

衝突人数が流動係数に与える影響

柳澤 大地^{1,2}, 木村 紋子¹, 須摩 悠史¹, 西 遼佑¹, 友枝 明保¹, 大塚 一路¹, 西成 活裕^{1,3}

¹ 東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻,

² 日本学術振興会 特別研究員 DC1, ³ (独) 科学技術振興機構さきがけ

概要

本研究では、人が部屋から退出する際に出口付近で観測される現象を floor field model に組み込み、避難設計に用いられる流動係数の計算を行った。最も重要な現象の一つは人と人の衝突である。Floor field model は、衝突現象を *friction parameter* で表しているが、*friction parameter* は定数であり、同時に衝突した人数によって値が変化しない。そこで我々は *friction parameter* を、衝突人数の増加に伴って値が増加する *friction function* に拡張した。Friction function を用いたモデルから計算される流動係数は、*friction parameter* を用いたモデルから得られる流動係数よりも、実験データとよく合うことも調べられた。また我々は、障害物を出口前に置くと流動係数が大きくなることを実験により発見し、それを *friction function* により説明することに成功した。

Influence of Number of Pedestrians involved in a Conflict on Pedestrian Outflow

Daichi Yanagisawa^{1,2}, Ayako Kimura¹, Yushi Suma¹, Ryosuke Nishi¹,
Akiyasu Tomoeda¹, Kazumichi Otsuka¹ and Katsuhiro Nishinari^{1,3}

¹ Department of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering, The University of Tokyo,

² JSPS Research Fellow, ³ Japan Science and Technology Corporation

Abstract

In this paper, we have introduced the effect of the phenomena which are observed at an exit in an egress process to the floor field model and calculated the pedestrian outflow, which is used for designing buildings. One of the major phenomena is a conflict. In the floor field model the conflicts are taken into account by the *friction parameter*. However, the friction parameter is a constant and does not depend on the number of the pedestrians conflicting at the same time. We have extended the friction parameter to the *friction function*, which is a function of the number of the pedestrians involved in the conflict. The results of theoretical analysis of the extended model, which represents the conflict by friction function, agree with the experimental results much better than the previous model. We have also found that putting an obstacle in front of the exit increases the pedestrian outflow from our experiments. The friction function clearly explains the mechanism of the effect of the obstacle.

1 はじめに

流動係数 q [persons/(m·sec)] は、単位幅の出口を単位時間当たり何人の人が通ることができるかを表す指標であり、日本では建築基準法で定められた

流動係数の値を用いて安全な建築物の設計が行われている。また [1, 2] では、流動係数が floor field (FF) model から理論的に計算されている。しかし、建築基準法の流動係数は経験的な値であり、通常の FF

model には出口手前でのみ顕著に観測される群集運動の特徴が考慮されておらず、より現実的な流動係数を計算するにはまだ多くの研究努力が必要な状況である。

本研究では、通常の FF model を出口付近で観測される人の動きを考慮して拡張し、理論的に流動係数を計算した。またその計算結果を実験結果と比較することにより、モデルの妥当性を検証した。さらに我々が実験で発見した出口前の障害物が流動係数の値を増加させる現象についても、拡張したモデルで説明することに成功した。

2 Floor Field Model

FF model は、居室を碁盤目状のセルで区切ったセルモデルであり、一つのセルには最大で一人の人が入ることができる。セルに人がいる状態は「1」、いない状態は「0」で表される。またセルには、人が通ることができる通常のセルに加え、人が通ることのできない障害物のセル、人が居室から脱出できる出口セルなどがある。人は通常のセルに書かれた2種類のFFの情報により出口に移動する。一つ目は出口までの距離を表す静的FF(S)であり、人はこの値が減少するセルに移動して行くことにより出口に向かう。二つ目は人の足跡を表す動的FF(D)である。蟻がフェロモンのあるところに動いていくように、人は足跡が残っているセルに移動しようとする。これにより人が他人に追従する効果を取り入れられる。また、複数の人をパラレルアップデートで移動させていると、同じセルに二人以上の人が入ろうとし衝突が起こることがある。そこで *friction parameter* ζ_0 を導入し、衝突が起こった場合、確率 ζ_0 でどちらも移動させず、確率 $1 - \zeta_0$ でどちらか一方を移動させるという方法で衝突を解消する。あるセルに一人の人しか入ろうとしない場合は、衝突が起こらないので *friction parameter* を考慮する必要はない。したがって、衝突現象によって動けなくなる確率 μ_0 を同時に衝突する人数 k に対して書くと、 $\mu_0 = 0$ ($k = 1$), ζ_0 ($k \geq 2$) と書ける。以後本論文では、この μ_0 を $k \geq 2$ で値が変化しないという意味で *friction parameter* と呼ぶことにする。

