

# 歩行者流の格子気体シミュレーション

静岡大学工学部 田島 祐輔, 長谷 隆

## 1. 緒言

最近、通勤ラッシュや交通渋滞問題について多くの関心もたれ、その改善が望まれている。交通流は連続体モデル(流体力学の方程式によって記述されるモデル)と粒子モデル(車両追従モデル)によって研究が進められてきた。しかし歩行者の流れや群集挙動をシミュレートする計算モデルは非常に少なく、その研究も自動車の流れほど進んでいない。

歩行者の流れの中で発生する混雑の原因は経験的に歩行者密度や道路形状に依存していることはわかっているが明確なモデルによるシミュレーション結果はほとんどない。従ってこの歩行者の流れをモデル化し、シミュレートすることができれば混雑の削減に役立つことが期待される。

歩行者流は紛体流と類似しているが、著しく異なる点もある。特に顕著な特性は歩行者が同時に反対方向に移動可能という点である。本研究ではこの特徴が顕著に現れると考えられるチャンネル内の対向流のモデリングとシミュレーションを行う。

## 2. 歩行者流のモデル

**2.1 歩行者のモデル** 歩行者の挙動は個人個人歩行速度が異なるため、これを一一つモデル化するのは困難である。従って歩行者の挙動を単純化したモデルを用いてシミュレーションを行う必要がある。本研究では最も単純な格子気体モデルを变形した多粒子バイアスランダムウォークモデルを提案する。ここでは地下道での右方向へ移動する歩行者と左方向に移動する歩行者問題を考える。各歩行者は少し横方向にランダムに揺れながら希望する方向へ移動し、後ろ方向へは移動しないものとする。また歩行者のすぐ前方あるいは横に他の歩行者がいる場合は空いている方向へ移動するものとする。このような各歩行者の挙動はバイアスしたランダムウォーカーによって模倣できると仮定する。ここではバイアスしたランダムウォーカーとはバックステップのない方向づけられたランダムウォーク粒子を意味するものとする。

地下道は長さ  $L$ 、道幅  $W$  の正方格子で近似し、各歩行者をバイアスしたランダムウォーク粒子とみなして正方格子上を移動させてシミュレーションを行う。歩行者(粒子)はひとつの格子点(サイト)にひとつだけ入ることが可能で、各歩行者(粒子)は次に示す規則に従って移動する。

従来のランダムウォークは前後左右4方向に移動するが、歩行者の流れには方向性があるため後方への移動を排除した前方と左右方向の3方向に移動する。バイアスしたランダムウォークは一回(1タイムステップ)の移動で1マスだけ移動するものとする。

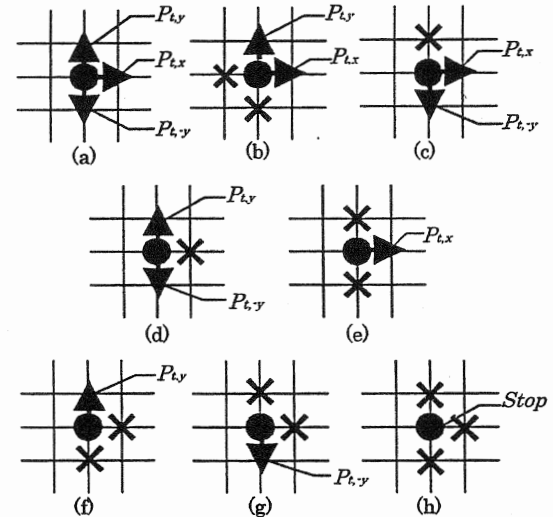


Fig.1 All possible configurations of the right walker (going to right) on the square lattice

歩行者移動の規則は次のように与える。  $x$  方向に進む歩行者の場合、図1のように進む方向の確率を  $P_{i,x}$ ,  $P_{i,y}$ ,  $P_{i,-y}$  とする。また歩行者は基本的に前方へ移動するため前方への移動確率を高くするためにドリフトを与える(ドリフト係数  $D$ )。また左方向に移動する歩行者の場合、図1中の  $x$  を  $-x$  に置き換えることにより移動確率が与えられる。また図中の  $\times$  印は他の歩行者を示しこの部分への移動はできないものとする。全ての歩行者がこの規則に従って移動もしくは停止の行動を行った時点で1タイムステップとする。

2.2 道路形状と境界条件 チャンネル内対向流では図2, 図3に示す形状の道を考える. 縦方向に道幅, 横方向に道の長さを取り, 長さ方向を $x$ とする.

