

自己駆動粒子モデルを用いた混雑した公共交通機関からの乗客降車シミュレーション

Simulation of exit of passengers from a crowded public transport using self-driven particle models

*深谷肇一・**石原純司・***大出亜矢子

*統計数理研究所統計思考院

**静岡大学大学院工学研究科数理システム工学専攻

***京都大学大学院アジア・アフリカ地域研究研究科

*Keiichi FUKAYA, **Junji ISHIHARA and ***Ayako OIDE

*School of Statistical Thinking, Institute of Statistical Mathematics,
10-3 Midoricho, Tachikawa, Tokyo 190-8562 JAPAN

**Department of Mathematical and Systems Engineering, Graduate School of Engineering, Shizuoka University,
Johoku 3-5-1, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561 JAPAN

***Graduate School of Asian and African Area Studies, Kyoto University,
46 Shimoadachi-cho, Yoshida Sakyo-ku, Kyoto 606-8501 JAPAN
kfukaya@ism.ac.jp

Crowding on public transport is one of the urban problems in contemporary society. In a crowded vehicle passengers touch or bump into each other, and an increase in exit time of passengers that associates with an increase in passenger density would decrease the efficiency of the transport system. In this study, by using self-driven many-particle models, we simulated exit of passengers from a crowded vehicle and investigated how the behavior of passengers may influence the average exit time and the “physical stress” which a passenger is subjected to in a crowded vehicle.

はじめに

公共交通機関の混雑は現代社会における都市問題の一つである。電車やバス、モノレールといった公共交通機関は多くの人々を効率よく輸送できるが、特に人口密集地では通勤・通学の時間帯に利用が集中し車内が非常に混雑する。このような状況では乗客同士が押し合うことにより圧迫感が生じ、空いた空間が不足する。そのために乗客は互いにぶつかり合いながら乗り降りしなくてはならないことも多い。乗客に働くこれらの「ストレス」はおそらく多くの乗客にとって不快である。また、乗客密度の増加にともない乗客のスムーズな移動が制限されると乗り降りにかかる時間は増大し、結果として交通機関の輸送効率は低下してしまうだろう。このような混雑に伴う乗客のストレスや輸送効率の変化に対して、乗客の振る舞いはどのように影響するのだろうか。本研究では、歩行者の行動を表現する数理モデルを用いて、混雑した公共交通機関からの降車にかかる時間や乗客に作用する力の大きさを測定し、これらの変数に対して乗客の振る舞いが及ぼす影響を考察する。

自己駆動粒子モデル

本研究では乗客を自発的な駆動力によって運動する粒子(自己駆動粒子)と考え、交通機関の車内における乗客の二次元の移動の様子を自己駆動多粒子系(Self-driven many-particle system: [1])として表現する。自己駆動粒子モデルは歩行者や車両の交通などを表すのに広く用いられるモデルである[1, 5]。以下ではニュートンの運動方程式を拡張したモデル[1, 2]を考える。

乗客は「物理的な力」と「社会心理学的な力」という2種類の力の影響を受けて運動するものと仮定する。前者は乗客どうしが接触した際に生じる摩擦力や反発力であり、後者は乗客がある対象に近づきたくない心理によって生じる反発力で、車両内の他の乗客と車両の壁からそれぞれ受けるものとする。運動の第三法則(作用・反作用の法則)は物理的な力においては成り立つが、社会心理学的な力では成り立たないものとする。

乗客 i は質量 m_i を持ち、目標とする方向 $\mathbf{e}_i^0$ へ向かって彼にとって望ましい歩行の速さ v_i^0 で移動しようとするものとする。乗客が歩行速度 $\mathbf{v}_i$ を彼にとっての望ましい速度 $v_i^0 \mathbf{e}_i^0$ に合わせるまでの特性時間を τ_i

とする。乗客 i が車両内の他の乗客 j から受ける力を $\mathbf{f}_{ij}$ 、車両の壁 W から受ける力を $\mathbf{f}_{iW}$ とすると、この乗客の運動は以下の方程式によって定められる。

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

乗客の位置を $\mathbf{x}_i$ とすると、位置の変化は $d\mathbf{x}_i/dt = \mathbf{v}_i(t)$ によって与えられる。

