

### 1.研究の背景と目的

群集流動を扱うエージェントシミュレーションモデルは既に試作<sup>1)</sup>されていたが、事故知見を取り込んだ実験用途のシミュレーターは開発されていなかった。2001年7月21日に花火会場近くの朝霧駅歩道橋上において、集まった通行客による群集なだれが発生し、死者・けが人合わせて258人という大惨事となった。翌年1月には明石市民夏における花火大会事故調査報告書<sup>2)</sup>(事故報告書)公表され、詳細な事故知見が明らかになった。

そこで本研究では、既に試作されていたモデルを改良することにより、この群集事故の再現を試みる。事故報告書と空間研究からの知見整理をふまえて、群集流動シミュレーターの開発を行う。そして上り流・下り流の流動係数ならびに立ち止まり者の列を導入したシミュレーション分析を通じて群集事故防止の方策を探る。

### 2.群集流動事故を検討するシミュレーションモデルの設計方針

セルオートマトン型のエージェントシミュレーションモデルでは、セル空間にかかわる離散近似の制約が存在する。そこでモデルの設計方針を探るため、事故報告書から該当箇所を抽出する作業を行った。この作業から得た方針を以下に示す。(表1)

事故報告書が断定した事故現象は、群集なだれと呼ばれるものである。これは歩道橋上の最大群集密度が13~15(人/m<sup>2</sup>)で生じる(C. ②)。これに対して、将棋倒しは3~5で発生するもので(F. ①②)、過去多くの事故事例が報告されている。そこで、本研究では、滞留状態を表す密度4(D. ①)を危険値として、群集事故の再現ならびに事故防止策の検討に取り組むことにした。

次に流動係数の扱いに着目する。朝霧歩道橋は設計基準値0.33(人/m・秒)よりも厳しい避難計画基準値1.5で設計されていた(A. ③④)。ただし、双方ともに一方向流を想定している。これに対して、事故発生時に推定された流動係数値はピーク時0.48であり、限界容量の1/3程度であった(D. ①)。それにもかかわらず事故が発生した。

この原因の一部として事故報告書が言及したのは、対向流の交錯(F. ④)のほか、歩道橋の階段部分で花火の見物者による立ち止まりによる空間占有(J)についてである。そこで本研究のモデルは、これらの検討を行うものとした。

また、事故報告書には、有効な群集規制が行われなかったとの記述がある(J. II)。そこでシミュレーション実験では歩道橋中央に中央に仕切りを入れた場合の効果を検討する。

表1 群集流動シミュレーター設計に関する事故報告書の記述箇所

	事故報告書 <sup>A)</sup>	ページ	補足説明
A. 朝霧歩道橋について	①幅員6m、階段幅3m →滞留が生じやすいボトルネック構造	4~7 29	アーチアクション：ベアリングの実験より、出口の幅は一つの直径の6倍必要→人間の場合35cm考えると2.1m必要
	②最盛期1日の最大歩行者数14,400人と予測して設計	29	
	③設計歩行者数をピーク時間交通量として1日最大歩行者数の50%とする	資料 編236	7200人/時間=120人/分=2人/秒 2人/秒÷6m=0.33人/m・秒
	④階段部分では1.3人/m・秒が通行可能 1.3人/m・秒×3600秒×3m=14040=約14000人 →混雑が進むと流れは悪くなるため、これより低下する。	29	階段での限界流動係数は上り1.1~1.2人/m・秒、下り1.4~1.5人/m・秒 避難計画では1.3人/m・秒【B】：p.129】
	④有効面積750m <sup>2</sup>	85	モデル領域386.56m <sup>2</sup>
B. 来場者数	①12万~15万人で計画。 実際には、ピーク時に8万3千人いた。	84	集めた写真で頭数を数えた。写っていない子供の数は推定
	②夜店の部分は7人/m <sup>2</sup> だった。(身動きが出来ない状態)夜店部分面積2700m <sup>2</sup>	84 85	
C. 歩道橋上滞留者数	① a. 流入者数と流出者数の差 b. 群衆歩行速度のデータから算定 c. 混雑の状態と群衆密度の関係から求める 以上3種類の方法より歩道橋上には6400人から6500人滞留していた。	86~ 94	最大滞留人数：モデル上2438人+仮想空間上3337人=5775人=6000人 →少なくとも6400人は滞留していたので最大滞留人数を6400人とする。