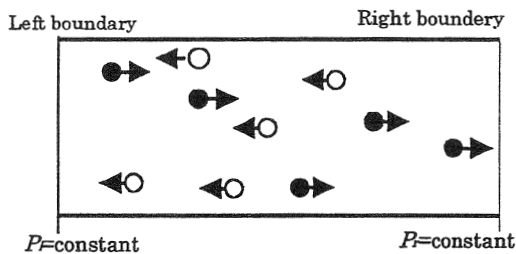


Fig.2 Simulation model without neck

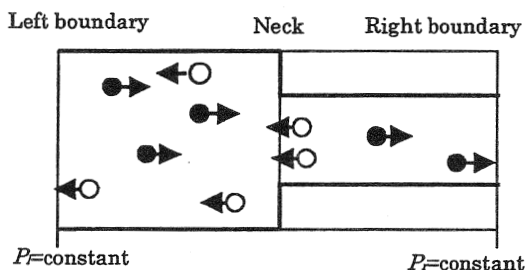


Fig.3 Simulation model with neck

図2, 図3に示すようにチャンネルの左右に出入口を設ける. 右側の出入口における左方向移動歩行者の密度を $P_r$ (一定)とし, 左側の出入口における右方向移動歩行者の密度を $P_l$ (一定)とする. シミュレーション方法としてチャンネルの左右両方の出入口に $t=0$ のときに歩行者を入口密度( $P_r = P_l$ )によって与える. このとき左右の入口にそれぞれ右方向, 左方向に移動する歩行者を入口にランダムに配置する. 次に移動規則に従い歩行者を移動し, 境界から移動した歩行者の数だけ出入口に新しくランダムに歩行者を加える. これを繰り返すことにより上の境界条件を満たす歩行者の流れを作ることができる.

### 3. ネットの無いチャンネル内の対向流

3.1 シミュレーション条件 チャンネルサイズを道幅  $W=80$ , チャンネル長さ  $L=200$  とする. また入口密度を左右等しくとり, シミュレーションが終わるまで一定に保つ. 一回のシミュレーション時間は  $t=22000$  とする. ドリフト係数を変化させ, ドリフトの変化による歩行挙動, 臨界入口密度の変化を調べる. ここで臨界入口密度とはチャンネルが閉塞する入口密度である.

3.2 シミュレーション結果 入口密度が低い場合歩行者は自由に移動することが可能であるが, 入口密度が高くなると歩行者は互いに移動を妨げ合い相互の移動が困難になりチャンネルが閉塞する. 歩行者流の全タイムステップを終了したとき(ほぼ定常状態)の典型的な歩行者パターン図を示す. 黒点は $x$ 方向に移動する歩行者を示し灰点は $-x$ 方向に移動する歩行者を表す. 図4は入口密度が $P_r = P_l = 0.2$ の場合の歩行者パターン図である. これは歩行者が自由に移動している状態を示している. 図5は入口密度 $P_r = P_l = 0.3$ としたときのパターン図である. これは歩行者の閉塞現象を示し, 各歩行者はまったく移動できない状態である. チャンネル内で歩行者が前方に移動する割合を図6に示す. 黒丸は図4, 灰丸は図5に対応している. 歩行者が前方に進まなくなった時点でチャンネルが閉塞することを示している. 図4, 図6よりタイムステップを充分長くとった後でもチャンネルは閉塞することなく歩行者がチャンネル内を歩行し続けていることを示している. また図5, 図6より歩行者は $t=2400$ で流れが止まり, チャンネル内が閉塞している.

図7は前方向ドリフト係数を変化させたときの歩行者の平均移動速度と入口密度の関係を示したものである. 平均移動速度が不連続にゼロとなる入口密度が臨界密度となる. これより歩行者の閉塞が起こる臨界入口密度を求めることができる. 図7よりドリフト係数を上げるに従い前方に移動する平均速度は高くなるが, 一方臨界入口密度はドリフトの増加に伴い減少する. これは歩行者が速度を上げると, より低い密度で閉塞現象が発生することを示している.

