

避難路ボトルネック問題に関する一考察

田中 尉貴^{*1}, 谷本 潤^{*2}, 萩島 理^{*2}, 脇山 宗也^{*3}

*1 九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻

*2 九州大学大学院総合理工学府環境共生工学部門

*3 (株)構造計画研究所 / 九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻

概要

柳澤・友枝・西成 (2007) のフロアフィールドと衝突の効果を考慮したモデルに一部改良を加えたセルオートマトンモデルを構築した。避難口前に障害物を置くことで流動効率が向上することを演繹及び数値計算により示した。

A Study on the Bottleneck by an Evacuation Exit

Yasutaka Tanaka^{*1}, Jun Tanimoto^{*2}, Aya Hagishima^{*2}, Motoya Wakiyama^{*3}

*1, *2, *3; Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University.

*3; KOZO KEIKAKU ENGINEERING Inc.

Abstract

An improved cellular automaton model based on Yanagisawa & Tomoeda, Nishinari (2007) was established, where both Static Floor Field and collision effect were considered. Several model parameters were carefully determined by going through a turning process based on experimental data provided by other previous studies. Both results by simulation based on the model and analytical approach derived from the so-called Mean-Field Approximation proved that the outflow rate from an evacuation exit, usually estimated by the so-called flow coefficient, can be improved by putting appropriate obstacles in front of the exit. This is because the appropriate allocation of obstacles can deflate collision probability at the exit by increasing collisions around the obstacles before the exit.

1 緒言

著者らは渋滞で云う bottleneck 問題が、ゲーム理論で云う *ST* 互恵[1]やマイノリティゲーム、情報学で云う資源割り当て問題と同様の数理構造である点に注目し、車線狭窄部の流れ場を解析し数理的ジレンマが存在することを明らかにした[2]。災害時における屋内からの退避を考えると、避難路前に群衆が殺到し、所謂、人のアーチが形成されて流動効率が低下することはよく知られており、この現象は 2 次元の bottleneck 問題である。このようなアーチ形成による bottleneck に対して、避難口前に障害物を設置すると流動効率が向上することが実験データによっても裏付けられている[3]。ゲーム理論との相似性の観点立つと、この現象は人間エージェントの流動を障害物と云う機械的機構によりコントロールすることで、*ST* 互恵に誘導していると見做すことが出来る。パニックとなって殺到する人間には正常時の意志決定は期待できないから、このような建築的、設備的な機構により、*ST* 互恵を創発させ、避難の効率を向上させるアイデアは有効であろう。

本論では以上のような背景の元、まず、2 次元の

セルオートマトンをベースにする避難口周りの人間エージェント流動シミュレーションモデルを構築し、流動係数を向上させる避難口周りの有効な流動コントロール法を工学的に究明することを目的としている。

2 モデル

本論モデルは floor field セルオートマトンモデル [4]-[7]を基礎とし、これに衝突の効果 [3] を考慮し、モデル全体を避難口周りのアーチを再現した実験データ[3]をトレースするようにチューニングした枠組みにより構成される。

2.1 フロアフィールド

本モデルでは、空間を $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ のセルに分割する。歩行者エージェントは 1 時間ステップごとに障害物や他エージェントに占有されていない隣接セルへの移動が可能である。

座標 (i, j) で表記される各セルには避難口からの距離に応じた Static Floor Field (以下, SFF) の値 S_{ij} が付

E: Evacuation Exit

		E		
3	2	1	2	3
$2+\sqrt{2}$	$1+\sqrt{2}$	2	$1+\sqrt{2}$	$2+\sqrt{2}$
$1+2\sqrt{2}$	$2+\sqrt{2}$	3	$2+\sqrt{2}$	$1+2\sqrt{2}$

Fig.1 An example of the assumed SFF.

