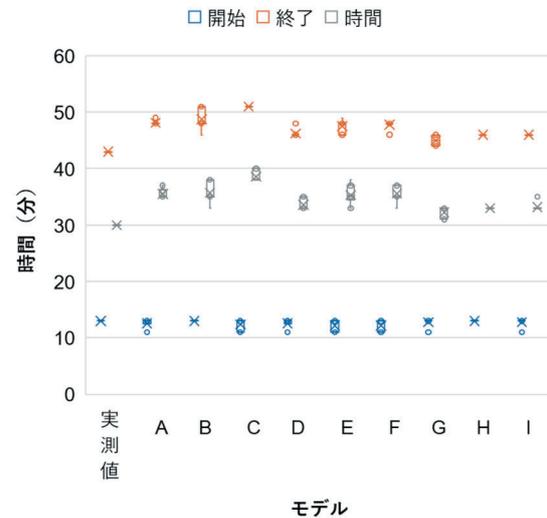


図 14 定常区間の開始と終了時間 (6 月 4 日)

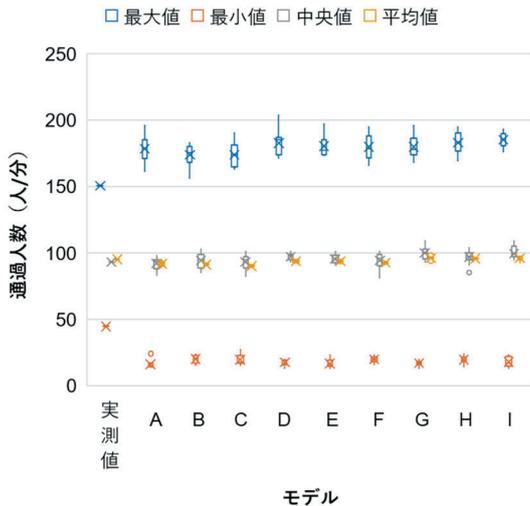


図 15 t_{0-43} の通過人数 (6月4日)

8.3 最適パラメータモデルにおける考察

次に、本実験の中で最も再現性が高かったモデル E において 10 回実施したシミュレーション結果の中で、各 NSE の合計が中央値^{注 12)}であるシミュレーション結果を例として、L3 と L4 の通過人数および密度の時系列変化を分析する。

図 16 は L3 と L4 における累積通過人数の時系列変化を示しており、S はシミュレーション結果を示す。L3、L4 ともに全体的に累積通過人数は似た傾向を示しており、定常区間もグラフの傾きはほぼ一致している。

図 17 は L3 における通過人数の時系列変化を示しているが、試合終了前の 60 分を見ると、シミュレーション結果と実測値の波形はよく一致しており、試合終了前では L1 を通過した来場者のほとんどが L3 へ向かうという仮説は概ね正しいと考えられる^{注 13)}。一方で、試合終了 60 分以降の波形は大きく異なっているが、これは他の施設で開催された格闘技イベントからの流入の影響が考えられる。当該施設のイベント終了時間は午後 9 時 40 分 (試合終了 79 分後) であるが、その付近で流量が増加しており、図 16 においても試合終了 60 分以降に累積通過人数の差が大きくなっている。当該施設からの L3 へ向かう最短の帰宅ルートでは L1 を通過する必要がないため、L1 の通過者を前提としたシミュレーションと齟齬が発生したと考えられる。

MA5 分を見ると試合終了後のピークから定常区間の終了までの動きも概ね再現できているが、1 分毎の波形に関しては実測値の方がシミュレーション結果よりも振れ幅が小さく、密度も狭い範囲でままとまっている (図 18)。図 15 からわかるように、いずれのモデルも中央値、平均値は実測値に近く、最大値と最小値の差は実測値よりも大きい傾向があることから、この特徴はシミュレーションと現実の定常区間における群集の動きが異なることを示している。両者共にストップアンドゴーによる群集波が発生しているが、シミュレーションではその影響が顕著に表れており、前のエージェントが動き出してからスペースが発生した後の動き出しが実際の群集よりも鈍く、疎密の波の幅が大きくなっていると考えられる。

次に、図 19 は L4 の通過人数の時系列変化を示しているが、MA5 分に関して、全体として概ねよく再現されており、特に試合

終了直後のはじめのピークまではよく再現されている。一方で、2 つ目のピークでは実測値では観察されていなかった小さな定常区間が見られた。これも、L3 の場合と同様にシミュレーションの特性として、前のエージェントが動き出してからスペースが発生した後の動き出しが実際の群集よりも鈍く、疎密の波の幅が大きくなったことで混雑が起きやすくなっていることが考えられる。

