

避難者の初期分布を考慮した群衆避難の研究

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

廊下の両側に複数の部屋が並ぶ建物からの避難において、避難者の初期分布が避難時間に及ぼす影響を数値シミュレーションにより調べた。避難者の初期分布を変化させることで、各部屋の出口付近での渋滞が強化または緩和される。避難時間は、各部屋の出口付近での渋滞のバランスによって変化する。本結果は、部屋の出口の幅や廊下の幅、総人数などの条件が与えられたとき、避難者の初期分布を調整することにより緊急時の避難効率を改善できる可能性を示唆する。

A study of group evacuation considering the initial distribution of evacuees

Tomoya Suzuki, Takashi Mashiko

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

Abstract

We numerically simulate evacuation processes from a building comprising many rooms on both sides of a corridor, and investigate the effect of the initial distribution of evacuees on the evacuation time. In-room and in-corridor jams of evacuees are strengthened or alleviated with the change of the initial distribution. The evacuation time depends on the balance between the in-room and in-corridor jams. The results imply that for given conditions such as the room-door width, the corridor width, and the total number of people inside the building, the efficiency of possible evacuation can be improved by controlling the initial distribution of people.

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、部屋の出口の幅や廊下の幅の増加[1-4]、周囲密度に応じた移動速度の変化[5,6]、出口付近の障害物の設置[7-10]、親族間相互作用を考慮した行動[11]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。しかし、従来の研究では、避難者の初期分布は考慮しておらず、避難者は一様に初期配置している場合がほとんどである。

そこで本研究では、避難者の初期分布が避難行動にどのような影響を及ぼすのかを調

べる。特に、廊下の両側に複数の部屋が並ぶ建物において、避難開始時に各部屋にいる避難者数を変化させた際に避難時間がどのように変化するか、できるだけ短時間で避難を完了するにはどのような避難者初期分布にすれば良いかを調べる。

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[12]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.

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

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

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

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, 二人を結ぶ線分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 $2r_i = 0.4 \text{ m}$, 希望速さ $v_i^0 = 1.0 \text{ m/s}$, $A_i = 2 \times 10^3 \text{ N}$, $B_i = 0.08 \text{ m}$, $k = 1.2 \times 10^5 \text{ kg/s}^2$, $\kappa = 2.4 \times 10^5 \text{ kg/m s}$ とする.

2.2 シミュレーション条件

本研究では, 図1のように廊下の両側にそれぞれ M 室の部屋が並んだ建物からの避難のシミュレーションを行う. 各部屋の大きさは $W_x[\text{m}] \times W_y[\text{m}]$, 各部屋の出口の幅は $W_d[\text{m}]$, 廊下の幅は $W_c[\text{m}]$ とする. また, 廊下を挟んで向かい合う部屋の出口位置のずれを $g[\text{m}]$ とする. 避難者の部屋内の初期位置はランダムに決定する. 各避難者は避難開始後, 部屋を出て廊下を左に進み, $x = 0$ の非常口を通過した時点で避難を完了する. 避難者 i が避難完了するまでの時間を $T_i[\text{s}]$ とし, 全 N 人の避難時間 $\{T_i\}$ の最大値を $T_{\max}[\text{s}]$, 平均値を $T_{\text{mean}}[\text{s}]$ とし, 以下では50回のシミュレーション結果の平均値を示す. また特に断らない限

り, $W_x = W_y = 6 \text{ m}$, $W_d = 1.0 \text{ m}$, $W_c = 1.5 \text{ m}$, $g = 0 \text{ m}$, $M = 4$ とする.

本研究では, 大別して y 方向および x 方向の避難者初期分布の影響を調べる. y 方向の初期分布に関しては, 廊下の片側の部屋のみそれぞれ N/M 人の避難者を初期配置した場合(片側配置)と, 両側の部屋にそれぞれ $N/2M$ 人の避難者を初期配置した場合(両側配置)で避難時間の比較を行う. x 方向の初期分布に関しては, 避難距離 $\{D_i\}$ の平均 $D_{\text{mean}}[\text{m}]$ および標準偏差 $D_{\text{sd}}[\text{m}]$ を変化させて避難時間を調べる. ここで, 避難者 i の避難距離 D_i は, i が初期配置された部屋の出口から非常口までの距離で近似する(図1).