表1の続き

C. 歩道橋上 滞留者数	②6400人滞留の場合、平均密度9～10人/m <sup>2</sup> 、南側の密集地では13～15人/m <sup>2</sup>	94	群集密度の限界は図上では17人/m <sup>2</sup> だが、10人/m <sup>2</sup> 以上は計画密度として設定しない。【B】：p.135】
D. 流入と 流出	①流入者ピーク時（19：00～19：30で173人/分→173÷60÷6＝0.48人/m・秒） 歩道橋最大通行容量は540人/分（幅員6m×水平部分の流動係数1.5人/m・秒×60秒） ピーク時でも限界容量の1/3程度で、余裕を持って流入。 ②階段3m（270人/分）の容量がある。 3m×1.5人/m・秒×60秒＝270人/分 173人と比べると流れるはず 歩道橋南端部、階段南側から火花が良く見える →立ち止まり。加えて、階段下の夜店の混雑 →階段を通れた人数の制限 ピークで120人/分だんだんと低下	88	群集流動では密度0.5人/m <sup>2</sup> ～4人/m <sup>2</sup> で追い抜きができない時の最高流動係数の1人/m・秒【B】：p.128】 流動の滞留状態は4人/m <sup>2</sup> 程度以上 計画上は4人/m <sup>2</sup> 前後で停止すると考えるのが妥当【B】：p.128】
E. 混雑の 状況と群 集密度の 関係	群集圧力実験からの知見 3～5人/m <sup>2</sup> 群集が普通の速さで歩くことができる。 7～7.5人/m <sup>2</sup> 肩や肘に圧力を感じるが、人と人の間に割り込むことができ、手の上げ下げもできる。 10～11人/m <sup>2</sup> 前方の者は後方から押されて進む（歩行速度は1/2～1/3に落ちる） 12人/m <sup>2</sup> 前後 押されて身動きできず、前進は不可能 12～13人/m <sup>2</sup> 押されて苦しい状態 13～16人/m <sup>2</sup> 非常に苦痛がある状態	93	水平路・階段のサービス水準【B】：p.129】 群集密度のレベル【B】：p.135】 群集密度の限界は図上では17人/m <sup>2</sup> だが、10人/m <sup>2</sup> 以上は計画密度として設定しない。【B】：p.135】 群集密度と圧力の関係【B】：p.135】 群集密度が1.5人/m <sup>2</sup> を超えると自由歩行とはいえない。群集歩行では1.1～1.2m/sが歩行速度の限界【C】：p.94】
F. 群集 事故のメ カニズム	①将棋倒し：後ろから前に転倒 将棋倒し：線上一方向に転倒 ②群集なだれ：前から後ろに転倒 群集なだれ：塊状に多方向に転倒 ③群集なだれの特徴「せりもち状態」「人のいないスペース」「後押しする強い群集圧力」 ④群集なだれの誘因「対向流の交錯」 会場→駅の流れは階段部分から歩道橋の東側に回り込む形で、駅→会場の流れと衝突する。駅→会場の流れは西側に押しやられる形で圧縮される。 駅→会場、会場→駅の流れは歩道橋と階段とのコーナーから北東に向かう斜め方向の線上で擦れ合う形になって対抗する。 ⑤群集なだれの誘因「群集圧力の波」 群集圧力の波が何度か繰返され、多くの人の体重が加算され、強い力の波が押し寄せた瞬間にせりもち状態を打ち壊し、群集なだれを発生させた。 ⑥群集なだれの誘因「小さな群集転倒事故」 幾つかの転倒事故が連続して起きた。大小様々な転倒事故が過密状態の中で複数発生した。	107 107 107～108 108 108～109 109	将棋倒し密度3～5人/m <sup>2</sup> 群集なだれ密度10人/m <sup>2</sup> 以上 滞留現象が発生したところに歩行速度の早い群集が後ろから押し寄せた時、前方群集が押しつぶされ、将棋倒しとなる。また、アーチアクションの結果として群集雪崩となる。【C】：p.91】 群集歩行速度（m/秒）：対向流 1.1（m/秒）、交差流 1.0（m/秒）、合流 0.7（m/秒）【C】：p.97～98】 会場→駅の流れが駅→会場の流れを圧縮し、なだれが生じた群集の密度をより高めた。さらに交錯あるいは衝突による押し合いが、群集圧力の波を引き起こした。
G. 発生 場所と 発生 範囲	南端から駅方向に奥行き25m、歩道橋東西6mの広い範囲に分布。南端から北側23m付近にかけて集中。 まず南西端で発生し、それに続き南端から北へ5m付近を起点に発生。また、南端から30mあるいは50m地点においても小規模な群集転倒事故が発生。	110～111	南西端→モデル計測領域2
H. 事故 人数	中心部の面積20～30m <sup>2</sup> ×13～15人/m <sup>2</sup> より約300人～400人が巻き込まれた。	112	
I. 原因 考察	群集なだれは、極限を超える過密状態となだれの誘因となる隙間の生成により発生した。群集圧力の波や対向流の成立もなだれの発生に関与した。		
J. 過密 群集	I 歩道橋の南端部の階段付近でボトルネックが生じたこと II 分断入場などの有効な群集規制がなされなかったこと	112	特にIについては幅員6mに対して階段幅3mと極端に狭かったこと、歩道橋の上や階段部分で火花見物のために観客が空間を占有したこと、階段の間近まで夜店が設営され、夜店に集まった群集が階段から降りてくる来場者の通行を阻害したことが原因にあげられる。ボトルネックに関わったのは、夜店の設営とそこでの混雑。
K. 誘発 空隙	①子供などの転倒やうずまり ②群集の後ずさりや引き剥がし ③西端のフェンスの倒壊	112～113	
L. 構成	小学生以下の全体に占める人数割合26%	資料編251	