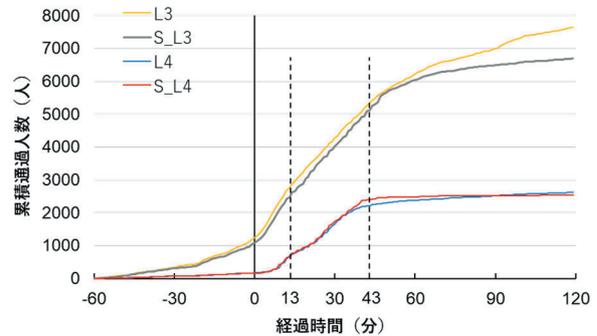


図 16 累積通過人数の時系列変化 (6月4日) -モデル E

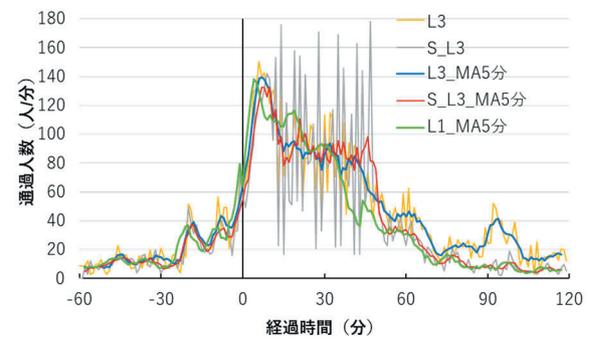


図 17 L3 の通過人数の時系列変化 (6月4日) -モデル E

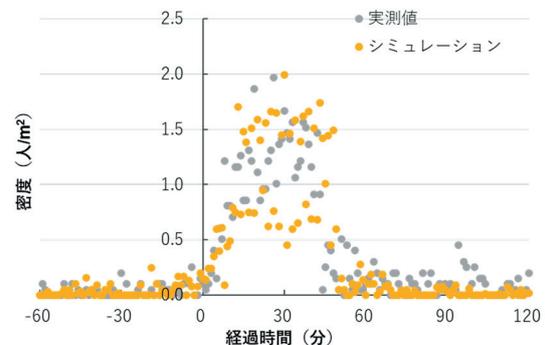


図 18 群集密度の時系列変化 (6月4日) -モデル E

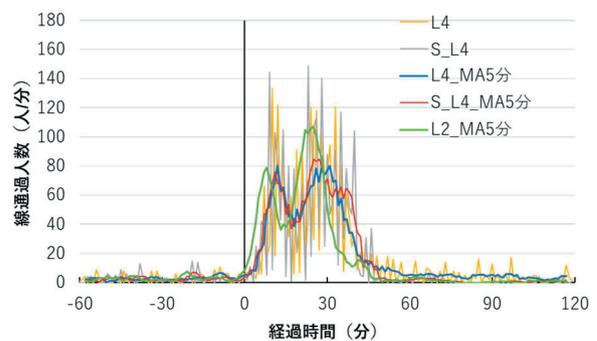


図 19 L4 の通過人数の時系列変化 (6月4日) -モデル E

8.4 別日へのパラメータの適応

モデル E と同様のパラメータ設定で、6月1日、6月3日のシミュレーションを実施し、再現性の確認を行う。 $v_{fmin}(D)$ は 2.2、横断歩道 2 の開閉時間は 62-78 秒とし、6月1日の t_{ec} は 28分、6月3日は 35分とする。図 20 は 6月1日、3日の NSE_MA5 分を示している。モデル 0601 を見ると、全体は NSE は 0.7 以上であったが、L4 の $t_{0\sim ec}$ (図の●) は 0.58 と他と比較すると低い値となった。

図 21 を見ると、S_L4_MA5 分の値が L4_MA5 分よりも大きくなっており、L2 を通り L4 に向かうルート 2 の通過人数の想定が間違っていると考えられる。L2 を通過した人は全て、L4 へ向かうという仮説でシミュレーションを実行したが、6月1日では他の目的地へ向かう人が一定数いると考えられる。そのため、定常区間に L2 を通過した人の 18% の人が A 駅の東口に、72% が西口に向かうと仮定^{注 14)}し、シミュレーションを実施した。その結果がモデル 0601_op である。モデル 0601_op では全ての NSE が 0.75 以上で、すべての区間で NSE の値が改善した。

