

1 歩行者の流れや行動は、広場、通路、建物の設計の観点から関心を持たれている。人間の流れは、従来から多くの研究がされてきた車の走行と異なりは、行動する空間の自由度が高く、人間の行動自身も、外的条件、心理的要因が行動に及ぼす影響が多様であり、それらの条件をどのようにモデル化し、シミュレートするか興味ある。従来の扱いは、待ち行列的扱い[1]やガスや流体との類似点に注目して、Hendersonら[2]は、流体力学的取扱いを試みた。Helbingら[3, 4]は、心理的作用を力学的な力にモデル化したミクロなモデルを提案し、若干の成果を得た。ここでは、車の交通流のミクロモデルに使われたセルオートマトン(CA)モデル[5]を人間の歩行流のシミュレーションに適用してみて、歩行者の行動の説明を試みた。

CAモデルでは、道路と人は、簡素化され、それぞれ格子点とそれを占有する点として、デジタル化されている。また相互作用は排除体積効果だけである。車の走行と比較して、人間の歩行は、速度がほぼ一定であり、加速、減速はほぼ離散的である。しかし行動変化の判断は、より長距離的であるところが異なる点である。ここでは、最も簡単なモデルから始める。多数の人が一方方向に歩いて行く場合、またそれに加えて、その方向と逆方向に、1人又は多数の歩行者が歩いていく場合に、双方向の歩行者の互いに影響しあう歩行状況を扱った。

## 2. Sidestepping 歩行モデル

(a) 1人の歩行者が反対方向に歩行してくる多数の歩行者と遭遇する場合。

歩行者が歩く道路として正方格子状道路を考え、人はその格子点に居り、単位時間ごとに1格子点前に進むとする。同じ道筋(レーン)で対行者と遭遇したとき、すれちがうための退避行動として、横のレーンの真横の位置へ避けるモデルを扱う。レーンの移動は対行者と遭遇したときのみとする。それぞれの歩行者は、決定論的wolframのrule-184モデル(1単位時間に1格子前進)に従って進むとする。道路としては、道幅が $L_w$ ( $L_w$ レーン)で、長さ $L$ ( $L$ 格子点)からなるリング状の道路で、路肩に壁がある場合と道路幅方向にも周期境界条件を取り入れた場合を考えた。

シミュレーションでは多数の歩行者の人数が増加するにつれて、逆に進む1人の歩行者の歩行状況とその歩行者が多数の歩行者の歩行に及ぼす影響を調べた。

初期状態として道路の各レーンに同数の人をランダムに配置した。時間の奇数stepに多数の通行人( $P_r = N_r / L_w$ )が右へ前進し、偶数stepに1人の歩行者が左へ前進する過程を繰り返す。前進しようとするときに前に逆行者がいるときに、確率 $P_t$ (ここでは全て $P_t = 1$ とする)でレーン変更する。前進者とレーン変更者が、同時にいるときは、前進優先とする。

通行人の人数密度( $P_r$ )の関数として、逆行歩行者の速度 $V$ (=前進格子点数/time)を求めた。 $P_r$ が小さいときは、推測通り、逆行歩行者は通行人に妨げられないで、 $V = 1$ であ

る（自由歩行状態）。しかし  $P_r$  がある濃度を越えると全く前進できなくなる。ただひたすらレーン変更を繰り返す（Sideling state:  $V = 0$ ）。このとき、逆行歩行者は通行人の流れには、道路に一種のボトルネックを発生させる役割を果たし、shock waveを伴った渋滞を発生させる。このような流れの転移は、道路幅  $L_w$  が広くても起こる。（図1）この転移密度は  $P_c = (L_w - 1) / 2L_w \dots (1)$  で表される。

(b) 双方向から多数の歩行者 ( $P_r, P_l$ ) が歩行する場合

歩行者の人数が同じ場合 ( $P_r = P_l$ ) の時、自由走行状態と完全渋滞状態間の流れの転移が起こる。自由走行状態では、歩行者は同じ方向に進む歩行者の後ろに連なって進む行列歩行となり、完全渋滞状態では、互いに押し合い、睨み合い状態になっている。転移密度は道路幅に関係なく同じである。全歩行者の転移密度は ( $P = P_r + P_l = 2P_r$ ) は、(1) 式の  $P_c$  より大きい。（図2）