3 衝突関数

FF model はセルモデルであり、人はノイマン近傍を移動するので、出口での最大衝突人数は三人である。しかし、現実の出口付近には多くの人が集

し、四人以上の衝突も存在すると考えられる。そこで出口周りにより多くの近傍が存在する場合を考える。近傍の数を n とすると、 $n = 3$ の場合が通常の碁盤目状の FF model であり、 $n = 4$ の場合は三角格子状にセルを配置したモデル(三角形は正三角形でなく二等辺三角形)で実現され、 $n = 5$ の場合は通常の FF model において μ -ア近傍を採用することで実現される。一般の $n \geq 6$ の場合にはセルを用いて描くことは難しく図1のようになる。モデル上では、 n は無限に大きい正の数考えることができるが、FF model における1セルの大きさは、 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 程度であり、 n はその周りに集まることができる人数を表すので、 $n \sim 5$ 程度が現実的な最大値である。この n を4以上にする拡張は、現実的な流動係数を計算する上で不可欠である。

逆に移動確率は、出口付近では人は確実に出口に向かうため、単純でも問題がない。そこで動的FFの効果は無視し、静的FFの効果は確率 β で置き換える。確率 α は出口から部屋の外に出る確率を表す。

図1は非常に混雑した居室からの退出口を描いており、出口周りの n 個の近傍全てに人が一人ずつ合計 n 人いて、ある時間ステップに k 人の人が出口セル E に移動しようとしていて、 $n - k$ 人がその場に留まろうとしている状況を表している。例えば $n = 5$, $k = 3$ の場合は、出口セル周りに五つの近傍がありその全てに人がいて、ある時間ステップに五人中三人が出口に移動しようとするという状況である。

$(2 \leq) k (\leq n)$ 人が同時に出口セルに移動しようするとそこで衝突が起こり、*friction parameter* を考えると、通常の FF model と同様に確率 ζ_0 で全員がもともといたセルに留まり、確率 $1 - \zeta_0$ でいずれか一人が出口セル E に移動する。しかし現実で

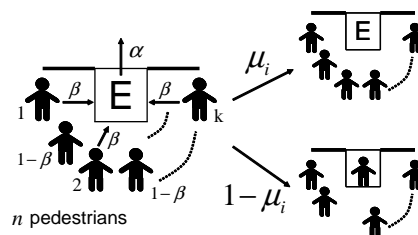


図1: 拡張モデルでの衝突

は、同時に衝突する人数が多ければ多いほど衝突で受ける衝撃は大きいと考えられる。そこで、*friction parameter* に対して、衝突人数によって全員がその場

に留まるか確率の値が変化する以下のような *friction function* μ_1, μ_2 を考える .

$$\mu_1(\zeta_1, k) = 1 - \exp[-\zeta_1(k-1)] \quad (1)$$

$$\mu_2(\zeta_2, k) = 1 - (1 - \zeta_2)^k - k\zeta_2(1 - \zeta_2)^{k-1} \quad (2)$$

$\zeta_1 \in [0, \infty)$ と $\zeta_2 \in [0, 1]$ は、衝突人数以外の衝撃の強さに関する要因を表す . また μ_1, μ_2 は共に、 $\mu_i(\zeta_i, 1) = 0, \mu_i(\zeta_i, \infty) = 1$ ($i = 1, 2$) を満たす . 一つ目の式は出口セルに移動する人が一人の場合に衝突が起こらないということを表し、二つ目の式は無限に多くの人が同時に移動しようとした場合に確実に衝突して誰も出口セルに衝突するできないことを表す . μ_1 は FF model に多く使用されている指数関数を用いた *friction function* の最も簡単な形である . μ_2 は人と人との相互作用を考えた *friction function* である . ζ_2 を人が出口で衝突したとき、そのまま譲らずに出口セルに入ろうとする確率と考えると、(2) の第二項は k 人全員が譲り合おうとする確率、第三項は $k-1$ 人が譲ろうとし、一人が強引に進もうとする確率である . μ_2 は、これらを 1 から引いたもの、つまり二人以上が出口セルに強引に入ろうとした結果誰も出口セルに移動できない確率を表す .