されている．本研究では，先行研究[3]とは異なり，SFFの定義に斜め方向近傍を考えるのならば，エージェントが移動出来る近傍にも斜め方向を考えるべきだとの立場を取る．そこで，エージェントにはMoor近傍への移動を許容し，Fig.1 に示すようにセル (i, j) から観た上下左右方向の S_{ij} 増減は ± 1 ，斜め方向のそれは $\pm\sqrt{2}$ とした．Fig.2 は，(a)エージェント移動をvon Neumann近傍，上下左右方向 S_{ij} 増減を ± 1 とした場合，(b)エージェント移動をMoor近傍，上下左右および斜め方向 S_{ij} 増減を ± 1 とした場合，(c)上記した本研究の場合における S_{ij} の値と各場合に基づくシミュレーションによって得られる避難口前に形成される群衆の形状を併示したものである．(c)が最も現実との対応上，妥当であることが確認できる．

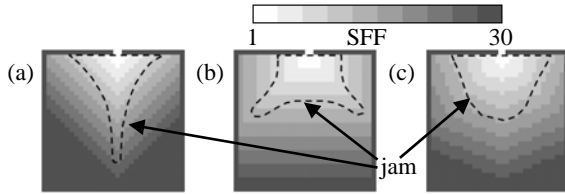


Fig.2 Comparison of several possible SFF models and their mob lines in front of evacuation exit.

歩行者エージェントの隣接セルへの移動は確率的に決定される．いま座標 (i, j) にいるエージェントが隣接セル (k, l) へ移動する確率 P_{kl} は，

$$P_{kl} = \beta \cdot \gamma_{kl} \cdot \frac{\exp(-k_s S_{kl})}{\sum_{i-1 \leq m \leq i+1, j-1 \leq n \leq j+1} \exp(-k_s S_{mn})} \cdots (1)$$

ここで， k_s はSFFのモデルパラメータ， β は避難口に近いセルでの移動確率を小さくする効果を意味し，本研究では $\beta=1$ とする．また γ_{ij} はそのセルが壁や障害物であれば0，それ以外は1を返す．

エージェントの移動はシンク口更新とする．

2.2 衝突の効果

同一セルに二人以上が移動しようとする時，確率 μ で衝突が生じる．その際，当該セルへの移動は行えない．従って，確率 $1 - \mu$ でランダムな1人は当該セルへの移動が可能である． μ は先行研究[3]を踏まえ，当該セルへ移動しようとするエージェント人数 k の増加関数として，以下で付与する．

$$\mu(k) = 1 - (1 - \xi)^k - k\xi(1 - \xi)^{k-1} \cdots (2)$$

ここで ξ は衝突に関するモデルパラメータである．

2.3 モデルのチューニング

文献[3]では50人の被験者が室内から幅0.5mの避難口を通過して退避する時間を計測することで流動係

数 q [person/(ms)]を実験的に求めている．その際，被験者に1列に並んで貰い，秩序だてて退避するケース，思い思いに退避して貰う（避難口前には人アーチが形成される一般的退避プロセス）の2モードを実験し，前者の結果は3.2[person/(ms)]，後者のそれは2.75[person/(ms)]であると報告している．

本モデルにおいて，1列に並んだエージェント群が幅1セルの避難口から退避する際の最大流出フラックスは0.5[person/(cell·step)]である．この値と $q=3.2$ [person/(ms)]が一致する条件として，実時間とシミュレーションの1時間ステップとの比1/3.2[s/step]を得る（但し，セル長は0.5m）．

(1)式中のモデルパラメータ k_s は，例えば，あるセルから前方の目的地に向かって移動する場合，目的セルまでのユークリッド距離が小さくならない方向（後方，斜め後方，側方）のセルに移動する確率は十分ゼロに近い値を取るようすべきである．このことから， k_s は大略5以上であることが要請される．

(2)式中のモデルパラメータ ξ は以下のように定めた．すなわち，以上のモデルにより， k_s と ξ を適当に仮定して15m×15mの室から300人が避難口0.5mを通過して退避するシミュレーションエピソードを実行し，求めた流動係数と上記の実験値2.75[person/(ms)]との誤差が最小になるような k_s と ξ を同定する．パラメータ設定による流動係数の誤差特性をFig.3に示す．

誤差が小さい領域では， k_s による感度を持たない．図より，最適パラメータとして， $\xi=0.383$ ， $k_s=5.5$ の組み合わせを得た．

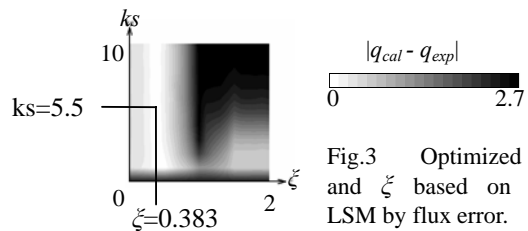


Fig.3 Optimized k_s and ξ based on the LSM by flux error.

