

# 出口付近の仕切り設置による群衆避難の迅速化

鈴木智哉, 益子岳史

静岡大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

## 概要

部屋からの群衆避難において、開口部を設けた仕切りを出口付近に設置した場合のシミュレーションを行い、仕切り設置が避難時間を短縮し得ることを示した。具体的には、仕切りの開口部の幅は部屋出口の幅よりやや大きい値が効果的であること、開口部の出口正面からのずれにも最適値があること、仕切りと壁の間の距離は小さいほど良いことが示された。また、避難者が多いほど避難時間短縮効果が大きいことがわかった。

## Speed-up of group evacuation by placing a partition near the exit

Tomoya Suzuki, Takashi Mashiko

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

## Abstract

We numerically simulate evacuation processes from a room in which a partition with a slit is placed near the exit, and show that this can reduce the evacuation time. In particular, the simulation results show that the width of the slit should be somewhat larger than the width of the exit, that there is some optimal position of the slit relative to the exit, and that the wall-partition distance should be smaller. Also, the reduction of the evacuation time proved to be more effective for a larger number of evacuees.

## 1. 緒言

避難行動、特に建物からの避難は人々の生活に密接に関係しており、近年多くの関心を集め研究が進められている。これまでに、親族間相互作用を考慮した行動[1], 周囲密度に応じた移動速度の変化[2,3]により避難時間を短縮できることなどが明らかにされてきた。

上述の研究に加え、出口付近での渋滞が避難時間に大きく影響していることが示されている。例えば、部屋出口の幅の増加により、部屋出口に避難者が集まり発生する渋滞が緩和し、避難時間の短縮が可能であることが報告されている[4-7]。また、平板状の障害物を出口付近に設置すると、出口周りでのアーチ状渋滞の形成が緩和され、その結果避難時間が短縮すること[8-10]や、同様に円形の障害物を出口付近に設置すると、避難者同士の

衝突が減って出口付近での渋滞が緩和し、避難時間の短縮が可能となること[10-12]などが明らかにされてきた。これらの研究は、出口付近での渋滞を制御することにより避難時間を短縮できる可能性があることを示している。

そこで本研究では、障害物設置による避難時間短縮の可能性をさらに探るため、開口部を設けた仕切りを出口付近に設置した部屋からの避難のシミュレーションを行う。上述の先行研究[8-12]では、障害物を迂回する際に避難者が二つの流れに分かれ、迂回後にそれらが合流するが、本研究では避難者全員が仕切りの開口部を通るため、一つの流れしか生じない。このように避難者の分岐や合流のない、より単純な設定の下で、仕切りの設置位置や開口部の幅などを変化させ、避難時間への影響を調査する。

## 2. シミュレーションモデル

### 2.1 避難者の移動モデル

本研究では、ソーシャルフォースモデル [13]に基づいたシミュレーションを行う。本モデルでは、避難者が他の避難者や壁に接触したときに働く物理的な力に加え、接触しないときにも働く心理的な影響も考慮する。質量  $m_i$  の避難者  $i$  の運動方程式は次式で与えられる。

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i(t)}{dt} = m_i \frac{v_i^0 \mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij} + \sum_w \mathbf{f}_{iw} \quad (1)$$

$$\mathbf{f}_{ij} = \{A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] + \kappa g(r_{ij} - d_{ij})\} \mathbf{n}_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij} \quad (2)$$

$$\mathbf{f}_{iw} = \{A_i \exp[(r_i - d_{iw})/B_i] + \kappa g(r_i - d_{iw})\} \mathbf{n}_{iw} - \kappa g(r_i - d_{iw}) (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{iw}) \mathbf{t}_{iw} \quad (3)$$