次に、モデル 0603 では L3 の $t_{0\sim ec}$ (図の◆) 以外の NSE は 0.79 以上で高い値を示した。図 22 を見ると、L3_MA5 よりも S_L3_MA5 が定常区間に高い数値を示している。これは、L4 の一つ目のピークがシミュレーションでは少ないため、L3 から A 駅に向かう人の流れの阻害が小さくなっているためと推定される。ここでは、L1 を通過後に歩道橋上での混雑を回避するために迂回して、ルート 3 を選択する人の一部が、L4 に向かうと仮定し、その割合を 3%^{注 15)}とした。その結果がモデル 0603_op である。モデル 0603_op は、モデル 0603 と比較して、すべての NSE が改善したが、L3 の $t_{0\sim ec}$ (図の◆) は改善したものの 0.67 に止まった。

定常区間の誤差の要因として、他施設で実施されたイベントからの人流の影響が考えられ、特に、6月3日は試合終了時刻と当該施設のイベント終了時間(午後 21 時、試合終了 19 分前)が近いために、定常区間付近で再現性の影響がでたと推定される。

両日ともに、6月4日と同じパラメータを使用することで、全体では高い再現性を実現できたが、 $t_{0\sim ec}$ の再現性を向上させるには流入量の調整が必要であった。これは、一つには試合展開などによ

って、帰宅傾向が異なるためルート選択の割合やパターンが日によって同一でないこと、二つは試合終了時刻によっては、他の施設の利用者の帰宅時間と重なることで影響を受けることなどが要因として挙げられる。

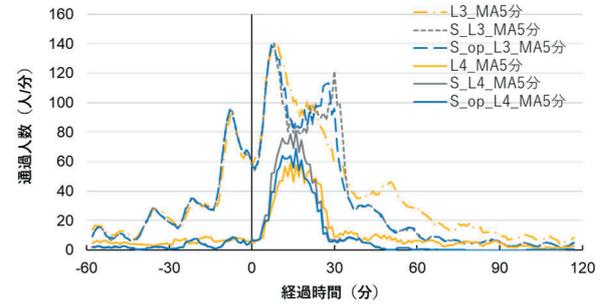


図 21 L3 と L4 の通過人数の時系列変化 (6月1日)

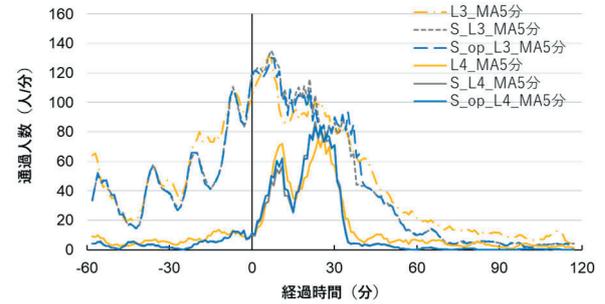


図 22 L3 と L4 の通過人数の時系列変化 (6月3日)

8.5 混雑緩和のための群集制御

6月4日のモデル E を用いて、歩道橋上での混雑緩和のための群集制御を検討する。計測結果より、横断歩道 2 で混雑が発生しないおおよその許容値は 160-170 人/分程度であると考えられるため、L1、L2 のピークを平均化することで、混雑が緩和されるかを検証する。図 23 のように、L1 と L2 の入力量を $t_{0\sim 43}$ の区間で総量を変えずに平均化し、シミュレーションを実施した。図 24 は L3 と L4 の通過人数と群集密度を示しているが、密度は最大でも 0.8 人/m² であり、歩道橋上で定常区間は発生しなかった。

実際に現実の世界では、シミュレーションのように群集を精緻に制御し、流量を平均化することは難しいと考えられるが、分散退場や群集誘導などによってルート上でのピークをできるだけ緩和することで、人流の総量を変化させずに混雑を緩和できる可能性が示唆された。ピークを緩和する方法としては、群集誘導によって迂回量