### 3. エージェントアプローチによる ASPF の開発

3.1 ASPF におけるスケーリング設定 本研究で開発した群集流動シミュレーター ASPF (Agent Simulation of Pedestrian Flow) は MAS (Multi Agent Simulator) 上で実装されたものである。

ASPF では、空間スケールは 1 セル 40cm 四方で表される。時間スケールは 1 ステップ 0.5 秒とした。歩行空間は正方形のセルによって構成され、歩道橋の一部である通路幅 6.8m (17 セル) 長さ 40m、階段幅 3.6m (9 セル) 長さ 25.6m で総面積 386.6 m<sup>2</sup> (2416 セル) の L 字型空間をモデル化する。このモデルでは実際の歩道橋の有効面積の約 5 割をカバーした。ただし、階段の段差は捨象している。1 セル 1 人まで入ることを基本ルールとするが、周辺の密度 2 以上の高密度歩行時には L 字型空間の屈曲部で 1 セルに 2 人占有ができることとする。このため理論的に表現できる最大密度は 12.5 である。

### 3.2 エージェント歩行行動ルールの概要

本研究では、前節の抽出作業をふまえて、これら知見と整合性を保つよう、歩行行動ルール群に追加・変更作業を行った。その結果確定した ASPF のシミュレーションアルゴリズムを図 1 に示す。

