ゾーンモデルを用いた大規模群集避難性状の予測

岸上昌史 山口純一

Prediction of Evacuation Property of Large-scale Crowd Using Zone Model

Masashi Kishiue Jun-ichi Yamaguchi

Abstract

We developed an evacuation property prediction method based on a zone model considering the balance of the number of people per unit space (zone). The features of this method are the following three points: (1) It is possible to study in a short time because the computational load is low. (2) The prediction accuracy is good. (3) By outputting the information in each zone obtained in a time series, it is possible to intuitively predict when and where stagnation occurs. In this paper, we present the outline of the zone model, accuracy verification using the results of a previous evacuation experiment, and case study of an evacuation from a stadium.

概 要

建物火災時において当該建物から避難する在館者の集団を「群集」ととらえ、単位空間(ゾーン)の収支を考え るゾーンモデルにもとづく避難性状予測手法を開発した。本ゾーンモデルの特長は、以下の3点である。1)ゾー ンというマクロな視点を用いたことで計算負荷を抑えられ、短期間での検討が可能となる。2)実態に近い避難性 状を再現できるため、予測精度が高い。3)時系列で得られる各ゾーンの情報を可視化出力することで、滞留の発 生箇所や発生時間を直感的に把握できる。本報では、まずゾーンモデルの概要を示す。そののち、過去の避難実 験結果を用いた検証の一例を示すとともに、スタジアムを用いた大規模群集の避難性状についてのケーススタ ディ結果を示す。

1. はじめに

建物火災時には,在館者をいかに素早く火災の影響が 及ばない場所(最終的には屋外)に避難させるかが重要で ある。そのため,避難完了時間の遅れとなる過度な滞留 を避難経路上で発生させない計画が求められる。特に, 大規模な建築物では在館者数も多く,避難時においてい ったん滞留が発生すると影響が広範囲に及ぶため,注意 が必要である。よって,基本計画段階から避難性状を精 度よく予測し,階段や出口の数が適切か,経路上のネッ クにより過度な滞留が発生しないかを検討することが必 要となる。

基本計画段階では、概略の建築情報しか決定されてお らず、平面計画が随時更新されるため、その都度の評価 が要求される。また、複数の計画案の比較を求められる ことも多く、避難性状の予測には迅速さも必要となる。

また,建築物の計画には設計者だけでなく建築主事や 発注者等も含めた多数の関係者が携わる。そのため,意 思共有が早期に図れるよう可視化された直感的にわかり やすい情報があればなおよい。

以上のことから,「精度」,「短期間」,「高度な可 視化情報」を兼ね備えた避難性状予測手法を開発した。 本報では、その予測手法の概要を示すとともに、近年実施した群衆避難実験の結果を用いた精度検証の一例、スタジアムからの避難性状についてのケーススタディ例を示す。

現状の予測手法と本手法の位置づけ

現状,避難性状の予測手法は,Table 1 (a)~(c)に示すと おり3つに分類できる。(a)は手計算で算出可能な簡易計 算法(以下,簡易法)である。現行の避難安全検証法¹⁾がそ れにあたる。この方法には,式が比較的単純であり計算 に要する時間が短いというメリットがある。一方,簡易 さを優先したゆえに課題もある。例えば,実際の避難で は出口に到達した人から順次扉を通過してゆくが,簡易 法では出口への集結フェーズと出口通過フェーズを分け ている。結果として出口前に滞留が発生する場合には避 難完了時間を長めに評価する。また,各フェーズの完了 時間しか把握できないため,どこに課題があるか関係者 と共有しにくい点も課題といえる。

(b)は、マルチエージェントシミュレーション(以下, MAS)による予測手法²¹³⁽⁴⁾⁵⁾である。これは、計算機上で複 数のエージェント(人)に各々のルールを与え、お互いに