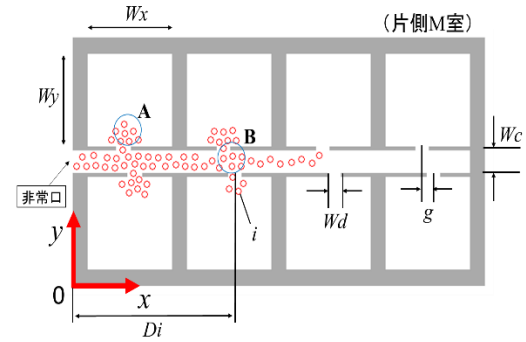


図1 避難の様子

3. 結果と考察

3.1 y 方向の初期分布の影響

まず, y 方向の避難者初期分布について述べる. 図2は, 両側配置と片側配置の各場合について, 最大避難時間 T_{\max} と平均避難時間 T_{mean} を総避難者数 N に対してプロットしたものである. N が小さいときには両側配置のほうが片側配置より避難時間が短い, N が大きいときには逆の関係になることがわかる. この大小関係が逆転する総避難者数 $N = N^*$ を部屋出口の幅 W_d , 廊下の幅 W_c , 向かい合う部屋出口のずれ g に対してプロットしたものがそれぞれ図3, 4, 5である. W_d が小さいほど, また W_c と g が大きいほど N^* が大きくなることがわかる.

以下では, これらの結果について考察する. 複数の部屋からの避難においては, 部屋出口の直前(図1のA)で同じ部屋の避難者同士の渋滞(「部屋渋滞」), 部屋出口の直後(図1のB)で異なる部屋からの避難者同士の渋滞(「廊下渋滞」)が発生し得る. 両側配置を片側配置と比較した際, 一部屋当たりの初