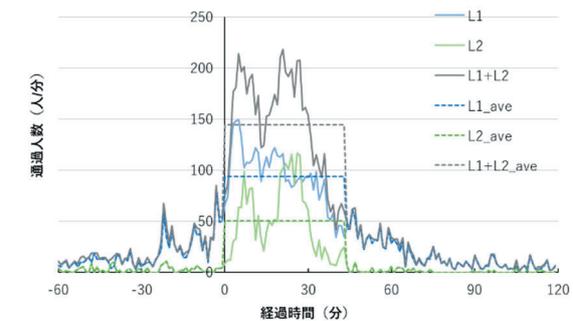


図 23 L1 と L2 の入力量 (6月4日)

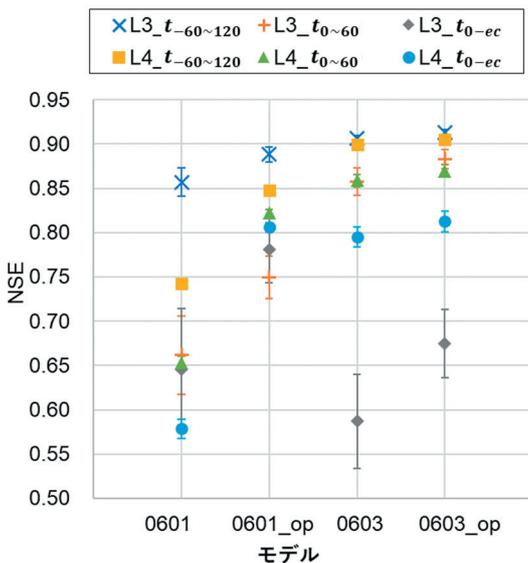


図 20 NSE_MA5 分 (6月1日と6月3日)

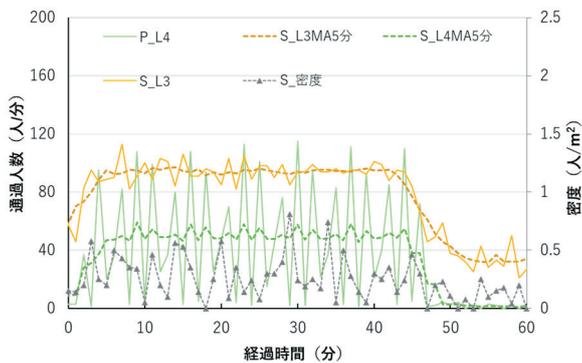


図 24 L3 と L4 の通過人数と群集密度 (6 月 4 日)

を増加させることなど考えられるが、その場合は他のルートで別の混雑を引き起こすことも考えられるため、さらなる検証が必要である。

9. まとめ

本研究は大規模なスポーツイベントが定期的に開催されるドーム施設周辺の歩行者通路を対象に、実環境での人流データを用いて、シミュレーションに必要なパラメータを検討するとともに、群集制御について考察を行った。結果、速度と密度の関係、パーソナルディスタンスなどのシミュレーションに必要なパラメータを明らかにするとともに、NSE が 0.7 以上の精度で再現できることを確認した。また、そのパラメータは異なる日でも使用できることを確認した。群集制御に関して、計測値からボトルネックの混雑発生の許容値を明らかにするとともに、ボトルネックに対して流入する流量のピークを平均化することで、混雑を緩和することができることなどの知見を得た。

一方で、本研究ではドーム施設周辺の歩行者通路の一部での検討であるため、迂回者の他への影響を検討できておらず、歩行者通路全体で検討を行う必要がある。また、本研究対象範囲で、横断歩道 2 の許容値がおおよそ把握できたため、L1、L2 での観測やよりドーム施設に近い場所で通過人数を計測することによって、実際に群集制御に応用できると考えられるが、雑踏警備員へどのように情報提供、共有するかなど、その具体的な群集誘導の方法も今後の検討課題である。

謝辞

本研究は JST 未来社会創造事業 JPMJMI20D1 の助成を受けたものである。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) K. Nishinari, F. Claudio, K. Shimura: Introduction to Crowd Management: Managing Crowds in the Digital Era: Theory and Practice, University of Tokyo Printed in Japan, pp. 180, 2020.5 (in Japanese)
西成活裕, フェリチャーニ・クラウドディオ, 志村憲一郎, 村上久: 群集マネジメント総論—理論と実践—, 東京大学出版, pp. 180, 2020.5, ISBN 978-4130611657
- 2) Sidiropoulos, G., Kiourt, C. and Moussiades, L.: Crowd simulation for crisis management: The outcomes of the last decade. Machine Learning with Applications, 2, p.100009. 2020