乗客 i が車両内の他の乗客 j から受ける力は社会心理的な力 $\mathbf{f}_{ij}^S$ と物理的な力 $\mathbf{f}_{ij}^P$ からなるとする。

$$\mathbf{f}_{ij}(t) = \mathbf{f}_{ij}^S(t) + \mathbf{f}_{ij}^P(t) \quad (2)$$

社会心理学的な力によって乗客 i は他の乗客 j から距離に依存した反発力を受けるものとする。乗客の重心間距離を $d_{ij} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|$ として、乗客 j が i に及ぼす社会心理学的な力を

$$\mathbf{f}_{ij}^S(t) = A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij}(t))/B_i] \mathbf{n}_{ij}(t) S_i(\phi_{ij}(t)) \quad (3)$$

と表す。ここで r_{ij} は乗客 i の半径 r_i と乗客 j の半径 r_j の和 ($r_{ij} = r_i + r_j$)、 $\mathbf{n}_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2) = (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)/d_{ij}$ は乗客 j から i へ向かう正規化されたベクトル、 A_i と B_i はそれぞれ社会心理学的な力の大きさと力が作用する範囲を定めるパラメータである。 $S_i(\phi_{ij}(t))$ は社会心理学的な力の異方性を特徴付ける関数であり、 ϕ_{ij} を乗客 i の速度ベクトルに対して乗客 i から j へ向かうベクトルが成す角度 (すなわち $\cos \phi_{ij} = -\mathbf{n}_{ij} \cdot (\mathbf{v}_i/\|\mathbf{v}_i\|)$) として

$$S_i(\phi_{ij}(t)) = \left(\lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos \phi_{ij}(t)}{2} \right) \quad (4)$$

と表す。 λ_i は社会心理学的な力の異方性の尺度を定めるパラメータである。一方、物理的な力は乗客同士が接触する場合 (つまり $d_{ij} < r_{ij}$) に限り社会心理学的な力に加えて乗客に作用するものとする。 $g(x)$ を x が負の場合は 0、 x が正の場合は x の値をとる関数として、乗客 i が j から受ける物理的な力を

$$\mathbf{f}_{ij}^P(t) = kg(r_{ij} - d_{ij}(t))\mathbf{n}_{ij}(t) + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}(t))\Delta v_{ji}^{tan}(t)\mathbf{t}_{ij}(t) \quad (5)$$

と表す。ここで $\mathbf{t}_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ は $\mathbf{n}_{ij}$ に直交する正規化されたベクトル、 $\Delta v_{ji}^{tan} = (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{t}$ は乗客 i と j の接線方向の速度差、 k と κ はそれぞれ $\mathbf{n}_{ij}$ 方向と $\mathbf{t}_{ij}$ 方向の物理的な力の大きさを定めるパラメータである。

乗客が壁から受ける力も同様に考え、乗客 i が車両の壁 W から受ける力が社会心理的な力 $\mathbf{f}_{iW}^S$ と物理的な力 $\mathbf{f}_{iW}^P$ からなるとする。

$$\mathbf{f}_{iW}(t) = \mathbf{f}_{iW}^S(t) + \mathbf{f}_{iW}^P(t) \quad (6)$$

d_{iW} を乗客 i の重心と壁 W の間の距離、 $\mathbf{n}_{iW}$ を壁 W から垂直に乗客 i へ向かう正規化されたベクトル、 ϕ_{iW} を乗客 i の速度ベクトルに対して乗客 i から壁 W への垂線が成す角度 (すなわち $\cos \phi_{iW} = -\mathbf{n}_{iW} \cdot (\mathbf{v}_i/\|\mathbf{v}_i\|)$) として、社会心理学的な力は以下のように表される。

$$\mathbf{f}_{iW}^S(t) = A_i \exp[(r_i - d_{iW}(t))/B_i] \mathbf{n}_{iW}(t) S_i(\phi_{iW}(t)) \quad (7)$$

ここで $S_i(\phi_{iW}(t))$ は式 (4) の ϕ_{ij} を ϕ_{iW} で置き換えたものである。 $\mathbf{n}_{iW}$ に直交する正規化されたベクトルを $\mathbf{t}_{iW} = (-n_{iW}^2, n_{iW}^1)$ として、接触時に乗客 i が壁 W から受ける物理的な力を以下のように表す。

$$\mathbf{f}_{iW}^P(t) = kg(r_i - d_{iW}(t))\mathbf{n}_{iW}(t) + \kappa g(r_i - d_{iW}(t))(\mathbf{v}_i(t) \cdot \mathbf{t}_{iW}(t))\mathbf{t}_{iW}(t) \quad (8)$$