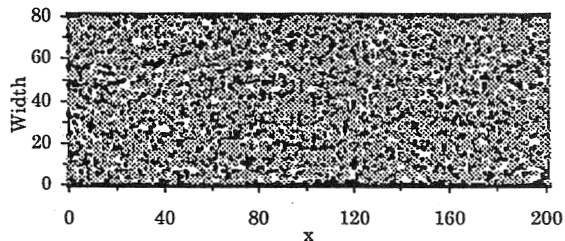


Fig.4 The pedestrian pattern at  $P_r = P_l = 0.2$

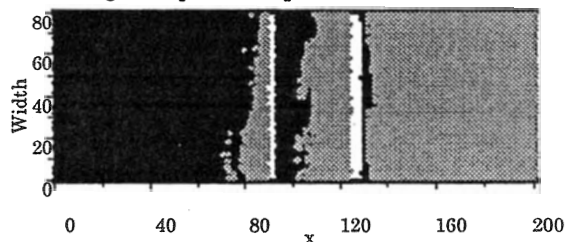


Fig.5 The pedestrian pattern at  $P_r = P_l = 0.3$

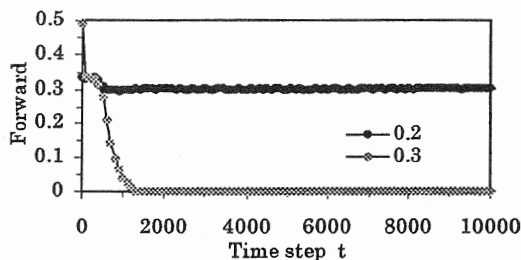


Fig.6 The plot of ratio of forward walkers against time

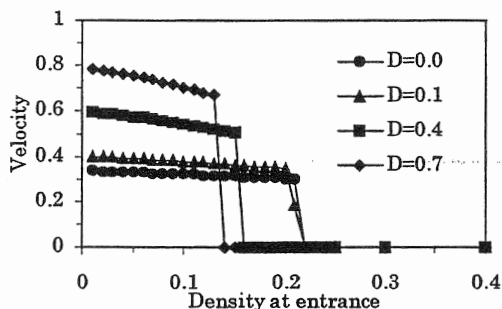


Fig.7 The plot of the mean velocity against entrance density

#### 4. 道幅変化の伴うチャンネル内の対向流

4.1 シミュレーション条件 ネットの無いチャンネルの中央に段差を設け、図3に示す形状の道幅が変化するチャンネルを考える。ここで左側の道幅を  $W_l=80$ 、右側の道幅を  $W_r=40$  とする。またチャンネル長さ  $L=200$  として入口密度は左右等しくし、シミュレーションが終わるまで一定とする。ドリフト係数は  $D=0$  としてシミュレーションを行う。

4.2 シミュレーション結果 ネットの無いチャンネル内の対向流と比較するため、歩行者のパターン図を示す。図8(a)は  $P_l=P_r=0.1$  としたときの定常状態(充分時間が経過した後)での歩行者のパターン図である。図8(b), (c)のパターン図は図8(a)における右方向移動歩行者と左方向移動歩行者をそれぞれ別々に示した図である。図8(a)より入口密度が低い場合においては充分時間が経過した後でも歩行者は閉塞することなく流れている。また図8(b)より右方向に移動する歩行者は道幅の変化する前では一様に分布しているが、ネック部分を越えた直後では中より壁付近で密度が高くなり、右側出口に近づくに連れて分布が一様になる。図8(c)より左方向に移動する歩行者は道幅の変化する部分まで一様に分布し、ネック部分を越えても歩行者はチャンネル中心線付近に偏っている。さらに左側出口に進むと、歩行者はチャンネル壁へと分散しながら左側出口に進行する。図9(a),(b),(c),(d)は入口密度  $P_l=P_r=0.1$ 、位置  $x=50,90,110,150$  における歩行者の平均密度分布(50000 タイムステップで平均)を示した図である。