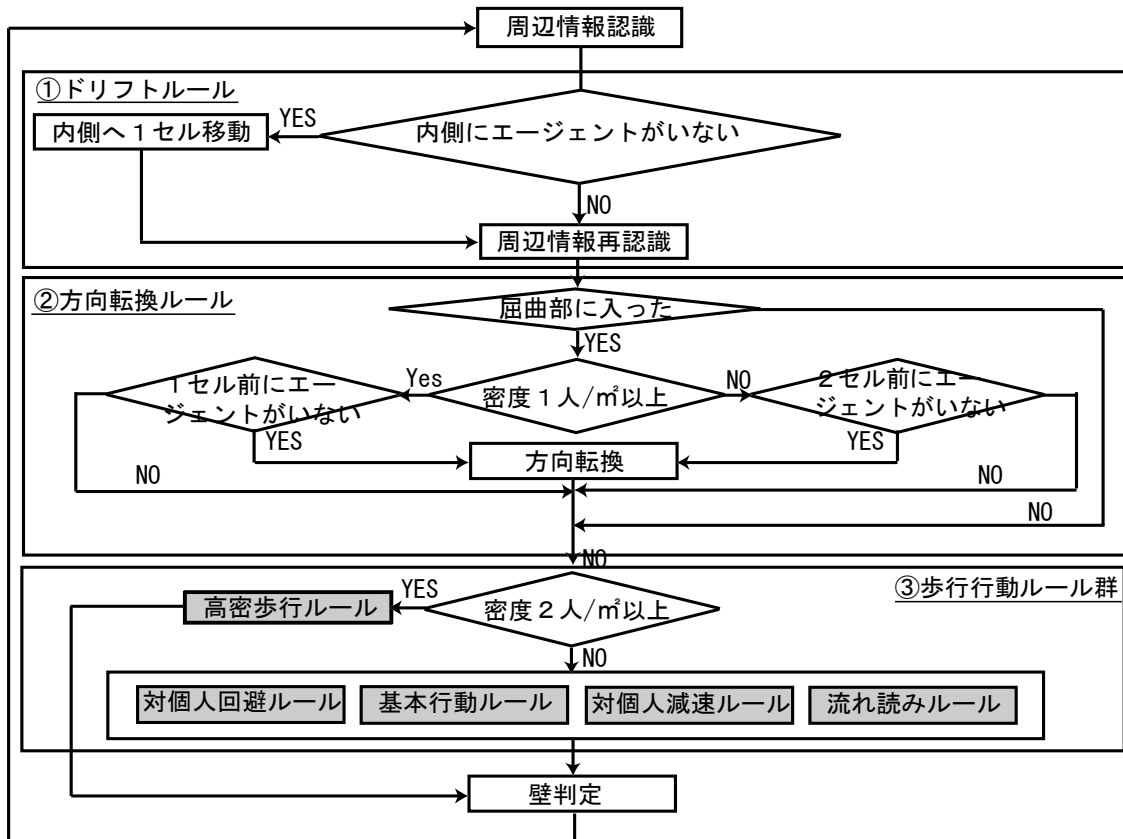


図 1 群集流動シミュレーター (ASPF) のアルゴリズム

エージェントの行動ルール適用順は①ドリフトルール、②方向転換ルールそして、③歩行行動ルールの順に適用される (図 1)。エージェントの歩行行動ルールは、基本行動ルール (6 個)、対個人減速ルール (8 個)、対個人回避ルール (4 個)、高密度歩行ルール (3 個)、流れ読みルール (1 個) の計 22 個ある (図 2)。