なお、ここでは乗客が壁から受ける力の大きさを決めるパラメータが他の乗客から受ける力を決めるそれと同じであるとした。

方法

本研究では前節で説明したモデルを用いて、公共交通機関の車内から全ての乗客がいちどに降車する状況をシミュレーションした。以下で定義する降車までに乗客が感じる物理ストレスの大きさの指標と乗客の平均降車時間を興味のある変数とし、これらと個人の運動を決定するモデルパラメータの関連を調べた。

交通機関の乗降口が開いた時間を t_0 とし、降車までに乗客が感じる物理ストレスの平均的な大きさを表す指標 F を以下のように定義する。

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{t_i - t_0} \int_{t_0}^{t_i} \sum_{j \neq i} \|\mathbf{f}_{ij}^P(t)\| + \sum_W \|\mathbf{f}_{iW}^P(t)\| dt \right) \quad (9)$$

ここで t_i は乗客 i が降車した時間、 N は乗客数である。離散時間のシミュレーションにおいては、この量は以下によって計算される。

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{t_i - t_0} \sum_{t=T(t_0)}^{T(t_i)} \left(\sum_{j \neq i} \|\mathbf{f}_{ij}^P(t)\| + \sum_W \|\mathbf{f}_{iW}^P(t)\| \right) \Delta t \right) \quad (10)$$

$T(t_0)$ と $T(t_i)$ はそれぞれ乗降口が開いた時間と乗客 i が降車した時間に相当する時間のインデックス、 Δt は1時間ステップである。

乗客の動作を決定するモデルパラメータのうち、社会心理学的な力の大きさと範囲を定めるパラメータ (A_i, B_i) および乗客の理想歩行速度 v_i^0 を変化させる以下の5つの実験を行なった。

実験0 社会心理学的な相互作用をしない乗客の降車

実験1 社会心理学的な相互作用をする乗客の降車

実験2 社会心理学的な相互作用をし、実験1よりも歩くのが早い乗客の降車

実験3 社会心理学的な相互作用をし、実験1よりも歩くのが遅い乗客の降車

実験4 社会心理学的な相互作用をし、歩く速度が個人によって異なる乗客の降車

それぞれの実験で設定したモデルパラメータは表1の通りである。パラメータの値は[2]を参考とした。各実験について初期の乗客の位置がランダムに異なる36回の繰返しを行なった。

降車シミュレーションは幅2mの乗降口を一方の長辺の中心に持つ幅5m、奥行き3mの長方形の車内を想定して行なった。各実験につき乗客の数を10人、20人、30人、40人、50人と設定した。それぞれの場合の乗客密度 (m^{-2}) は0.67, 1.33, 2.00, 2.67, 3.33である。車内を50cm四方の格子に区切り、1つの格子に2人以上の乗客が配置されないよう各乗客を格子に割り振り、割り振られた格子内のランダムな位置に乗客を配置することで乗客の初期の位置を決定した。乗客が配置されてから10秒間の「緩和時間」の後に乗降口が開き、乗客の降車が始まるようにした。乗降口の中心の座標を $\mathbf{o}$ として、乗降口が開いた後は各乗客が $\mathbf{o}$ に向かって歩行するものとした (つまり $\mathbf{e}_i^0 = \mathbf{o} - \mathbf{x}_i$ である)。ただし降車が完了した乗客は降車時の速度を維持し続けるものとしてシミュレーションを行い、車内に残っている他の乗客の運動に影響を与えないよう配慮した。

結果

シミュレーションの結果を図1にまとめた。全体的に、平均降車時間 (図1A) は乗客密度に対してほぼ線形に上昇し、物理ストレスの指標 (図1B) は乗客密度に対してほぼ指数的に上昇する傾向が見られた。

実験0と実験1の比較から、乗客の運動が社会心理学的な力の影響を受けない場合 (実験0) は、受ける場合 (実験1) と比べて降車時間が短くなることがわかった (図1A)。乗客密度の上昇に伴うストレスの増加率は実験0の方が実験1よりも大きく (図1B)、社会心理学的な力が働かない場合は乗客が「周囲に注意しない」ことによる乗客同士の強い押し合い状態が生じていたと考えられる。