4 方向転換とジッパー効果

四人以上の衝突や衝突人数の違いによる衝撃の大きさを考慮すること以外にも、出口付近の群集運動では考えなければならない要素がある . 一つは、出口セルでの方向転換である . 図 2 (a) で、出口セルに入射角 $\theta = \pi/6$ で入って来た人 A は歩行速度の減少は少ないが、入射角 $\theta = \pi/2$ で入って来た人 B は急に進む方向を 90 度も変えなくてはならないので、大きく歩行速度が低下すると考えられる . そこで α を出口に対する入射角 θ の関数 $\alpha(\theta) = \beta \cos(b\theta)$ ($0 \leq b\theta \leq \pi/2$), $0(b\theta \geq \pi/2)$ にすることによってこの効果を導入する . $b \in [0, \infty)$ は、方向転換による速度の減少の度合いを表すパラメータである . $b = 0$ の場合は方向転換により全く歩行速度が減少せず、 $b \rightarrow \infty$ の場合はどんなささいな方向転換でも止まってしまう . 今回は $b = 1/3$ とした .

また人は互いを認知し、無用な衝突を避けることができる . 特にそれは平行二列での退出で顕著に見られ、退出の過程で右の列と左の列が自然に交互になっていく . この現象をジッパー効果と言い、本研究では平行二列の退出の場合に、この効果を合流の機会が増加するという方法で取り入れる . 図 2 (b) で

二人の人は出口セル E で合流する前にセル B1 で合流しようとする . このとき確率 $1 - \mu_i$ で合流が成功すれば二人は一列になって出口へ向かう . もし確率 μ_i で失敗した場合は二人はそれぞれセル A1 と C1 に進み、再びセル B2 での合流を目指す . 図 2 (b) のケースでは、B1, B2, E と三度の合流機会があるので、合流機会 $z = 3$ である . 通常は E のみでの合流なので、 $z = 1$ である .

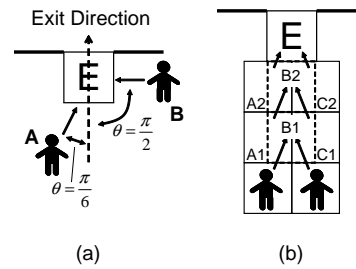


図 2: (a) 出口に対する入射角, (b) 平行二列退出での交互合流のモデル化

5 理論解析と実験データ

この節では、拡張モデルでクラスター近似を行って計算した流動係数と、実験データを比較する . 実験は図 3 に示した九種類のものを行った . 実験 (A) ~ (G) は整列退出の実験であり、列を崩さないように指示をした . これに対して実験 (H), (I) は通常の退出である . 人の傍に書かれている数字は理論解析のときに用いた入射角である . 合流機会は実験 (B) のみ $z = 3$ とし、他は全て $z = 1$ とした . 最初の退出者から最後の退出者までの退出時間の平均から実験の流動係数を算出し、実験 (A) から移動確率 β を計算し、実験 (H), (I) の平均値 H&I から *friction coefficient* ζ_i を計算して流動係数を求めると、図 4 のようになる . まず実験の棒グラフと理論解析の点プロットを比較すると、*friction parameter* を用いた計算結果は実験データとあまりよく合っていないが、*friction function* を用いた計算結果は実験データをよく合っている . これは実験データから読み取ることができる第一の特徴である、列の数すなわち同時に出口セルに移動する人数が増加すると、衝突による衝撃が大きくなり流動係数が小さくなるという現象を *friction function* は再現することができるということである . *Friction parameter* は定数であるため、この現象を正確に表すことができない . 実験