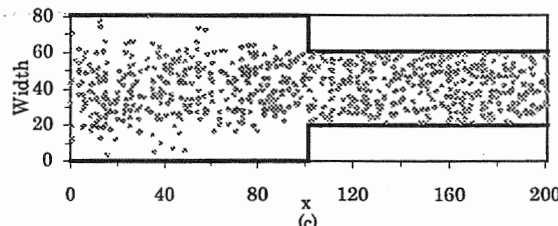
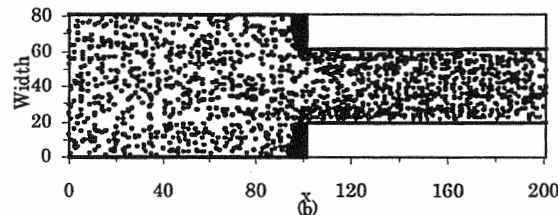
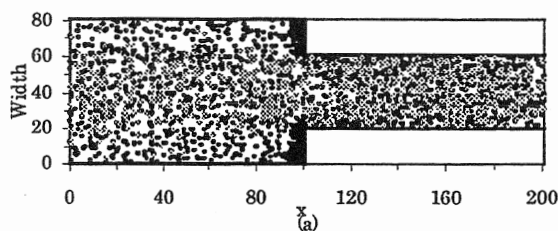


Fig.8 The pedestrian pattern at  $P_l=P_r=0.1$

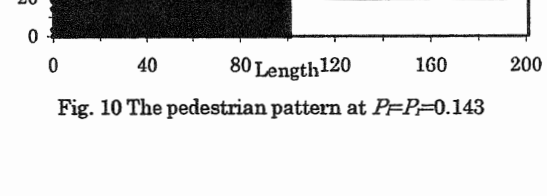
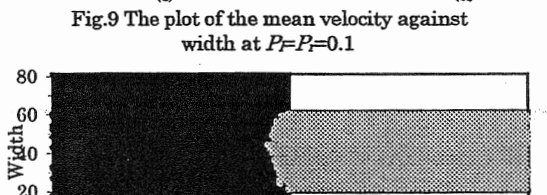
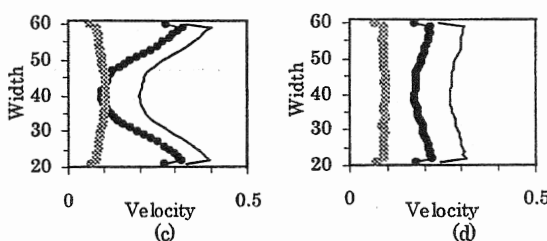
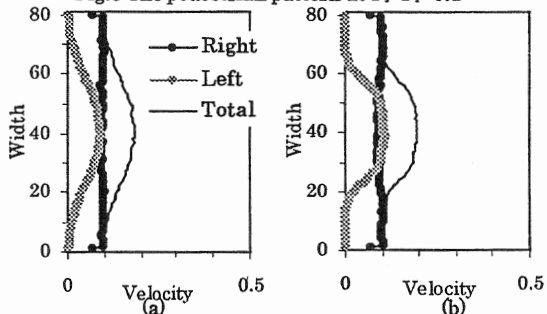