3. Diagonal Stepping 歩行モデル

歩行者が道路の同一レーン上で対行者と遭遇したとき、すれ違うための退避行動として、横のレーンの斜め前の位置へ避けながら前進し、横には移動しないモデルを扱った。レーン変更より前進を優先する。周期境界条件

(a) 1人の歩行者が反対方向に歩行してくる多数の歩行者と遭遇する場合。レーンの移動は対行者と遭遇した歩行者のみとする。

ここでも、式(1)の転移濃度 ( $P_{c1}$ ) まで自由歩行状態にある。  $P_{c1}$  を越えて密度が高くなると、渋滞状態が起こり前進しにくくなる。速度は時間的にゆらいでいる。さらに転移濃度  $P_{c2}$  を越えると、決まった速度をもった決まった歩行パターンに落ち着く。斜め歩行を許すと、濃度  $P$  がほとんど1まで、歩行者が前進できるパターンが存在する。図3に  $V_l$  と  $V_r, J_r$  の  $P_r$  による変化を示す。

$$P_{c1} = (L_w - 1) / 2L_w \dots (2)$$

$$P_{c2} = (2L_w - 1) / (4L_w - 1) \dots (3)$$

$$V_l = (L_w - 1) / L_w \quad (P_r > P_{c2}) \dots (4)$$

$$V_r = 3(P_r - 1) / 4P_r \quad (P_r > P_{c2}) \dots (5)$$

$$J_r = 3(P_r - 1) / 4 \quad (P_r > P_{c2}) \dots (6)$$

(b) 1人の歩行者が反対方向に歩行してくる多数の歩行者と遭遇する場合で、レーンの移動は全ての歩行者（同方向進行者も含む）に可能とする。

このモデルでは、  $L_n = 3$  以下の道路では、(a)モデルと同じであるが、  $L_n = 4$  以上の道路では、  $P_{c2}$  以上の密度で、上の(a)モデル配列の他に、1人の歩行者には進行しにくく、多数の歩行者に有利な歩行配列が現れる。しかしこの配列もより密度が高くなると ( $P_{c3}$ )、この配列は形成できなくなり、最もパッキングの高いパターンに収束される。  $L_n$  がさらに大きくなると、自由度が増え多種の配列パターンが見られる。（図4）

#### 4. 目的地が斜めの場所へ歩行するモデル

目的地が真ん前だけでなく、斜めにある時を扱う。歩行者は1格子分の前進と斜め歩行、横歩行をするモデル。

(1)目的地 (Destination) のレーンと現在地 (Present) のレーンが一致している場合 ( $L_p = L_d$ ) のルール

- (a) 直前の格子点が空いていれば、前進
- (b) 空いていなければ、空いている斜め前の格子点へ進む
- (c) 両斜め前が塞がっておれば、空いている左右どちらかの真横へシフトする。
- (d) 両横が塞がっていれば、その場に停止。

(2)目的地 (D) と現在地 (P) がずれている場合 ( $L_p \neq L_d$ ) のルール

- (a) 目的地方向の斜め前が空いていれば、そこへ斜行
- (b) そこが塞がっておれば、直前格子点へ前進
- (c) 直前も塞がっておれば、目的地側の横の格子点へシフト
- (d) そこも塞がっておれば、停止

1格子点には、1人しか占有できないので、同ランクのルールはルール(1)をルール(2)より優先する。

(A) 道路左端から多数の歩行者が入ってくる。歩行者の目的の出口は、それぞれランダムに決める。歩行者が入ってこられるのは、端の格子点が空いている時である。路肩は周期的である。このような条件でシミュレーションをおこなった。

最初のうちは、入場した人はそれぞれの目的地へ向かって、ほぼ自由に歩行する。時間が経つにつれて、入口近くに互いに進路妨害の塊ができると、それが次第に成長する。図5は長時間後の平衡状態である。

(B) 上の歩行ルールは余りにも早めに路線変更を行い過ぎる傾向を示し、現実的でないので、ルール(2a)を次のように変更する。

(2a)目的地方向の斜め前と直前が空いていれば、割合  $r$  で斜め前へ進み、 $1-r$  で前へ前進する。 $r = (2/\pi) \tan^{-1}(y-y_0)/(x-x_0)$  : 現在地  $(x, y)$ 、目的地  $(x_0, y_0)$ 。