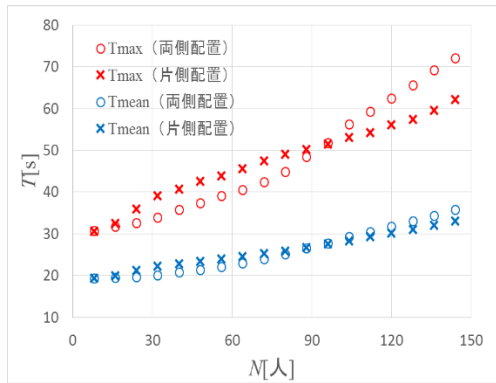


図2 総避難者数 N と避難時間 T の関係

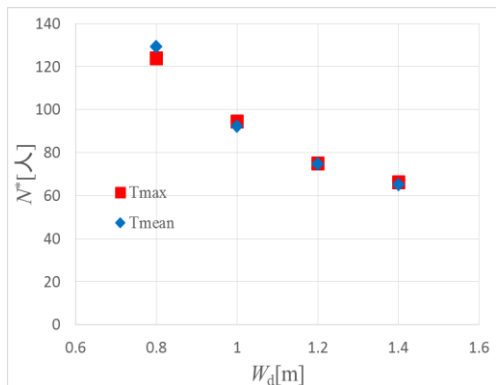


図3 部屋出口の幅 W_d と逆転避難者数 N^* の関係

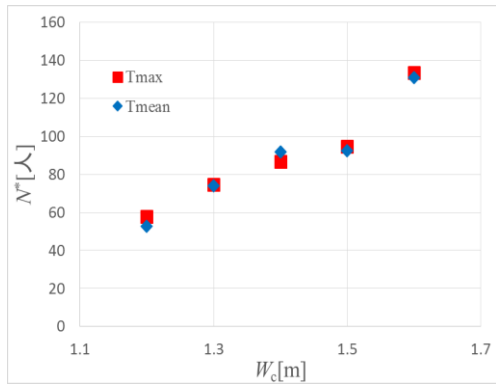


図4 廊下の幅 W_c と逆転避難者数 N^* の関係

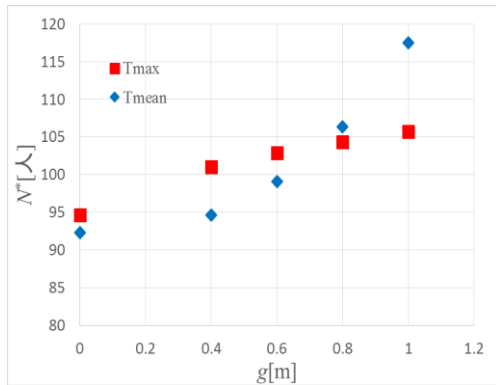


図5 部屋出口のずれ g と逆転避難者数 N^* の関係

期人数が減るため部屋渋滞は緩和し、その一方で向かいの部屋からの避難者がいるため廊下渋滞は強化する。これらの2つの渋滞のバランスによって図2の結果が説明される。すなわち、総避難者数 N が小さい場合は両側配置の廊下渋滞強化の効果が弱いため、部屋渋滞緩和の効果により片側配置よりも避難時間 T が短くなる。一方、 N が大きい場合は両側配置の廊下渋滞強化の影響が強いため、部屋渋滞緩和の効果が隠れて片側配置よりも T が長くなる。

この説明に従えば、部屋出口の幅 W_d を小さくしたときには部屋渋滞が強化されるので、両側配置の部屋渋滞緩和の効果がより強く働くことになり、両側配置の有利さが増し、 N^* が大きくなることになる。また、廊下の幅 W_c や部屋出口のずれ g を大きくしたときには廊下渋滞が緩和されるので、両側配置の廊下渋滞強化の効果があまり影響せず、両側配置の不利さが減り、やはり N^* が大きくなることになる。図3-5の結果は実際にそのようなようになっており、上記の説明を裏付けている。

3.2 x 方向の初期分布の影響

次に、 x 方向の避難者初期分布について述べる。ここでは、廊下の片側の部屋のみを使用する。図6は、標準偏差 $D_{sd}=0$ m (固定)、すなわち全避難者を一部屋に初期配置し、平均避難距離 D_{mean} を変化させて避難者を部屋 ($M=4$) に初期配置した場合のシミュレーションについて、最大避難時間 T_{max} と平均避難時間 T_{mean} を、 D_{mean} に対してプロットしたものであり、図7は、避難距離が平均 $D_{mean}=88$ m (固定)、標準偏差 D_{sd} の正規分布に従うよう避難者を部屋 ($M=25$) に初期配置した場合のシミュレーションについて、 T_{max} と T_{mean} を、 D_{sd} に対してプロットしたものである。 D_{mean} を増加したときは、 T_{max} と T_{mean} はともに線形的に増加している。 D_{sd} を増加したときは、最初 T_{max} と T_{mean} はともに減少するが、 $D_{sd} \sim 6$ m で T_{max} が増加に転じ、一方で T_{mean} は一定値に漸近する様子が見られる。

図6の結果は直感的に理解しやすい。標準偏差 D_{sd} が一定なので、局所的な避難者密度(渋滞の発生しやすさ)は平均避難距離 D_{mean} に依存しない。したがって、避難時間は単純に避難距離に比例すると考えられる。実際、データは $T_{max} = a_{max} \cdot D_{mean} + b_{max}$ および $T_{mean} = a_{mean} \cdot D_{mean} + b_{mean}$ により誤差1%の範囲で良く近似された。また、 $a_{max} \sim a_{mean} \sim 1/v_i^0$ と