ここで、③歩行行動ルールを説明する。

基本行動ルールは低密度歩行時 (密度 2 以下) におけるエージェントの基本歩行ルールである。⑤⑥では進むセル数は乱数によって決まる。

対個人減速ルールでは低密度歩行時に前後のエージェントとの距離をとり、他のエージェントの存在により減速を促されるが、⑦⑧⑨⑩⑪では乱数により直進が決定する。

対個人回避ルールでは低密度歩行時に左右のエージェントとの距離をとり回避をするルールである。

高密度歩行ルールは高密度歩行時 (密度 2 以上) に人々は左右の間隔を減らすよりも前後の間隔を減らしていく作用がある。

流れ読みルールは、進行方向右領域をみて他のエージェントへの追従、回避の判断を規定する。

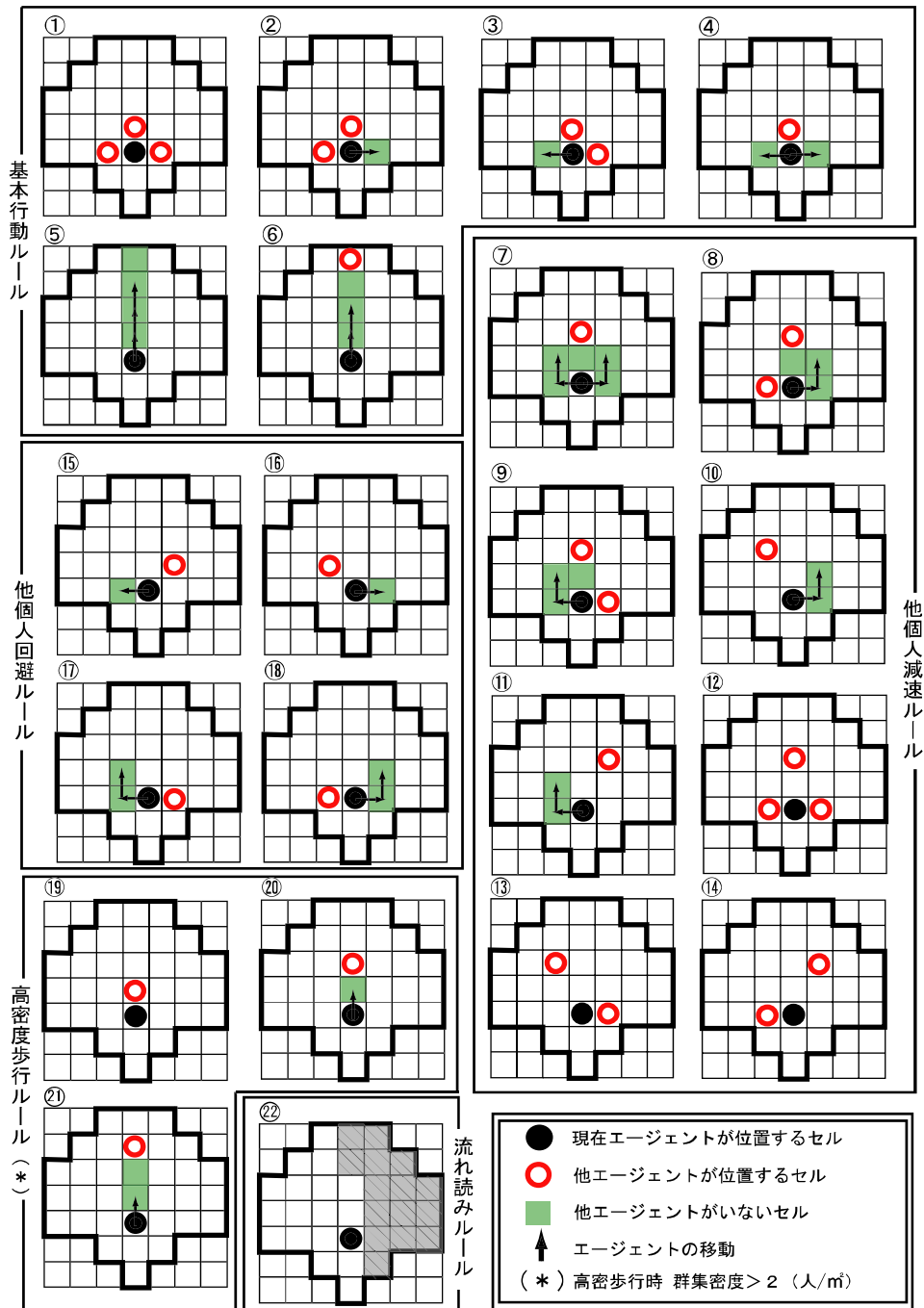


図2 歩行者エージェントにおける歩行行動ルール群

### 3.3 直進流の速度計測

空間研究の数々は直進一方向流の密度-流速関係を実測している。図3はそれらを示すグラフである<sup>3)</sup>。ここでASPFにおける直進流の計測結果を図3に書き加えた。改良された歩行行動ルール群に改良を加えたシミュレーションモデルでの密度-流速関係は、実際の歩行流のそれらに近似している。

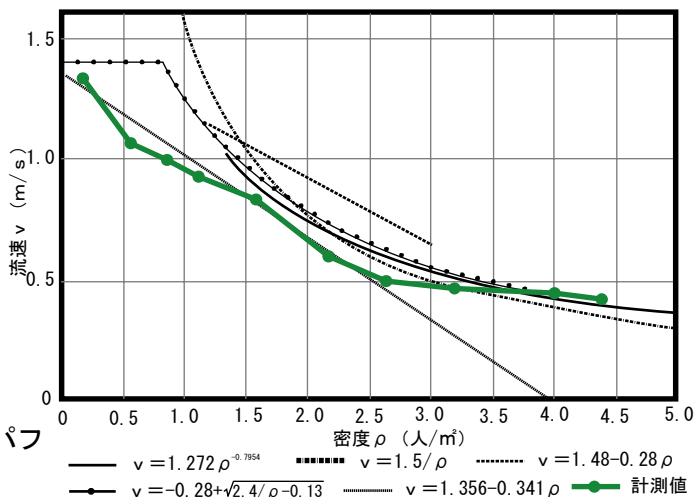


図3 エージェントシミュレーションのパフォーマンス (密度-流速関係)<sup>3)</sup> に加筆

### 3.4 イン＝アウト行動の表現

事故報告書が言及するところによれば、図4 (b) に示す歩道橋上の会場から駅への流れ（上り流）は「階段部分から歩道橋の東側に回り込む形で、図4 (a) に示す駅から会場への流れ（下り流）と衝突することになる（図4 (c)）。そのため、下り流は西側に押しやられる形で圧縮される。2つの流れは、歩道橋と階段とのコーナーから北東に向かう斜め方向の路上で擦れ合い」、事故発生の一因となった（F. ④）とある。