ここで  $r_{ij}$  は避難者  $i, j$  の半径の和  $r_{ij} = r_i + r_j$  であり、 $d_{ij}$ ,  $d_{iw}$  はそれぞれ避難者  $i$  と避難者  $j$  の中心間距離、壁との間の距離である。式 (1) の右辺第 1 項は、大きさが一定で目的地の方向を向く希望速度  $v_i^0 \mathbf{e}_i^0(t)$  に近づくよう速度  $\mathbf{v}_i(t)$  を修正する項である。第 2 項  $\mathbf{f}_{ij}$ 、第 3 項  $\mathbf{f}_{iw}$  はそれぞれ避難者  $i$  が避難者  $j$ 、壁から受ける力であり、式 (2)、(3) で与えられる。式 (2) および (3) の右辺第 1 項は心理的な反発力を、第 2 項、第 3 項はそれぞれ物理的な反発力 (単位方向ベクトル  $\mathbf{n}_{ij}$  は線分  $ij$  の向き)、摩擦力 (単位方向ベクトル  $\mathbf{t}_{ij}$  は  $\mathbf{n}_{ij}$  に垂直の向き) を表す。心理的な反発力は、線分  $ij$  上に壁がない場合のみ作用する。第 2 項、第 3 項の  $g(x)$  は、 $g(x) = x(x \geq 0)$ 、 $g(x) = 0(x < 0)$  であり、接触時のみ働く力であることを表す。また今回のシミュレーションでは、質量  $m_i = 80 \text{ kg}$ 、避難者の断面径  $2r_i = 0.4 \text{ m}$ 、希望速度  $v_i^0 = 1.0 \text{ m/s}$ 、 $A_i = 2 \times 10^3 \text{ N}$ 、 $B_i = 0.08 \text{ m}$ 、 $\kappa = 1.2 \times 10^5 \text{ kg/s}^2$ 、 $\kappa = 2.4 \times 10^5 \text{ kg/m s}$  とする。

### 2.2 シミュレーション条件

本研究では、一方の壁の中央に幅  $W_{\text{exit}}$  の出口がある一辺  $X$  の正方形の部屋からの避難のシミュレーションを行う (本稿では  $X = 30 \text{ m}$  で固定)。図 1 に示すように、出口のある壁から距離  $D$  の位置に仕切りを設置し、部屋出口から距離  $G$  だけ離れた位置に幅  $W_{\text{slit}}$  の開口部を設ける。

初期状態として部屋の主要部分 (仕切りの右側) のランダムな位置に  $N$  人の避難者を配

置する。なお、混雑度の目安として、避難者数を部屋面積で除したもので避難者密度  $\rho$  を定義する ( $\rho = N/X^2$ )。避難開始後、各避難者は上述の運動方程式に従い、まず仕切りの開口部の中心点を目的地とし、通過後は部屋出口の中心点を目的地とし移動する。ただし、仕切りの開口部通過前でも避難者と部屋出口の中心点の間に仕切りがない場合は初めから部屋出口の中心点を目的地とする。避難を開始してから最後の避難者が部屋出口を抜けるまでの時間を避難時間  $T$  として解析の対象とする。

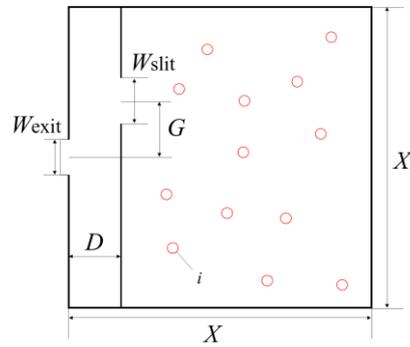


図 1 建物の概形

## 3. 結果と考察

### 3.1 仕切りの開口部の幅の影響

ここでは、仕切りの開口部の幅  $W_{\text{slit}}$  の避難時間への影響について述べるが、まず比較対象として、仕切りがない場合 ( $W_{\text{slit}} = X = 30 \text{ m}$  に対応) の避難者密度  $\rho$  に対する避難時間  $T_0$  のプロットを図 2 に示す。予想される通り  $T_0$  は  $\rho$  とともに単調に増加する、つまり避難者が多くなるほど避難に時間がかかることが確認される。