	(a)簡易法[例えば告示 ¹⁾]	(b) MAS ^{2) 3) 4) 5)}	(c)ゾーンモデル ⁶⁾ (本報)	
概要	出口への集結フェーズ、出口通過	複数のエージェント(人)に各々	単位空間(ゾーン)における避難者	
	フェーズに分け、フェーズ毎に最	のルールを与え、お互いに相互作	数の収支を時系列で考えるというマ	
	安全側の条件で算出し、合算する。	用を受けつつ行動させる。	クロな視点で予測する。	
イメージ	出日への <u>集結</u> フェーズ ・ 出日通過 フェーズ ネック前に 全員集結	個々を対象に 時刻歴で解析	ゾーンを対象に 時刻歴で解析 ソーンi+1 ソーンi ソーンi	
計算時間	◎	×	○	
	(数時間)	(数週間~)	(数日~)	
可視化	×	◎	○	
	(フェーズ終了時間のみ)	(時刻歴の人の位置、滞留箇所)	(<u>時刻歴の</u> 密度、滞留箇所)	
計算精度	△	◎	◎	
	(フェーズ毎の合算とするため、	(出口に到達した人から順次出口	(出口に到達した人から順次出口	
	避難完了時間が長めに出る傾向)	を通過する性状を予測可能)	を通過する性状を予測可能)	

 Table 1 避難性状の予測手法

 Predictive Technique of the Evacuation Property

干渉(相互作用)を受けつつ行動させるものである。特長 として,簡易法に比べて精度が高い点が挙げられる。こ れは,上記に述べた出口に到達した人から順次出口を通 過するという性状を予測できるためである。さらに,時 系列的に各人の位置を把握できるため直感的にわかりや すい出力が可能である。一方,モデル作成に時間を要す る点や,個人を対象とする特性上,大人数を対象とする 場合には計算負荷が高くなり,結果の出力までに時間を 要する点が課題である。

ところで,避難中の在館者(以下,避難者)は「避難」と いう共通認識を有しており,「個人」の集合である「群 集」というとらえ方が可能と考えられる。そこで,本報 では,避難者の一団を「群集」ととらえ,おおむね同一 のふるまいを行うという仮定のもとで,単位空間(以下, ゾーン)における避難者数の収支を時系列で考えるとい うマクロな視点でモデル化⁶(以下,ゾーンモデル)する予 測手法を構築した。

ゾーンモデルは、Table 1(c)に示すとおり「群集」を対 象とすることで計算負荷を減らせるため、MASに比べて 短期間で検討できる。また、MAS同様、出口に到達した 避難者から逐次出口を通過するという実態に即した避難 性状を予測できるため、簡易法に比べて計算精度も高い。 出力情報についても、ゾーン内の避難者数を面積で除し たゾーン密度を図面上に時系列で表現することで、いつ、 どこで滞留が発生するかを直感的に把握できる。

3. ゾーンモデルの概要

本モデルでは,該当空間を複数のゾーンに分割し,各 ゾーンについて境界での流動量およびゾーン内の避難者



Fig. 1 ゾーン(単位空間)の収支 Balance of the Number of People Per Unit Space

数を逐次計算する。ここではもっとも単純な例として, Fig. 1に示すとおり単位幅Δyの廊下空間における1次元の 流れを例に挙げて説明する。

3.1 基礎方程式

Fig. 1に示すとおり当該空間内に長さ Δx のゾーンを考 える。時刻tにおける位置xでの単位幅あたりの流動量(以 下,単位流動量)をN(x,t), x+ Δx での単位流動量を N(x+ Δx ,t)とすると、単位時間 Δt の間に当該空間における 正味の流入人数は[N(x,t)-N(x+ Δx ,t)]× Δy × Δt であり、これ により当該ゾーンの人数が[P(x,t+ Δt)-P(x,t)]だけ増加す る。したがって、(1)式が成り立つ。

```
\begin{split} & [P(x,t + \Delta t) - P(x,t)] \\ & = [N(x,t) - N(x + \Delta x,t)] \cdot \Delta y \cdot \Delta t \qquad (1) \\ & P(x,t) : 時刻tにおける領域xの避難者数[人] \\ & N(x,t) : 時刻tにおける断面xの単位流動量[人/(m \cdot s)] \\ & \Delta t : 単位時間[s] \end{split}
```