この説を説明する歩行者のマイクロ動因を乗用車のドライビングテクニックに喩えて、イン＝アウト行動と称する。つまり、下り流では、南進時には内側（進行方向右側）に寄り、右折後は外側（左側）に寄る傾向にある。このケースでは、階段南側は眺望が開放されているため、この傾向が強まる。また、上り流も、同様に東進時には内側（左側）、北進時には外側（右側）に寄ると考えられる（図4）。

このイン＝アウト行動をシミュレーションモデルに表現するために導入したのがドリフトルールを導入である。ドリフトルールは方向転換ルールの前に適用され、エージェントは内側の隣接セルに他者がいないセルを見つけた場合に内側に移動するものである。

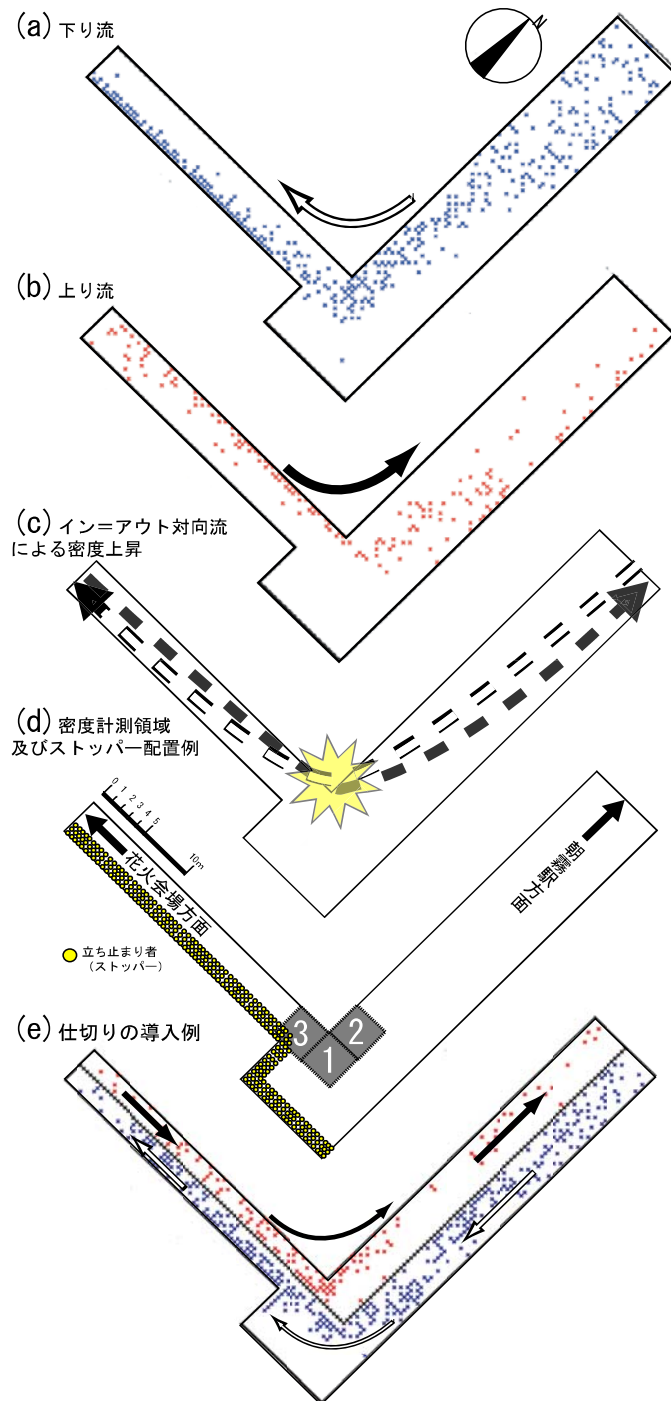


図4 朝霧駅歩道橋を模した空間モデルと密度上昇

## 4.ASPFを用いた群集流動シミュレーション分析

### 4.1 シミュレーション実験の概要

事故報告書では、対向流の存在や立ち止まり者の占有について言及したが、その程度についての試算はされていない。本研究では、対向流や立ち止まり者の程度について確認することを目的とし、シミュレーション実験を行う。