例(A)と同じで、道路左端から多数の歩行者が入ってくる。歩行者の目的の出口は、中央の1つとする。歩行者が入ってこられるのは、端の格子点が空いている時である。時間が経つにつれて、群衆の塊が生まれ前進できない状態が発生する。入り口ごとの目的地までの所要時間、入場規制の効果を調べている。(図6)

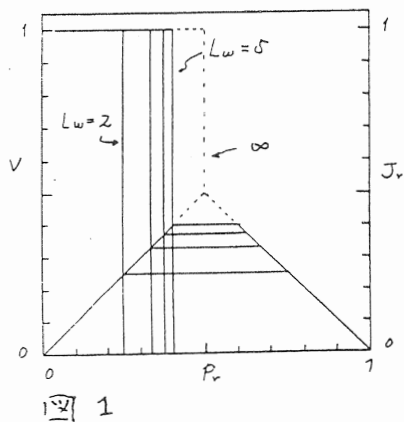


图 1

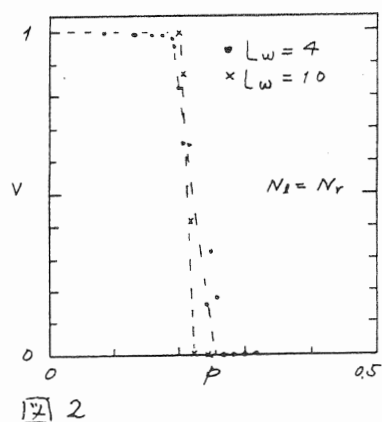


图 2

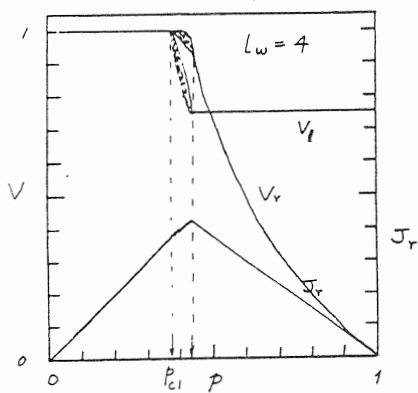


图 3

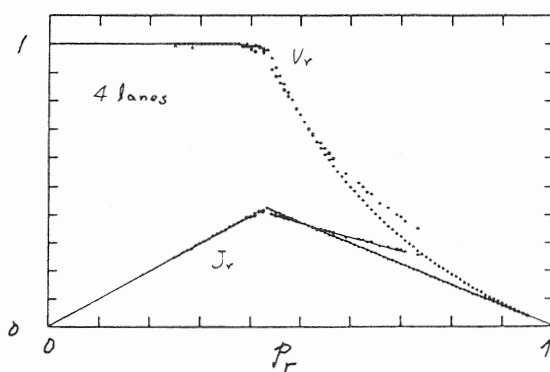


图 4

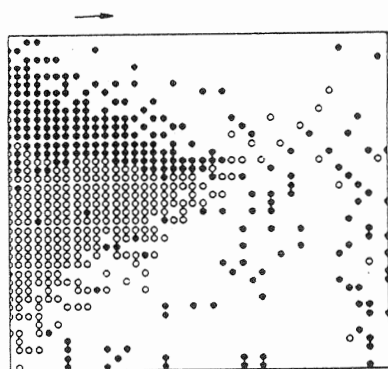


图 5

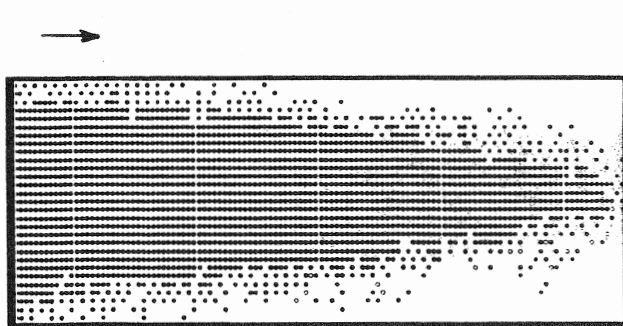


图 6

- [1] S. Matsushita: J. Archit. Plann. Environ. Engng. 432(1992)79
- [2] L. F. Henderson: Nature 229(1971)381; Transp. Res. 8(1974)509
- [3] D. Helbing: Complex Syst. 6(1992)391
- [4] D. Helbing: Behav. Sci. 36(1991)298; Phy. Rev. E51(1995)4282
- [5] K. Nagel and M. Schreckenberg: J. Phys. I 2(1992)2221