3 平均場近似による避難口近傍の密度特性

障害物の設置により避難口の流動係数が増加する可能性としては，避難口に至る手前の空間で流動を制御することで，避難口における衝突を減殺して効率を上げる効果が考えられる．これは現実世界に照

らして云うと、障害物を設置することで、避難口前に人のアーチを形成させないことに相当する。この可能性を検討するために避難口の密度を最大化する避難口直前セルの密度を平均場近似により演繹した。

Fig.4(I)の避難口幅 1 セル (0.5m) の場合、直前セル密度を α とすると、避難口の密度 $F(\alpha)$ は、

$$F(\alpha) = (1-\mu)[a^3\beta^3 + 3a^3\beta^2(1-\beta) + 3a^2(1-a)\beta^2] + 3a^3\beta(1-\beta)^2 + 6a^2(1-a)\beta(1-\beta) + 3a(1-a)^2\beta \dots (3)$$

で与えられる、但し、 μ は一定値とする。 μ と β を変化させたとき $F(\alpha)$ を最大化させる α を求めコンターで表現した結果が Fig.5(a) である。 $\beta=1$ のラインに着目すると、衝突が低い確率でしか生起しない ($\mu=0$) 場合は、直前セルの密度は高密度である ($\alpha=1$) 方が避難口密度は高くなる (流出フラックス or 流動係数は大きくなる) が、衝突の効果が無視できない場合は、直前セルの密度は却って低い方が避難口密度は高くなること分かる。衝突確率が 1 であれば、直前セル密度 α は $1/3$ に漸近する。避難口幅 2セル, 3セル, 4セル, 5セルの結果が、夫々 Fig.5(b), (c), (d), (e) である。これらは、Fig.4(II)~(VI)の平均場近似を重ね重ねて求まる。

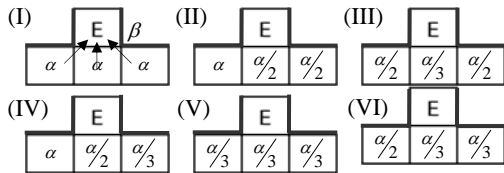


Fig.4 Deduction cases for respective exit widths through the superposition.

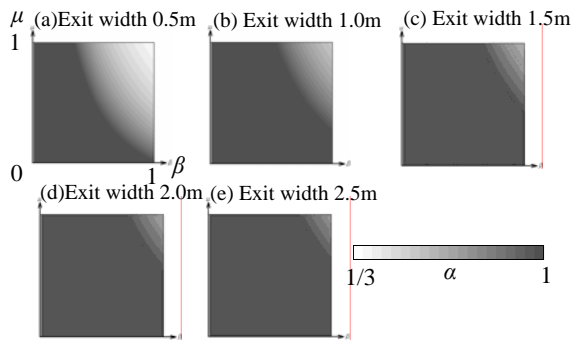


Fig.5 Density of adjacent cells to the evacuation exit to maximize out-flowing flux.