流動係数を上り流・下り流それぞれ0、0.5、1.0、1.5、2.0の5ケース、立ち止まり者（以下ストッパー）の配置を、基本ケース（ストッパー無し）、2、3、4、5列と通行規制の6ケース（図4（d）（e））を組み合わせてシミュレーションを行った。

（先にシミュレーションをしたストッパー無しの場合に密度上昇が著しかったケースは、ストッパーを配置した場合ではシミュレーションを省略した。）

3ヶ所の密度計測領域は図4（d）に示したが、これらは事故報告書に記述のある転倒者の集中した場所の分布図を基にしており、実際の事故の際に密度がいずれも高かった領域である。報告書が特定した群集なだれの発生場所は領域2である。

シミュレーション実験では、概ねどのケースでもエージェント数と各領域密度が定常になる200ステップ（100秒）時の値を計測した。また実験結果は5回もしくは10回の平均値である。

図4（e）に示す通行規制とは、エージェントの歩行空間の中央に仕切りを設け、上り流と下り流が分離した空間モデルである。

### 4.2 ケース別シミュレーション結果・分析

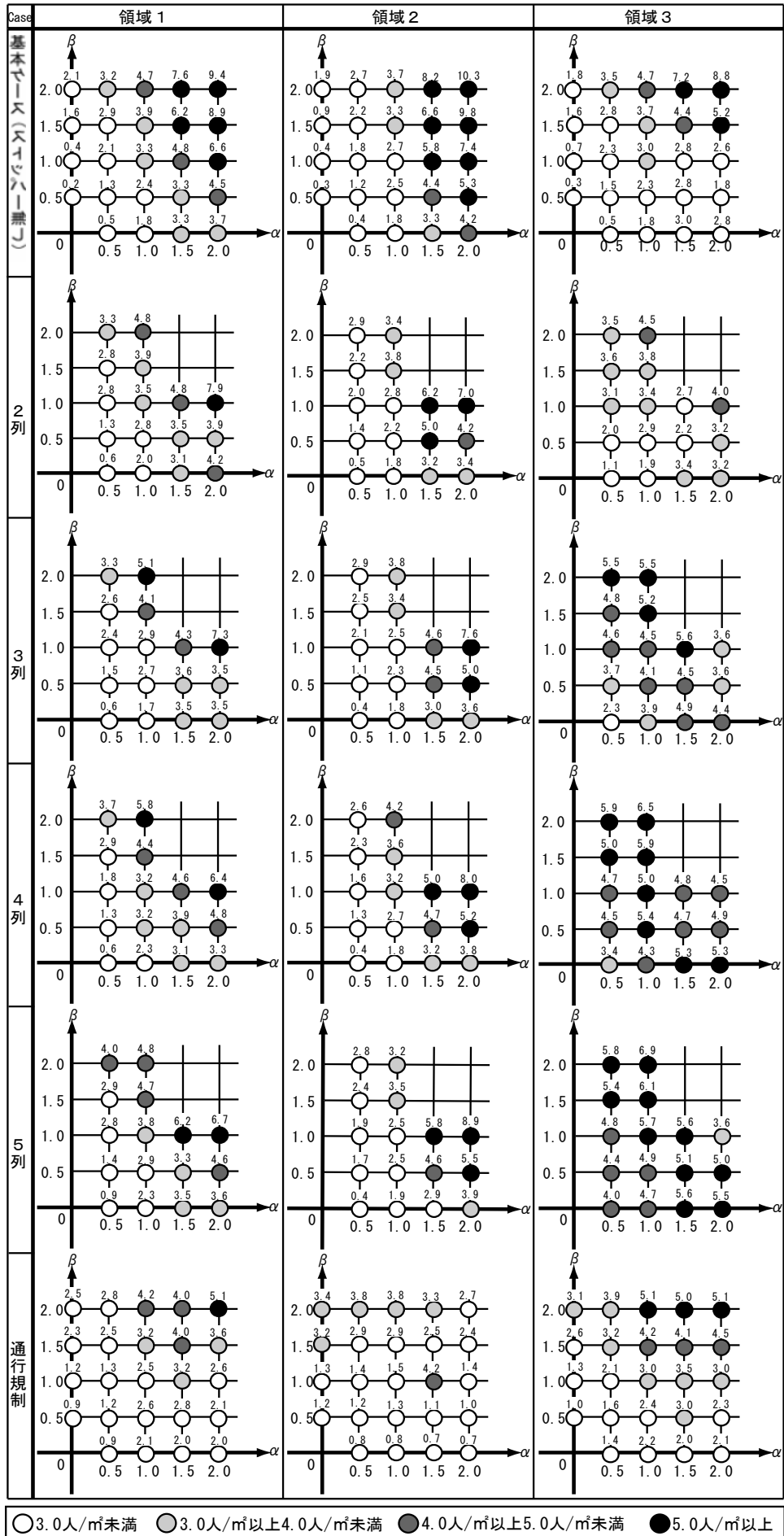
図5にシミュレーション結果を示す。

一方向流の場合、領域2において危険値をこえるケースがある（ $\alpha=2.0$ 、 $\beta=0$ ）ものの、他のケースでは危険値を超えることはない。これは朝霧歩道橋が避難計画基準値1.5を満たしていること示している。

また対向流の場合、一方向流に比べ密度上昇が見られる。特に $\alpha$ が1.5以上の場合にその傾向が強く見られる。 $\alpha=1.5$ 、 $\beta=0.5$ の場合に一部の領域において危険値をこえる。 $\alpha$ が1.5以上において領域2の密度が領域2、3の密度よりも高い。また領域2での密度上昇が領域1さらに領域3へと波及していつていることが分かる。

次にストッパーの列数に着目してみると、ストッパーは、双方の流動係数の大きさによって異なる。流動係数がともに小さい場合（目安として双方の和が2以下）、密度上昇は領域1、2よりも、領域3で著しい。このことにより、ストッパーの存在が領域3での密度上昇を誘発していることが分かる。またともに大きい場合、反対に密度上昇は、領域3よりも領域1、2の密度が高くなるのは流動係数 $\alpha$ 、 $\beta$ がともに大きいケースである。これは領域3で発生した密度上昇が領域1、2に波及した結果、密度上昇が引き起こされたためと考えられる。