なお、ゾーン内避難者数Pと密度pの関係は(2)式となる。

$$P(x,t) = \rho(x,t) \cdot \Delta x \cdot \Delta y$$
 (2)
 $\rho(x,t) : 時刻tにおける領域xのゾーン密度[人/m2]$

(2)式を(1)式に代入して、極限をとると次式を得る。

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{dN}{dx}$$
(3)

3.2 境界条件

各境界での単位流動量Nは,対象ゾーンおよびその上 流側・下流側の状況によって異なる。ここでは,それら をTable 2に示す3つの状況に分類する。

3.2.1 単位流動量の最大値で決定される場合 (a) に示すとおり、ゾーン内に十分な収容スペースがあり、 かつ上流側ゾーンに十分な避難者数が滞留している場合、 単位流動量は自由空間への最大単位流動量Nmaxで与えら れる。このとき、単位幅あたりの流動量N₁は(4)式で与え られる。なお、Nmaxは時間によらず一定とされている¹⁾。

$$N_1 = N_{max}$$
 (4)
 $N_{max}: 最大単位流動量[人/(m \cdot s)]$

3.2.2 上流側状況で決定される場合 (b)に示すと おり、ゾーン内に十分な収容スペースがあるものの、上 流側ゾーンの避難者数が少ない場合、単位幅あたりの流 動量は、上流側ゾーンの避難者数で決定される。このと き、単位幅あたりの流動量N₂は(5)式で与えられる。

$$\begin{split} N_2 &= \rho(x - \Delta x, t) \cdot V \ (5) \\ V : \, \&p(\bar{x} = \mu / s) \end{split}$$

3.2.3 収容可能人数により決定される場合 (c)に 示すとおり、ゾーン内に十分な収容スペースがない場合, 単位流動量はゾーン内の収容可能人数(密度)と下流側ゾ ーンへの流出量で決定される。このとき、単位幅あたり の流動量N₃は(6)式で与えられる。

$$N_3 = [\rho_{max}(x) - \rho(x, t)] \cdot V + N(x + \Delta x, t - \Delta t)$$
(6)

$$\rho_{\max}(\mathbf{x}) = \frac{P_{\max}(\mathbf{x})}{\Delta \mathbf{x} \cdot \Delta \mathbf{y}} \tag{7}$$

上述の3つの状況を踏まえて、単位幅あたりの流動量N は(8)式に示すとおりそれぞれの最小値で与えられる。

$$N = Min(N_1, N_2, N_3)$$
(8)

3.3 計算方法

Fig. 2に計算フローを示す。(3)式を離散化し,(8)式を 境界条件として与え,開始から順次時間を進めることに より,任意時刻での各境界での流動量や各ゾーンでの避 難者数を算出し,避難者数をゾーン面積で除することで ゾーン密度が求められる。

なお、本予測手法では境界の流動量で収支を考える特 性上、ゾーン内にネックを設けるような空間分割は不可 である。この条件を守れば、(8)式に示すとおり空間の分 割長さΔxは流動量や避難者数の予測精度に影響を与え ないので、可視化したい滞留の解像度によって適宜判断 すればよい。4章で後述する10m程度の小規模空間を対象 として滞留性状を可視化する場合は数mのオーダーの分 割長さが必要となる。5章で後述する数百mの大規模空間

Table 2 境界条件の分類 Classification of Boundary Condition





であれば、数十mのオーダーの分割長さで実務的に十分 と考えられる。

4. 避難実験による精度検証

以下では,3章で示した予測手法の精度を検証した一例 として近年実施された避難実験ⁿとの比較を示す。

4.1 実験概要

Fig. 3に実験平面図を示す。直線通路の中央にネックと なる開口部を一箇所配置し, Table 3に示すとおり通路幅 Dと開口幅Bを変化させた。実験は十分な滞留スペースを 有する屋内実験場で行い,全ての条件において96人の被 験者を歩行させた。被験者には2色のカラーマーカーをつ けた帽子を被らせ,それを上部から撮影した。一例とし てNo. 2条件の実験の様子をFig. 3に併せて示す。