表 1: シミュレーションで設定したパラメータ. 実験 4 では v_i^0 を平均 1.0, 標準偏差 0.2 の正規分布 $N(1.0, 0.2)$ に従う確率変数とした. その他のパラメータは全ての実験において以下のように設定した: $m_i = 80$ [kg], $\tau_i = 0.5$ [s], $k = 1200$ [kgs⁻²], $\kappa = 2400$ [kgm⁻¹s⁻¹], $r_i = 0.3$ [m], $\lambda_i = 0$.

パラメータ	実験				
	0	1	2	3	4
A_i [N]	0	20	20	20	20
B_i [m]	0	0.08	0.08	0.08	0.08
v_i^0 [ms ⁻¹]	1.0	1.0	1.4	0.6	$N(1.0, 0.2)$

実験 1 と実験 2 および 3 の比較から, 乗客の歩行速度の違いによって平均降車時間が異なることがわかった (図 1A). ある乗客密度における実験間の平均降車時間の比は, 乗客の歩行速度の比の逆数にほぼ等しかった. 乗客のストレスは早く歩くほど大きくなったが, 密度にともなうストレスの増加率は速度に依存しなかった (図 1B). 早く歩行する乗客 (実験 2) は, より遅い速度で歩行するが社会心理学的な力の影響を受けない乗客 (実験 0) と比べて低密度における乗客ストレスが大きい傾向が見られた (図 1B).

最後に, 実験 1 と実験 4 の比較から, 乗客の間で移動速度にばらつきがあった場合でも降車時間や乗客のストレスの大きさにほとんど影響しないことがわかった (図 1).

考察

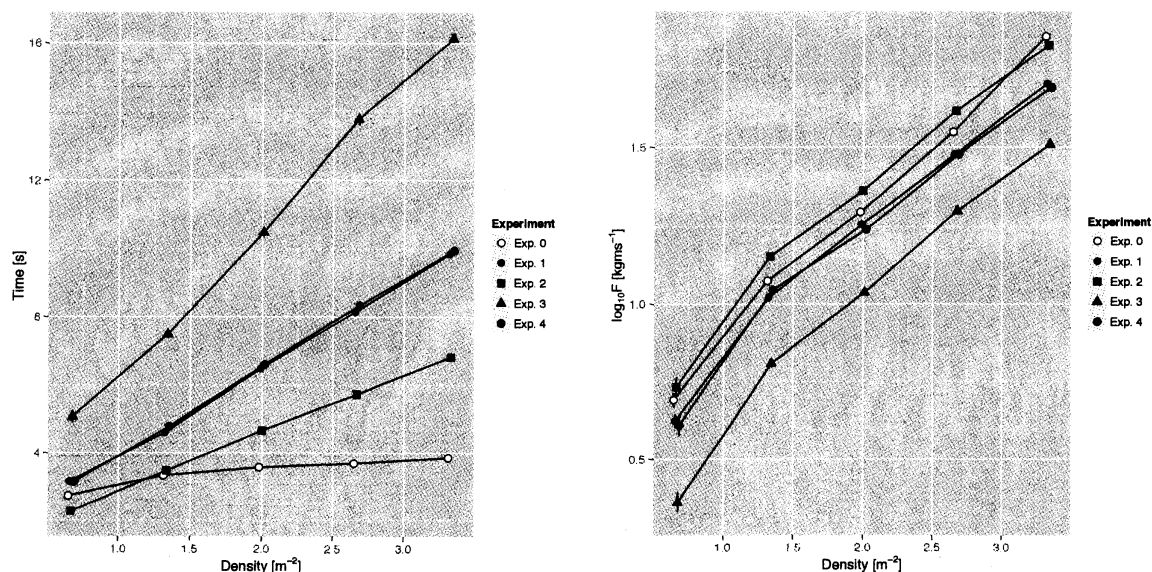
公共交通機関を利用する者の立場からすれば, 車内で他者や壁とぶつかることによる「物理的なストレス」はなるべく少ないほうが良いだろう. 本研究では乗客が降車までに受ける物理的なストレスの指標を定義し, 自己駆動多粒子系のシミュレーションによってこの量の変動を決定する要因を調べた. シミュレーションの結果からは, 乗客がストレスなく公共交通機関を利用するためのいくつかの示唆が得られるように思う. 第一に, 物理ストレスの指標は乗客密度に対して指数的に増加する傾向が見られた. このことは車内が混雑するほど乗客の物理ストレスの増加率が大きくなることを表しており, 混雑した車内ではわずかな密度の低下でも乗客の物理ストレスを大きく改善するものと思われる. したがって, 混雑した状況では特に, 少しでも密度の低い車両を選択することがストレスを改善するのに有効だろう. 戦前の物理学者である寺田寅彦は, 電車が混雑する時間帯でも周期的に乗客密度の低い車両が生じる現象を観察し, その機構を自身の随筆で考察している [6].