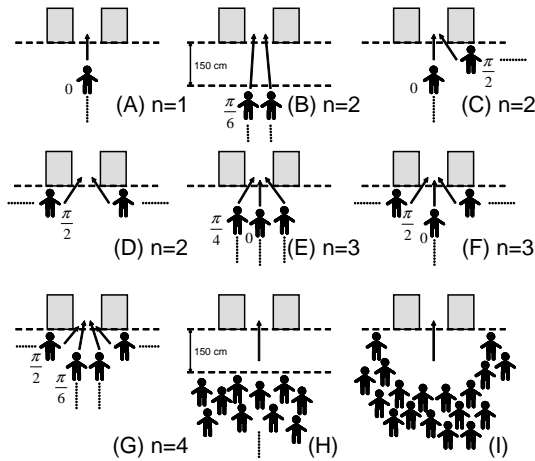


図 3: 実験の概略図, 被験者は 18 人, 出口幅は 50 cm である .

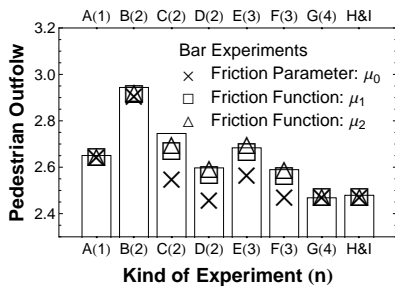


図 4: 理論解析と実験データの比較

(B) で流動係数が最大となっているのも注目すべき点である . これはジッパー効果により, 人が出口より手前で自然に交互に合流していることによると考えられる . また同じ二列の退出である実験 (B), (C), (D) の流動係数の違いを表すことができるのは方向転換を効果を考慮した結果である .

6 障害物の効果

我々は図 5 に描かれたような出口で前に障害物をおいた退出実験を行い, 障害物がないケース (a) では $2.75[\text{persons}/(\text{m} \cdot \text{sec})]$, 障害物があるケース (b) では $2.93[\text{persons}/(\text{m} \cdot \text{sec})]$ と障害物がある方が流動係数が大きくなることを発見した . (時間は 0.01 秒まで計測できるので, 有効数字三桁の精度が期待できる .) この節では, この障害物の効果について考察する . 5 節の実験 (G) と実験 (H) と (I) の平均値に近いことから, 障害物がない場合, 出口手前にはおよそ四人の人が同時に移動できると考えられ

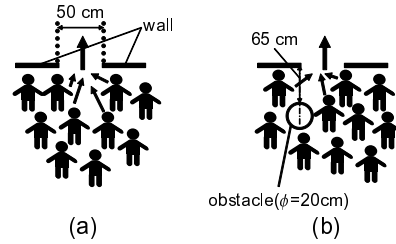


図 5: (a) 通常の退出実験, (b) 障害物が設置された退出実験 . 被験者は 50 人である .

る . つまり $n = 4$ と考えられる (図 5 (a)) . そこで, この状態で障害物を置くとな人の通り道が一箇所塞がれ $n = 3$ になるとモデル化 (図 5 (b)) し流動係数を計算すると, friction parameter μ_0 を用いた場合, $2.76[\text{persons}/(\text{m} \cdot \text{sec})]$, friction function μ_1 , μ_2 を用いた場合はそれぞれ $2.89[\text{persons}/(\text{m} \cdot \text{sec})]$, $2.93[\text{persons}/(\text{m} \cdot \text{sec})]$ となり, μ_0 を用いた結果は実験データと大きく異なるが, μ_1 , μ_2 を用いた場合は実験データに近い値を得ることができる . この計算結果から, 出口手前に設置された障害物は, 出口手前で同時に衝突する人数を減らすことにより流動係数を増加させていると考えることができる .

7 まとめ

本研究では, 人が衝突したとき, 進めずにその場に留まってしまふ確率を表す定数である friction parameter を, 衝突する人数によって値が変化する friction function に拡張した . Friction function を用いたモデルは実験データとよく合い, 現実的な流動係数の値を計算することができる . また障害物を出口前に設置すると流動係数が増加する現象についても, friction function を用いて説明することに成功した .

謝辞

本研究は (独) 科学技術振興機構 (独) 日本学術振興会の援助を受けた . また 6 節の実験については, NHK サイエンス Zero の協力を受けた .

参考文献

- [1] 柳澤大地, 西成活裕, 日本応用数理学会論文誌, 17, No. 3, 277 (2007).
- [2] D. Yanagisawa and K. Nishinari, Phys. Rev. E, 76, 061117 (2007).