4.2 実験結果

Fig. 4(a)に,実験結果の一例としてNo. 2条件における 代表時刻の各被験者の位置,歩行速度,歩行方向を示す。





Fig. 3 実験平面図および実験写真(No. 2条件) Ground Plan and Experimental Photo

	Table	3	実	€験	条件
_				~	

Experimental Condition							
No.	通路幅D[mm]	開口幅B [mm]	試行回数[回]				
1	2400	1200					
2	2400	800					
3	1800	1200	3				
4	1800	800					
5	1200	800					



Fig. 4 実験結果とゾーンモデルによる予測値の比較(ゾーン密度) Comparison between Experimental and Predicted Value(Zone Density) 任意の時刻tの各被験者の位置座標は、ビデオ撮影された 動画(フレームスピード30fps・解像 2074pixel×1520pixel) を1枚ずつ画像解析⁸⁾することで算出した。なお、位置は 瞬時値、歩行速度および歩行方向は10frame(=0.33秒)後の 位置と現在値の差分から算出した。

Fig. 4(a)より,実験開始直後(t=6s)は滞留が発生してお らず,各被験者は1.3m/s程度の歩行速度で開口に向かっ ている。先頭の被験者が開口に達したのち(t=12s, t=25s) は,開口通過が行われるとともに開口前で滞留が発生し, 開口より上流側の被験者の歩行速度が低下する。また, 開口近傍では,被験者が中央の開口を目指して向きを変 えている様子も分かる。開口通過後は,歩行者は再び加 速して1.3m/s程度の歩行速度に戻る。本条件ではおよそ 60秒程度で全員の被験者が開口を通過した。

4.3 予測手法と実験結果の比較

ー例として、No. 2条件の各ゾーンの時刻歴の密度 ρ , 各境界での流動量Rおよび避難者数Pについて示す。計算 領域は、Fig. 5に示すとおりX=-4800からX=4800の範囲を 対象とし、分割長さ Δ xは2400mmとした。入力条件は、近 年得られた最新の知見⁹⁾を反映することとし、歩行速度 V=1.3m/s、最大単位流動量N_{max}=1.5人/(m·s)(開口部は2.2 人/(m·s))、最大収容可能密度 ρ max=2.2人/m²、時間刻み Δ t=1sとした。

Fig. 4(b)に、本手法で得られる代表時刻のゾーン密度ρ を示す。実験開始直後(t=6s)は開口上流側の密度が上昇し、 滞留が発生する(t=12s, t=25s)につれて開口上流側の密度 は上昇してゆく。一方で、開口がネックとなって避難者 の流入が制限されるため、下流側の密度は上流側より上 昇度合いが小さい。全員が開口を通過する(t=60s)と上流 側の密度は0となり、下流側の密度も低下する。

比較として実験値から算出したゾーン密度をFig. 4(a) に併せて示す。実験値でも上記に述べた傾向が見られる とともに、予測値と実験値はおおむね一致する。これに より、本手法が同時並行して行われる出口への集結と出 口通過を適切に評価できていることがわかる。なお、 Δx を2倍(Δx =4800)にすると隣り合う2ゾーン(x=-4800から x=0, x=0からx=4800)の平均となり、滞留の解像度は幾分 粗くなる。ただし、当該条件でも実験値とよく一致する 傾向は変わらない。