Fig.9 The plot of the mean velocity against width at  $P_l=P_r=0.1$

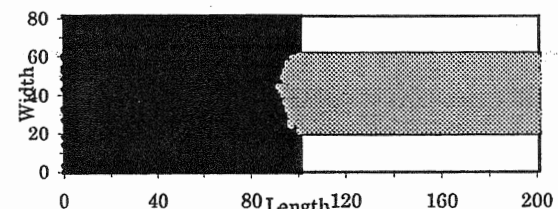


Fig.10 The pedestrian pattern at  $P_l=P_r=0.143$

図中の黒点が右方向移動歩行者、灰点が左方向移動歩行者の平均密度をそれぞれ示している。道幅の広い部分において右方向移動歩行者は対向してくる歩行者の影響を受けず一様に分布している。逆に左方向移動歩行者は道幅の狭い部分から流出したばかりでは中央に密集しているが、出口に進むに従って横方向に分散していく。道幅の狭まる段差付近(c)では右方向移動歩行者は道路隅に集まっている。これは右方向に移動する歩行者が道幅の広い部分から狭い部分へと移動するとき、壁際で道幅の狭い部分に入りやすいためである。右方向移動歩行者が右側出口に進むに従って、壁際の歩行者は中央付近へと移動し一様分布になる。図 10 は  $P_l = P_r = 0.143$  の場合における充分時間が経過した後のパターン図である。図中の黒点、灰点はそれぞれ右方向、左方向に移動する歩行者を表している。図 11 はチャンネル内で歩行者が前方に移動に移る割合を示している。図 11 から明らかかなように入口密度  $P_l = P_r = 0.1$  のとき歩行者は一定の割合で前方に移動しているが、入口密度  $P_l = P_r = 0.143$  のとき歩行者はタイムステップ  $t=15000$  を超えた辺りから前方に移動する割合が下がり、後にゼロとなりチャンネルが閉塞することを示している。次にチャンネル断面における歩行者占有率の時間発展を調べる。図 12 は長さ方向に対する入口密度  $P_l = P_r = 0.143$  における歩行者の平均占有率の時間変化を示したものである。平均占有率は道幅方向に対する歩行者密度を後半 5000 タイムステップで平均した値を用いている。この図は時間経過と共にネック部分を中心に歩行者が詰まっていく様子を示す。また図中の凡例はタイムステップを示す。

以上のことからチャンネル内の歩行者の流れは、ある入口密度を超えるとネック部分を中心にチャンネルが閉塞することを明らかにした。ここで臨界入口密度( $P_c$ )を求めるため、入口密度と歩行者の平均移動速度の関係を図 13 に示す。ここで平均移動速度は後半の 10,000 タイムステップで平均した値である。図 13 より臨界入口密度は  $P_c = 0.143$  にある。よって臨界入口密度より低い密度ではチャンネルは閉塞することなく歩行者は流れつづけることができ、臨界入口密度を超えるとチャンネルは確実に閉塞することを明らかにした。

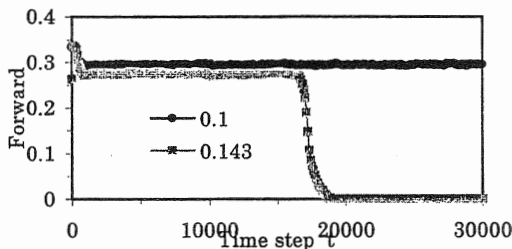


Fig.11 The plot of ratio of forward walkers against time

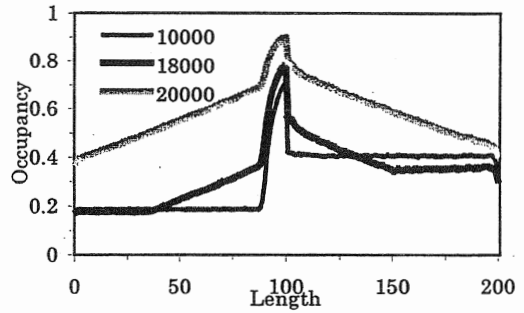


Fig.12 The plot of the mean occupancy against length

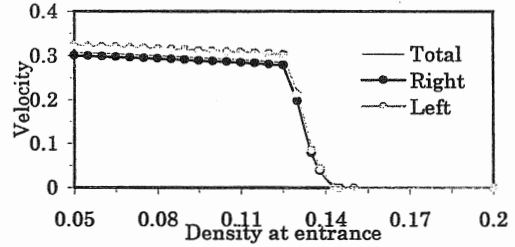


Fig.13 The plot of the mean velocity against density at entrance

## 5. 結言

チャンネル内の歩行者の流れについて道幅変化の無い場合と道幅変化を与えた場合におけるシミュレーションを行い以下の結論を得た。

1. チャンネル内の歩行者の流れをシミュレートできる格子気体モデルを提案した。
2. 道幅変化の無いチャンネル内の対向流において入口密度が高くなると歩行者の閉塞現象が起こり、歩行者が自由に移動できなくなることを明らかにした。
3. 道幅変化の無いチャンネル内の対向流において臨界入口密度は歩行者のドリフトの大きさに依存することを明らかにした。
4. 道幅変化の伴うチャンネル内の対向流においてネック部分を中心に歩行者の流れが閉塞することを示した。
5. ネックのあるチャンネル内の対向流において臨界入口密度( $P_c$ )の存在を明らかにした。

## 参考文献

- (1) M. Muramatsu, T. Irie, T. Nagatani, Jamming transition in pedestrian counter flow. *Physica A* 267(1999)487-498.
- (2) M. Muramatsu, T. Nagatani, Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic. *Physica A* 275(2000)281-291.