なっており、避難者は廊下をほぼ希望速さ v_0 でスムーズに移動していることがわかる。なお、 $b_{\max} - b_{\text{mean}}$ [s] は同じ部屋の避難者の T_{\max} と T_{mean} の差であり、部屋の混み具合を表していると解釈できる。実際、総避難者数 $N = 10, 20, 30, 40, 50$ のときにそれぞれ $b_{\max} - b_{\text{mean}} = 7.16, 12.2, 17.1, 20.3, 24.3$ となっており、 N とともに増加していることが確かめられた。

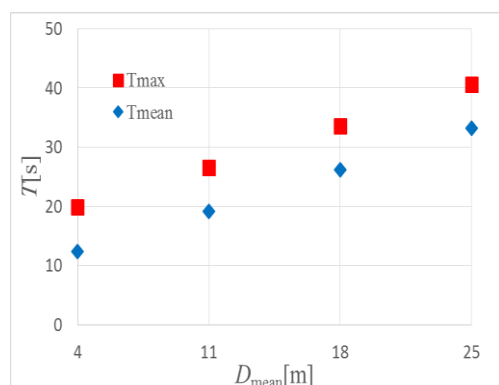


図6 平均避難距離 D_{mean} と避難時間 T の関係

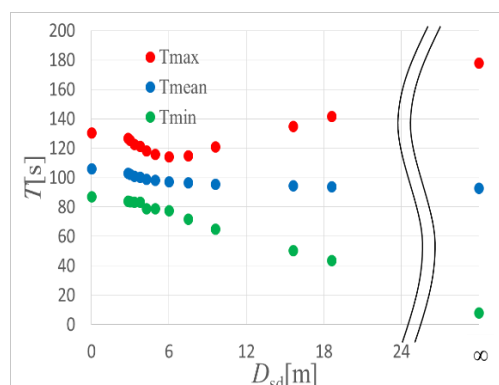


図7 避難距離の偏差 D_{sd} と避難時間 T の関係

図7の結果については以下のように説明できる。標準偏差 $D_{\text{sd}} = 0$ はある部屋に全避難者が初期配置する場合に対応するが、このときには強い部屋渋滞が発生する。 D_{sd} が増加するとともに部屋渋滞が緩和するので、まず最大避難時間 T_{max} と平均避難時間 T_{mean} はともに減少する。さらに D_{sd} が増加し部屋渋滞が避難に影響しない程度まで緩和すると、避難時間は単純に避難距離に応じて変化することになる。したがって、平均避難距離 D_{mean} が一定のため T_{mean} は一定となる一方、避難距離が平均より長い避難者が増えるため T_{max} は増加する。なお、同時に避難距離が平均より短い避難者も増えるため、避難時間の最小値 T_{min} は減少する。

4. 結言

本研究では、廊下の両側に複数の部屋が並ぶ建物からの避難において、避難者の初期分布が避難時間に与える影響を数値シミュレーションにより調べた。部屋出口の直前で発生する部屋渋滞と部屋出口の直後で発生する廊下渋滞の2つの渋滞のバランスが避難時間に大きく影響することを明らかにした。部屋渋滞は、一部屋当たりの避難者数を減らすと緩和し、廊下渋滞は、向かいの部屋の避難者数を減らすと緩和する。そのため、避難者の初期分布を変化させると、各部屋の避難者数が変化し、部屋出口付近での2つの渋滞は強化または緩和する。また、避難時間を短縮する避難者の初期分布は、部屋出口の幅や廊下の幅などの建物の構造や総避難者数によって変化する。このことは、これらの条件が与えられたとき、避難者の初期分布の調整により避難効率の改善が可能であることを示す。

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] X. Guo, J. Chen, Y. Zheng, J. Wei, Physica A 391 (2012) 582-592
- [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] X. Zheng, W. Li, C. Guan, Physica A 389 (2010) 2177-2188
- [11] L.Z. Yang, D.L. Zhao, J. Li, T.Y. Fang, Building and Environment 40 (2005) 411-415
- [12] D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek, Nature 407 (2000) 487-490