Fig. 6にx=-4800, x=0地点における流動量について, 実 験値と予測値の時系列の比較結果を示す。各断面の流動 量は実験をよく再現できている。実験値は幾分振動して いるが, これは1秒毎の移動平均という細かいピッチの時 刻歴データを用いたためである。実験のように実際の流 動量は細かく変動するものの,本手法のように避難者の 一団を「群集」ととらえて平均化した予測値と実験値は ほぼ整合する。なお, $\Delta x \epsilon 2 \text{ (} \Delta x = 4800)$ に広げた条件で も流動量は同値となる。これは,前述のとおり流動量が Δx に依存しない特性のためである。

Fig. 7に、 x=-2400からx=0とx=-4800からx=0(x=-4800

からx=-2400のゾーンとx=-2400からx=0のゾーンの合 算)における避難者数について,実験値と予測値の時系列 の比較結果を示す。両者はよく一致しており,本手法が 実験をよく再現できていることが分かる。

以上のことから、本手法は高い精度で避難性状を予測 することが可能といえる。Fig.4(a)に示したような人の位 置までは予測できないが、各ゾーンの境界の流動量やゾ ーン内の避難者数を算出し、それらをゾーン密度という 形で可視化することで、直観的に滞留の度合いを評価で きる。

5. スタジアムを対象としたケーススタディ

5.1 検討モデル

Fig.8に示す架空のスタジアムを対象とした。在館者者 数は約1万5千人で、1階に約1万人、2階に約5千人である。 各階ともに座席内には幅1.2mの座席内通路があり、当該 通路からコンコースへ避難したのち、1階の避難者は幅





Fig. 8 スタジアムの平面図 Ground Plan of the Stadium

1.8mの両開き扉から屋外へ避難する。2階の避難者は8本 の避難階段(階段幅2.4m,出口幅0.9m)を経由して1階に降 り,屋外に避難する。階段から直接屋外に出られるため, 1階の避難者と2階の避難者が合流することはない。なお, 屋外は避難者全員を収容できるだけの十分な滞留スペー スを有する。

本章では,避難放送等により火災を覚知し,在館者が 各座席から一斉に避難を開始し,コンコースを経由して 屋外に避難する状況を想定し,その避難性状を試算する。

5.2 試算結果

入力条件は告示¹⁾を参考に歩行速度V=1.3m/s(階段内は 0.6m/s),最大単位流動量N_{max}=1.5人/(m·s)(座席内通路は0. 8人/(m·s)),最大収容可能密度 ρ_{max} =3.3人/m²(階段内は4.0 人/m²),時間刻み Δ t=1s,分割長さ Δ x=10mとした。計算に 要した時間は前処理に半日,計算に数時間,出力に2日の 約3日であった。

Table 4に,代表時刻のゾーン密度を図面上に可視化した例を示す。ゾーン密度を図面上に重ねることで時系列の避難性状が直感的にわかる。(a)t=60sでは1階,2階ともにコンコースのゾーン密度が上昇しており,座席内通路を経由してコンコースへの避難が始まっていることが分かる。1階では屋外出口前のゾーン密度も上昇している。これは、先頭の避難者の屋外への避難が完了していることを意味する。同様に、2階では階段のゾーン密度も上昇しており、一部の避難者は階段へ到達していることが分かる。

(b)t=300sでは、1階のすべてのゾーン密度が0となって おり、1階の避難者の屋外への避難は完了している。本ス タディでは270sで1階の屋外への避難が完了した。一方、 2階では1階の避難者の半分しかいないにもかかわらず、 コンコースのゾーン密度は上昇したままであり、一部の 避難者は未だ階段に到達できていないことが分かる。 ジーン密度が上昇している階段付近に着目すると,階段内 部の密度より階段前のゾーン密度のほうが高いことが分 かる。これは,階段入り口の扉幅がネックとなって滞留 が発生していることを意味する。特に,階段1および階段 2に比べて,階段3から階段6の入口前の滞留が大きい。こ れは,階段1および階段2を利用する在館者より階段3から 階段6を利用する在館者の方が多いためである。

なお、Table 4(b)にはエリア毎に座席からコンコースへの避難が完了した時間も併せて示しておく。座席からコンコースへの避難完了時間は、1階と2階でさほど変わらないことが分かる。