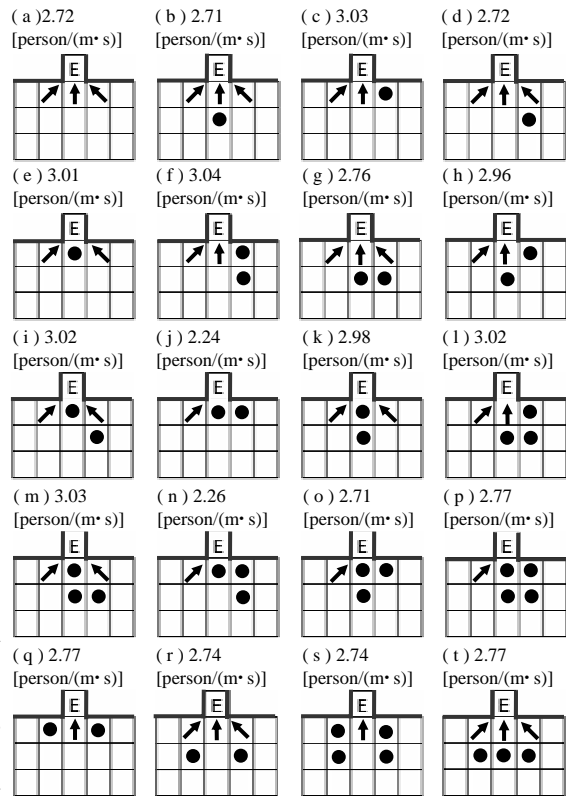
以上の結果を総観するに、避難口周りの衝突の影響が無視できない場合、避難口直前の密度を低密にすることで、すなわち障害物の設置により避難口に至る手前で整流することは流動効率向上に寄与することがわかる。その効果は避難口幅が小さいほど顕著

で、幅が実寸で 2.5m を超えるような場合は、あまり意味がなくなることが推量される。

4 障害物が流動係数に与える影響

障害物の設置により避難口に至る手前で人の流れを整流することが流動効率向上に寄与することがわかった。本章では構築したモデルを適用して、その効果を数値計算により明らかにする。15m x 15mの室から 300 人が避難口 0.5m を通って退避する状況を想定する。本稿では避難口直前の 6 セルに障害物を設置する状況を考える。全パターン 2⁶通りのうち、完全に避難口を塞いでしまうケースを除き、さらに対称条件を適用すると、検討ケースは Fig.6 の 23 パターンとなる。流動係数は最初の人間エージェントが退避してから、290 人目が通過するまでの時間を計量することで求めた。Fig.6 中には各パターンにおける流動係数の計算結果を併示している。障害物の設置により、流動係数が 12% 向上するケースもあれば、約 18% 減少するケースもあることがわかった。

Fig.7 は障害物のない Fig.6(a)のパターン (以下、標準パターン) における(a)密度分布と(b)衝突発生率分布(20 試行アンサンブル平均)である。これらは、流動係数の定義同様、最初の人間エージェントが



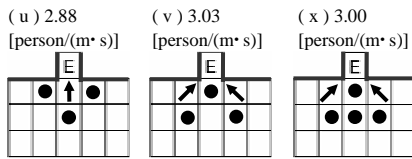


Fig.6 Assumed 23 patterns with/ without obstacles. Each arrow means a possible direction from a first neighborhood cell to the evacuation exit. A closed circle indicates an obstacle.

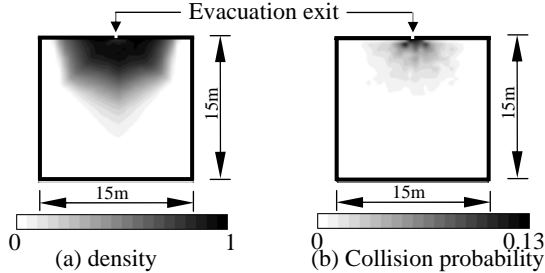


Fig.7 Density and collision probability distribution of the standard pattern ensemble average of 20 trials