- (https://doi:10.1016/j.mlwa.2020.100009)
- 3) N. Siyam, O. Alqaryouti and S. Abdallah: Research Issues in Agent-Based Simulation for Pedestrians Evacuation," in IEEE Access, vol. 8, pp. 134435-134455, 2020 (https://doi:10.1109/ACCESS.2019.2956880.)
- 4) Simonov, A., Lebin, A., Shcherbak, B., Zagarskikh, A. and Karsakov, A.: Multi-agent crowd simulation on large areas with utility-based behavior models: Sochi Olympic Park Station use case. Procedia Computer Science, [online] 136, pp.453-462. 2018 (https://doi:10.1016/j.procs.2018.08.266.)
- 5) S. Shigenaka, M. Onishi, T. Yamashita, I. Noda: Estimation of Large-Scale Pedestrian Movement Using Data Assimilation, IEICE Trans. Inf. Syst., J101-D, 9, pp.1286-1294. 2018 (in Japanese)
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 情報・システム, Vol.J101-D, No.9, pp. 1286 - 1294. 2018 (https://doi:10.14923/transinfj.2017SAP0014)
- 6) J.E. Nash and J.V. Sutcliffe: River flow forecasting through conceptual models Part I—A discussion of principles, J. Hydrology, vol.10, no.3, pp.282-290, 1970 (https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- 7) Fruin, John J.: Pedestrian planning and design, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, pp. 206, 1971
- 8) Pan, H., Zhang, J., Song, W., & Yao, B.: Fundamental diagram of pedestrian flow including wheelchair users in straight corridors. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2021(3), 033411, 2021 (http://dx.doi.org/10.1088/1742-5468/abe93f)
- 9) Ren, X., Zhang, J., Song, W.: Flows of walking and running pedestrians in a corridor through exits of different widths, Saf. Sci. 133 105040, 2021. (https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105040)
- 10) Kosei Okada : Safety Technology for Crowd , KAJIMA INSTITUTE PUBLISHING CO., LTD., pp. 122-123, 2011
岡田光生: 群集安全工学, 鹿島出版会, pp. 122-123, 2011
- 11) Weidmann Ulrich: Transporttechnik der Fussgänger Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs, Literaturlauswertung, IVT Schriftenreihe,90, 1992 (https://doi.org/10.3929/ethz-a-000687810)
- 12) Galea E, Lawrence P, Gwynne S, Filippidis L, Blackshields D, Cooney D.: buildingEXODUS V6.2 Technical Manuel and User Guide. University of Greenwich Centre for Numerical Modelling & Process Analysis, London. 2015
https://gala.gre.ac.uk/id/eprint/15470/. (Accessed 23 Sep 2022)
- 13) Mott MacDonald Simulation Group: Simulation of transient evacuation and pedestrian movement, STEPS User Manual v5.3. Mott MacDonald Simulation Group, London. 2014
- 14) Oasys software limited.: Mass Motion Help Guide. 2019
https://www.oasys-software.com/wp-content/uploads/2019/06/MassMotion-10.0-Help-Guide.pdf (Accessed 23 Sep 2022)
- 15) T. Kimura, T. Sano, K. Hayashida, N. Takeichi, Y. Minegishi, Y. Yoshida, H. Watanabe: Representation of crowd in multi-agent model - development of pedestrian simulation system SimTread (in Japanese), J. Archit. Plan., 74, pp. 371-377. 2009
木村謙, 佐野友紀, 林田和人, 竹市尚広, 峯岸良和, 吉田克之, 渡辺仁史: マルチエージェントモデルによる群集歩行性状の表現, 日本建築学会計画系論文集, 74 巻, 636 号, pp. 371-377. 2009 (https://doi.org/10.3130/aija.74.371)
- 16) Pathfinder technical reference manual. Thunderhead Engineering, Manhattan. 2022
https://files.thunderheadeng.com/support/documents/pathfinder-technical-reference-manual-2022-3.pdf. (Accessed 18 April 2023)
- 17) Cuesta, A., Ronchi, E., Gwynne, S. M., Kinsey, M. J., Hunt, A. L., & Alvear, D.: School egress data: Comparing the configuration and validation of five egress modellingtools. Fire and Materials,41(5),

535–554. 2017 (<https://doi.org/10.1002/fam.2405>)

18) Pathfinder user manual. Thunderhead Engineering, Manhattan. 2022
<https://files.thunderheadeng.com/support/documents/pathfinder-user-manual-2022-3.pdf>. (Accessed 18 April 2023)