(c)t=664sでは1階,2階ともにコンコース,階段のゾーン密度が0となっており,全員の屋外への避難が完了していることが分かる。屋外への避難に要する時間は1階の270sに比べて,2階では664sと倍以上となった。この結果からも滞留が与える影響の大きさが窺い知れる。なお,2階の滞留解消の改善案として,階段の新設や容量(扉幅,階段幅)の増加等があげられるが,(b)t=300sでの階段2入り口前のゾーン密度が比較的小さい点に着目して階段3前コンコースと階段2前コンコースをつなげることで階段2を利用する方法も有効と考えられる。

最後に、本報では触れなかったが、建物火災時におい ては、火災によって発生する煙の影響を避難者が受けな いように配慮することも重要である。煙は、浮力によっ て建物上部から溜まってゆく。そのため、上階にいる避 難者のほうが煙による影響を受ける可能性が高くなる。 上階の避難者は一般的に避難階段を使用して避難しなけ ればならないことを鑑みても、計画初期から避難性状を 精度良く予測し、避難階段の容量や配置を適切に計画す ることが避難安全に極めて重要であるといえる。



Table 4 スタジアムの避難性状予測(ゾーン密度) Evacuation Property Prediction of the Stadium(Zone Density)

6. まとめ

建物火災時において、当該建物から避難中の在館者の 一団を「群集」ととらえ、単位空間(ゾーン)の境界での収 支を考えるゾーンモデルを提案し、本モデルにもとづく 避難性状予測手法を開発した。本報では、その予測手法 の概要を示すとともに、近年実施した群衆避難実験の結 果を用いた精度検証の一例、架空のスタジアムからの避 難性状についてのケーススタディを実施した。

以下に,本手法の特徴を示す。

- ・短期間での結果の把握が可能である。これにより、 複数の計画案を検討でき、避難安全性の向上に寄与 できる。
- ・既往の避難実験をよく再現できる精度を有する。
- ・時系列のゾーン避難者人数から算出したゾーン密度 を図面上に出力することで,滞留度合いを直観的に 把握でき,関係者の間で早期に課題の共有・解決・ 意思決定が可能となる。
- ・なお、5章で示した1万5000人の避難性状予測では、 MASと比較して7割程度作業期間を短縮できる。

参考文献

 国土交通省住宅局指導課,他:2001年版避難安全検 証法の解説及び計算例とその解説,井上書院,326p., 2001.3

- 吉野攝津子,他:マルチエージェントモデルによる 火災時避難安全性能評価技術の開発,大林組技術研 究所所報, No. 77, 2013.
- 吉野攝津子,他:煙拡散・避難シミュレーションモ デルの開発 その1避難シミュレーションモデルの 概要,平成24年度日本火災学会研究発表会,pp.156-157,2012.05
- 4) 山口純一,他:煙拡散・避難シミュレーションモデルの開発 その2煙拡散モデルの概要,平成24年度日本火災学会研究発表会,pp.158-159,2012.05
- 5) 村岡宏,他:煙拡散・避難シミュレーションモデル の開発 その3居室避難のケーススタディ,平成24年 度日本火災学会研究発表会,pp.160-161, 2012.05
- 山口純一,他:廊下の滞留を考慮した群衆歩行性状の簡易予測計算法 平成28年度日本火災学会研究発表会,pp.122-123,2016.05
- 7) 住田沙貴,他:群集歩行性状に関する実験的研究 その6 ネックのある通路,日本火災学会研究発表会梗概集,pp. 54-55,2016.5
- 8) 丹下学,他:複数色マーカーを用いた多人数歩行者 群の画像解析と群集避難実験への応用,日本建築学 会計画系論文集,第730号,pp.2645-2752,2016.12
- 9) 扇谷実沙,他:群集歩行性状に関する実験的研究 その7 直線通路における密度,歩行速度および流動係数に関する考察,日本火災学会研究発表会梗概集, pp. 56-57,2016.5