次に、 $W_{\text{exit}} = 1 \text{ m}$ 、 $D = 2 \text{ m}$ 、 $G = 0 \text{ m}$  を固定して仕切りを設置した場合について、避難時間と  $W_{\text{slit}}$  の関係を示す。図 3 は、いくつかの避難者密度  $\rho$  について、避難時間  $T$  と仕切りなしの場合の値  $T_0$  の比  $\tau = T/T_0$  を  $W_{\text{slit}}$  に対してプロットしたものである。 $W_{\text{slit}}$  が約  $5 \text{ m}$  以上では、 $\tau$  は  $W_{\text{slit}}$  に依存せずほぼ  $\tau = 1$  となっており、仕切りがない場合と同程度の避難時間となっていることが読み取れる。一方、 $W_{\text{slit}}$  が約  $5 \text{ m}$  以下では仕切りの影響が現れており、その影響は避難者密度  $\rho$  によって異なっている。すなわち、 $\rho$  が小さいときには  $W_{\text{slit}}$  が小さくなるほど  $\tau$  は大きくなり、仕切り設置により避難時間が増加しているのに対し、 $\rho$  が大きいときには  $W_{\text{slit}} = 1.5 \text{ m}$  で  $\tau$  は

極小となり、その付近で  $\tau < 1$  となっていることから、仕切りの設置が避難時間短縮の手段として有効に働いていることがわかる。

以上の結果については、次のように考えられる。まず、 $\rho$  が大きい場合、仕切りがない状況では部屋出口に避難者が集まり渋滞が発生する (図 4(a))。この渋滞は、仕切りの開口部により避難者の流れを絞ることで緩和され (図 4(b))、その結果避難時間が短くなる。ここで、開口部の幅  $W_{\text{slit}}$  が出口幅  $W_{\text{exit}}$  ( $= 1 \text{ m}$ ) よりやや広いことがポイントであり、

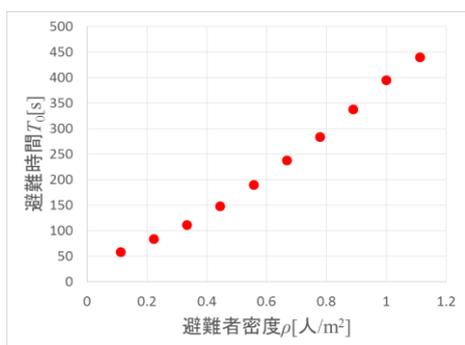


図 2 避難時間  $T_0$  と避難者密度  $\rho$  の関係

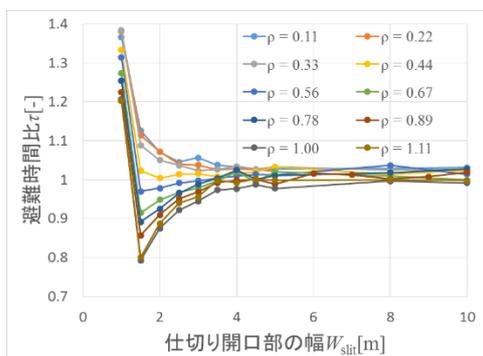


図 3 開口部の幅  $W_{\text{slit}}$  と避難時間比  $\tau$  の関係

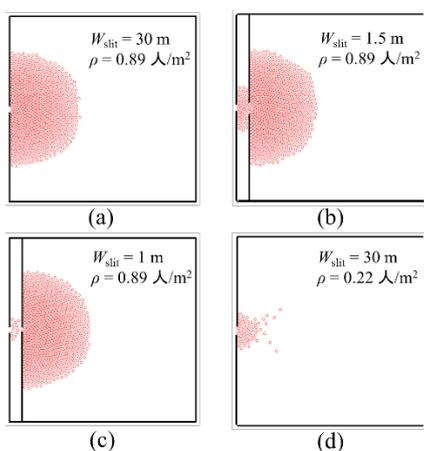


図 4  $W_{\text{slit}}$  を変化した際の避難の様子 ( $W_{\text{exit}} = 1 \text{ m}$ ,  $G = 0 \text{ m}$ ;  $t = 25 \text{ s}$ )