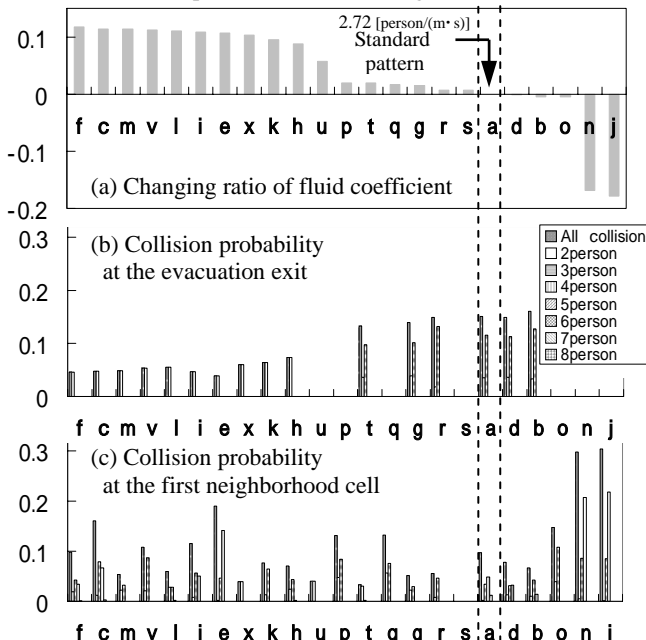


Fig.8 Result of each pattern : (a) changing ratio of fluid coefficient, (b) Collision probability at the evacuation exit, (c) Collision probability at the first neighborhood cell

退避してから、290 人目が通過するまでの時間で計量している。(2)式からも諒解されるように実際の衝突イベントは 2 エージェントによる 2 重衝突から、8 重衝突まであり得る。Fig.8 は、標準パターン含む 23 パターンを流動係数の大きい順に左からソートし、夫々、(a)標準パターンに対する流動係数の増減割合、(b)避難口における全衝突発生率と n 重衝突発生率、(c)避難口から見て 1 次近傍セル平均の全衝突発生率と n 重衝突発生率を示している。

流動係数の大小は、大略、避難口における衝突の大小順に一致する。例えば、(m)、(l)、(g)のパターン

の 1 次近傍セル平均衝突発生率はほぼ同値であり、この場合は、流動係数の大小は避難口における衝突発生率の大小順に厳密に一致する。

(c)と(i)は避難口における衝突発生率がほぼ同等である。この場合は、流動係数は 1 次近傍セル平均の全衝突発生率が高い方が大きい。同様のことが、(a)、(d)、(b)の比較においても成り立つ。

(p)、(n)、(j)の各パターンは避難口への侵入方向が 1 つしかないで避難口における衝突発生率はゼロであり、その場合は、流動係数は 1 次近傍セル平均の全衝突発生率が小さい方が大きくなる。

以上のことから、避難口における衝突を軽減させる、そのためにはその直前セルで衝突を多く引き起こすことが、結果的に流動係数を改善することに繋がっていることが分かる。

5 結言

本研究では、避難路における bottleneck 問題とゲーム論で言う ST 互惠との相似性への興味から、floor field を基礎とし、これに衝突の効果を加味して、さらに先行研究による実験結果によりモデルパラメータをチューニングしたセルオートマタ型人間エージェント流動シミュレーションモデルを構築した。

避難口直前セルに平均場近似を適用した検討により、衝突により人のアーチが形成される現実的状況下では、避難口前の空間に障害物を設置することにより人の流れを整流することで、避難口の流動効率を改善できることを示唆した。

数値計算により、障害物設置のパターンを変えながら、流動係数を求めた。その結果、障害物のない状況より上記した流動の効率が改善する場合と障害物が抵抗として作用し効率が悪化する場合、双方があり得、その良悪は、障害物設置により避難口に生起する衝突を如何に低減出来るかにより説明出来ることを述べた。

参考文献

- [1]Tanimoto,T., Sagara,H.; BioSystems 90 (3) 728 (2007).
- [2]山内敦夫, 谷本潤, 相良博喜, 萩島理; 情報処理学会研究報告 2008-ICS-151, 109 (2008).
- [3] 柳澤大地, 友枝明保, 西成活裕, 応用力学研究所研究集会報告 No.19ME-S2 Article No.7 (2007).
- [4] Burstedde,C., Klauk,K., Schadschneider,A., Zittartz, J., Physica A 295 507 (2001).
- [5]Kirchner,A., Schadschneider,A., Physica A 312 260 (2002).
- [6]Kirchner,A., Nishinari,K., Schadschneider,A., Phys. Rev. E 67 056122 (2003).
- [7]Kirchner,A., Klupfel,H., Nishinari,K., Schadschneider,A., Schreckenberg,M., J. Stat. Mech.: Theor. Exp. P10011 (2004).