19) Society of Fire Protection Engineers: SFPE Guide to Human Behavior in Fire. 2nd ed. Springer International Publishing, 2019

20) Muhammad, Hegazy, Kensuke Yasufuku, Akira Takahashi: Developing a 3D Reconstruction of Pedestrian Street Networks in Large-Scale Urban Environments Using iPad-integrated LIDAR, Proceedings of the 22nd International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, pp. 1036-1044. 2022

21) Ragab, R., Moidinis, D., Albergel, J., Khouri, J., Drubi, A., and Nasri, S.: The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs 2: Rainfall-runoff model applications to three Mediterranean hill reservoirs, Hydrol. Earth Syst. Sci., 5, pp. 554–562, 2001 (<https://doi.org/10.5194/hess-5-554-2001>)

試合終了後（0分）から定常状態区間終了（43分）までの区間は L1 の実測値の 0.65 倍したものである。

注14) t_{0-ec} の L4 と L2 の通過人数の合計の比から算出した値。

注15) L1 を通過した人の内、71%はルート 1、ルート 3 を 29%から 26%とし、残りの 3%をルート 3 から分岐して、L4 へ向かうものとした。

(2023 年 10 月 4 日原稿受理, 2024 年 2 月 26 日採用決定)

注

- 注1) 近年では、ソウル梨泰院雑踏事故（2022 年）では 158 名が死亡、明石花火大会歩道橋事故（2001 年）では 11 名が死亡するなど、重大な事故が発生している。
- 注2) 国土地理院航空写真に筆者らが作成した CAD データ情報を重ねている。
- 注3) いずれの計測も、歩行者の属性はとっておらず、マクロな量のみを計測している。
- 注4) L2 の計測は歩行者の計測が容易で、計測誤差はほとんどないと考えられたため、1 名による計測データを使用した
- 注5) 歩行者の速度は Tracker を用いて測定し、エリア内を通過する歩行者の軌跡を 0.1 秒ごとのビデオフレームで分析し、各歩行者の平均速度を算出した。Tracker はオープンソースのビデオ分析およびモデリングツールで、GNU (General Public License) に基づいて配布されているソフトウェアである。<https://physlets.org/tracker/>
- 注6) 横断歩道 2 の幅（縮模様部分）は約 5m であるが、実際に横断する歩行者は横断歩道の幅よりも広がって横断するため、観察から 7m の幅で流動係数を算出しており、シミュレーションにおいても 7m の幅を採用した。ここでの横断歩道 2 の流量、流動係数の値は停止時間を含む 5 分の移動平均であり、赤と青が切り替わる間隔は実測値より開 60 閉 80 秒である。
- 注7) 密度の計測は 1 分毎に抽出した静止画から行っているため、ある静止画と次の静止画の間で歩行者が停止していることもある。
- 注8) 一般的に LOS でリスクアセスメントを行う場合、レベル D 以上を許容値とする場合が多く、レベル E 以下は歩行制限や流れの中断、停止などが頻繁に起こるレベルであるため、危険とみなして対策をとることが多いとされる。
- 注9) Pathfinder (Thunderhead Engineering Consultants, Inc.) 以外にも、継続的に開発された代表的なソフトウェアに buildingEXODUS (University of Greenwich)、STEPS (Mott MacDonald Simulation Group)、MassMotion (Oasys Limited)、SimTread (エーアンドエー株式会社) などがある。
- 注10) 6 月 4 日は野球の試合展開が終了回まで接戦であったため、途中で帰宅する観客が少なく、試合終了後、一斉に観客が帰宅を開始し、計測 3 日間の中で最も混雑が集中する可能性が高いと考えられる

表 5 試合経過

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	計
6月1日	ビジター	0	0	0	3	3	0	0	0	0	6
	ホーム	0	0	0	1	0	1	1	0	0	3
6月3日	ビジター	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
	ホーム	0	1	2	1	1	0	0	5	×	10
6月4日	ビジター	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	ホーム	0	0	0	0	0	0	2	0	×	2

- 注11) シミュレーションはエージェントを発生させる Occupant Sources に乱数を入力し、エージェントプロファイルや発生場所などをランダムに変化させて行った。
- 注12) NSE を合計した値が 5 番目に大きかったものとした。
- 注13) 図の L1_MA5 分に関して、迂回する流量を減じたものを示しており、