$W_{\text{slit}}$  が小さすぎると仕切りの開口部での絞りが単なるボトルネックとなって避難時間を増加させてしまい (図 4(c))、逆に大きすぎると絞りによる部屋出口渋滞緩和の効果がなくなってしまう。このことは  $W_{\text{exit}}$  を変えたシミュレーションでも  $W_{\text{slit}} / W_{\text{exit}} \sim 1.5$  で  $\tau$  が極小となっていることから裏付けられる。一方、 $\rho$  が小さい場合には、そもそも部屋出口での渋滞が弱いため (図 4(d))、仕切りの開口部による部屋出口渋滞緩和の効果が効かず、ボトルネックとしての影響のみが現れる結果、 $W_{\text{slit}}$  が小さくなるほど単調に避難時間が増加すると考えられる。

### 3.2 部屋出口と仕切りのずれの影響

次に、部屋出口と仕切りのずれ  $G$  の影響について述べる。図 5 に、 $W_{\text{exit}} = 1 \text{ m}$ ,  $D = 2 \text{ m}$ ,  $W_{\text{slit}} = 2 \text{ m}$  を固定した場合の、避難時間比  $\tau = T / T_0$  と  $G$  の関係を示す。まず、全体的に避難時間は  $G$  が増加するとともに増加する傾向が見られる。これは、初期位置から部屋出口までの避難距離が (避難者全体の平均として) 増加するためであると考えられる。なお、 $\rho$  が大きいほど  $\tau$  が小さくなっており、また  $\tau < 1$  となる  $G$  の範囲が広がっているが、これは避難者が多いほど仕切り設置が有効かつ強力に働いていることを示している。

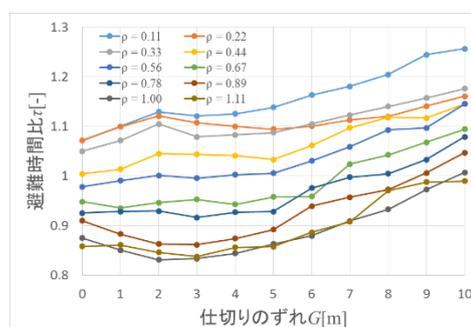


図 5 仕切りのずれ  $G$  と避難時間比  $\tau$  の関係

また、 $\rho$  が大きいときに  $G \sim 3 \text{ m}$  で  $\tau$  が極小となる様子も見られるが、これは以下のように解釈される。仕切りの開口部が部屋出口の正面付近にあるときは、出口には左右から避難者が集まりアーチ状の渋滞が発生し、避難が遅れる原因となる (図 6(a))。開口部がずれると、出口周りの避難者分布が非対称となり、避難者間の心理的反発力も非対称となる結果、ずれ方向から出口に向かう避難者の流れが相対的に強くなり (図 6(b) の大きい矢印) 避難がスムーズになる。図 5 の極小は、

仕切りのずれ  $G$  の増加に伴う分布の非対称化による避難時間短縮効果と避難距離の増加による避難時間増大効果のバランスの結果現れたものと考えられる。

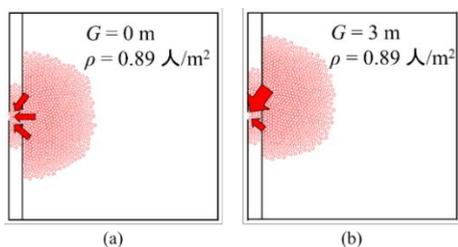


図 6  $G$  を変化させた際の避難の様子 ( $t = 25$  s)

### 3.3 壁と仕切りの間の距離の影響

最後に、壁と仕切りの間の距離  $D$  の影響について述べる。図 7 は  $W_{\text{exit}} = 1$  m,  $W_{\text{slit}} = 2$  m,  $G = 0$  m を固定した場合の避難時間比  $\tau = T/T_0$  と  $D$  の関係を示したものである。

まず、図 3, 5 と同様に  $\rho$  が大きいほど  $\tau$  が小さくなっており、避難者が多いほど仕切り設置が避難時間短縮に有効であることがわかる。また、 $\tau$  は  $D$  とともに増加するが、 $D$  が十分大きくなると増加が止まり一定となること、増加が止まるときの  $D$  の値は  $\rho$  が大きいほど大きくなること、傾向として読み取れる。これについては、以下のように考えられる。