さらに仕切りを導入した通行規制の場合では、危険値をとるケースは少なくなっている。例えば $\alpha=1.5$ 、 $\beta=0.5$ のケースでは、領域2の密度は規制無し（基本ケース）の1/4となり、その効果が見られる。このことは基本ケースにおいて、領域2から波及していった滞留状態のメカニズムが通行規制によって解消されたことを示している。しかし、通行規制の場合、上り流、下り流の流動係数が小さいときに、エージェントが通行できる幅が決められてしまうため、通行規制無しの場合に比べて密度が高くなる傾向がみられた。



○ 3.0人/m<sup>2</sup>未満   ● 3.0人/m<sup>2</sup>以上4.0人/m<sup>2</sup>未満   ● 4.0人/m<sup>2</sup>以上5.0人/m<sup>2</sup>未満   ● 5.0人/m<sup>2</sup>以上  
 $\alpha$  : 下り流動係数 (人/m $\cdot$ s)    $\beta$  : 上り流動係数 (人/m $\cdot$ s)   ※ 5回または10回の平均値

図5 シミュレーション結果

## 第5章 結論

本研究では、事故報告書や空間研究からの知見を統合的に取り込んだ群集流動シミュレーターASPFの開発を報告した。ASPFは、歩道橋事故における群集なだれの再現よりは、将棋倒しリスクに着目して事故防止の方策を探るものである。シミュレーション結果は、対向流ならびに立ち止まり者の存在により、設計基準を満たす歩道橋においても事故が引き起こされることを示している。また仕切りなどの通行規制は群集事故の防止に有効な方策となることを確認した。これらの知見はASPFの高い実用性を示すものである。

## 参考文献

- 1) A Study on Pedestrian Flow by Using an Agent Model —A Simulation Analysis on Asagiri Overpass Accident 2001— Kaneda, Yano, Misaka, Suzuki and Yamada 2002年 Meeting the Challenge of Social Problems via Agent-Base Simulation T.Terano・H.Deguchi・K.Takadama(Eds) SPRINGER
- 2) 明石市民夏まつりにおける花火大会事故調査報告書 事故調査委員会 2002年1月
- 3) 建築設計資料集成[人間] 日本建築学会編 2003年 丸善
- 4) 地域防災データ総覧[地域避難編] 財団法人 消防科学総合センター 1987年3月
- 5) 立体横断施設技術基準・同解説 社団法人日本道路協会 1979年1月