また, 社会心理学的な力の有無と乗客の歩行速度も物理ストレスの指標に影響する要因であった. 実際には乗客が周囲の対象に全く注意を払わずに行動することは考え難いが, 実験 0 と実験 2 の比較において周囲を気にするが早く歩く乗客 (実験 2) の方が周囲を気にしないがゆっくり歩く乗客 (実験 0) よりも平均的なストレスが大きい傾向が見られたことは興味深いように思う. 混雑した車内においては, 乗客全体がゆっくり落ち着いて歩くことを心がければ全体として降車時のストレスが軽減されるかもしれない.

平均降車時間と物理ストレスの指標のどちらも, 乗客の歩行速度にばらつきがある場合とない場合で違いは見られなかった. 結果を示さなかったが, 社会心理学的な力を決めるパラメータ (A_i, B_i) の個人差を考慮した場合も, これらの変数には影響しないようである. 自己駆動多粒子系では自己組織化による様々な集団現象 (例えば同じ方向に歩く歩行者の「レーン」の形成など [2, 5]) が生じることが知られているが, このような創発現象は粒子の異質性の影響を強く受ける場合がある [3, 4].

謝辞

本稿は, 2013 年京都大学数理解析研究所共同研究 数学と生命現象の連関性の探求～新しいモデリングの数理～におけるモデル・コンテスト (モデコン) の課題として著者らが選んだテーマについてまとめたもの



A. 平均降車時間

B. 乗客の平均物理ストレスの指標 (F)

図 1: シミュレーションの結果. 各実験の 36 回の繰返しの平均値を記号で, 1 標準偏差をエラーバーでそれぞれ示している. エラーバーが見えないものは平均値の記号よりも標準偏差のエラーバーが短いことを意味している. 各実験で設定した密度は同じであるが, 記号が重複しないよう実験ごとにグラフを横方向に少しずつして表示している. F の定義, 各実験の設定についてはそれぞれ式 9 と表 1 を参照せよ.

である. 本学術集会を企画・運営してくださった瀬野裕美博士, 齋藤保久博士, 佐藤一憲博士に感謝の意を表したい. 企画・運営, およびモデコン審査員の先生方からは, 本研究のもととなったモデルに対して建設的なコメントをいただいた. 別所和博博士からは結果の解釈について有用な助言を与えていただいた. 心より御礼申し上げたい.

引用文献

- [1] Dirk Helbing. Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of modern physics*, Vol. 73, No. 4, p. 1067, 2001.
- [2] Dirk Helbing, Illes Farkas, and Tamas Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, Vol. 407, No. 6803, pp. 487–490, 2000.
- [3] Dirk Helbing and Bernardo A Huberman. Coherent moving states in highway traffic. *Nature*, Vol. 396, No. 6713, pp. 738–740, 1998.
- [4] Mehdi Moussaïd, Elsa G Guillot, Mathieu Moreau, Jérôme Fehrenbach, Olivier Chabiron, Samuel Lemerrier, Julien Pettré, Cecile Appert-Rolland, Pierre Degond, and Guy Theraulaz. Traffic instabilities in self-organized pedestrian crowds. *PLoS computational biology*, Vol. 8, No. 3, p. e1002442, 2012.
- [5] 西成活裕. 渋滞学. 新潮社, 2006.
- [6] 寺田寅彦. 電車の混雑について, 寺田寅彦随筆集, 第 2 巻, pp. 56–67. 岩波書店, 1964.