既に述べたように、仕切りがない場合には部屋出口でアーチ状の渋滞が形成されるが、出口近傍に仕切りを設置すれば、この渋滞の

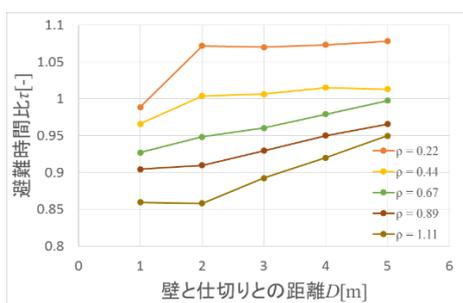


図 7 仕切りと壁の距離  $D$  と避難時間比  $\tau$  の関係

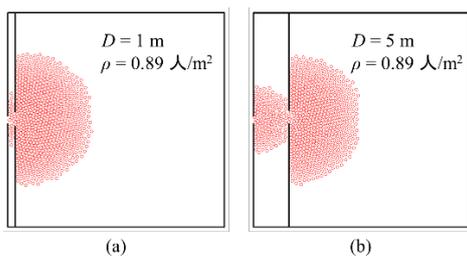


図 8  $D$  を変化させた際の避難の様子 ( $t = 25$  s)

形成が阻害され、避難時間が短くなる (図 8(a))。  $D$  が増加するとより大きな渋滞の形成が許されることになるため避難時間は増加し、 $D$  が渋滞のサイズ程度になると (図 8(b)) 避難時間の変化が止まる。避難者密度  $\rho$  が大きくなると渋滞サイズも大きくなるため、より大きな  $D$  まで  $\tau$  の増加が続くものと考えられる。

## 4. 結言

開口部を設けた仕切りを出口付近に設置した部屋からの避難シミュレーションを実施した。避難者が少ないときは仕切り設置により避難時間が増加するが、避難者が多いときには避難時間を短縮できることを明らかにした。この際、開口部の幅  $W_{\text{slit}}$  は部屋出口の幅  $W_{\text{exit}}$  よりやや大きい値が効果的であること、開口部の部屋出口からのずれ  $G$  にも最適値があること、仕切りと壁の間の距離  $D$  は小さいほど良いこと、また避難者が多いほど避難時間短縮効果が大きいことがわかった。

## 参考文献

- [1] C.-K. Chen, J. Li, D. Zhang, Physica A 391 (2012) 2408-2420
- [2] W. Lei, A. Li, R. Gao, Physica A 392 (2013) 79-88
- [3] R.S. Zheng, B. Qiu, M.Y. Deng, L.J. Kong, M.R. Liu, Communications in Theoretical Physics 49 (2008) 166-170
- [4] V. Ha, G. Lykotrafitis, Physica A 391 (2012) 2740-2751
- [5] L.Z. Yang, D.L. Zhao, J. Li, T.Y. Fang, Building and Environment 40 (2005) 411-415
- [6] R.Y. Guo, H.J. Huang, Physica A 387 (2008) 580-586
- [7] A. Varas, M.D. Cornejo, D. Mainemer, B. Toledo, J. Rogan, V. Munoz, J.A. Valdivia, Physica A 382 (2007) 631-642
- [8] G.A. Frank, C.O. Dorso, Physica A 390 (2011) 2135-2145
- [9] Y.-F. Wei, W. Shi, T. Song, Procedia Engineering 31 (2012) 1077-1082
- [10] L.Z. Yang, D.L. Zhao, J. Li, T.Y. Fang, Building and Environment 40 (2005) 411-415
- [11] D. Yanagisawa, A. Kimura, A. Tomoeda, R. Nishi, Y. Suma, K. Ohtsuka, K. Nishinari, Phys. Rev. E 80 (2007) 036110
- [12] X. Zheng, W. Li, C. Guan, Physica A 389 (2010) 2177-2188
- [13] D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek, Nature 407 (2000) 487-490