

チャンネル内歩行者流の格子気体シミュレーション*

田島祐輔^{*1}, 村松将邦^{*2}, 長谷 隆^{*3}

Lattice Gas Simulation of Pedestrian Flow in a Channel

Yusuke TAJIMA, Masakuni MURAMATSU and Takashi NAGATANI^{*4}^{*4} Shizuoka University, Department of Mechanical Engineering,
3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561 Japan

A lattice gas model with biased random walkers is presented to mimic the pedestrian counter flow in a channel under the open boundary condition of constant density. There are two types of walkers without the back step: the one is the random walker going to the right and the other is the random walker going to the left. It is found that a dynamical jamming transition from the freely moving state at low density to the stopped state at high density occurs at the critical density. The density profiles of walkers are calculated over the channel. It is shown that the pedestrian counter flow can be simulated by the lattice gas model.

Key Words: Pedestrian Flow, Traffic Flow, Phase Transition, Lattice Gas Model, Monte Carlo Simulation

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, 通勤ラッシュや交通渋滞の改善が早急に望まれている⁽¹⁾. 交通流は巨視的にみると典型的な流体力学問題として取り扱うことができ, 交通渋滞は非線形波動問題のひとつであると考えられている. 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来た⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾. しかし歩行者の流れや群集の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⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾.

歩行者の流れは自動車の流れと同様に, 日常生活においてその挙動を予測することは重要であり, 特に通勤ラッシュ時における歩行者の挙動をシミュレートすることが必要とされている. また地下道における災害

時の歩行群集の挙動に関する予測も重要な問題であり, 歩行者の流れについて更なる研究の発展が必要である.

例えば地下道などの道幅や形状の決められた道での混雑は迂回などができないため, 朝のラッシュ時には大変な混雑が発生し思い通りに移動することができなくなるという問題が実際に起きている. また地下道に限らずスタジアムや映画館などの決められたスペースに人が密集するようなどころにおいても試合終了後や映画上映後の出口において同様に混雑が発生する.

しかし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. したが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回避や道路形状, 建物の設計面においても混雑の削減に役立つことが期待される.

歩行者流は粉体流と類似しているが, 著しく異なる点もある. 特に顕著な特性は右方向に移動する歩行者は右方向に左方向に移動する歩行者は左方向にそれぞれ同時刻に移動しているという点である. 本研究では

* 原稿受付 2000年7月18日.

^{*1} 静岡大学大学院(〒432-8561 浜松市城北3-5-1).^{*2} 静岡大学大学院.^{*3} 正員, 静岡大学工学部.

E-mail: tmtnaga@ipc.shizuoka.ac.jp

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。これは地下道などの道路形状の決められた道における歩行者の対向流を想定している。このような地下道では通勤ラッシュあるいは災害時には、混雑が発生しチャンネルが閉塞することが予測される。このような閉塞現象の予測が特に災害時には重要であると考えられる。

主な記号

$P_{i,x}$: 歩行者の x 方向に移動する確率
$P_{i,-x}$: 歩行者の $-x$ 方向に移動する確率
$P_{i,y}$: 歩行者の y 方向に移動する確率
$P_{i,-y}$: 歩行者の $-y$ 方向に移動する確率
D	: ドリフト係数
t	: タイムステップ
P_l	: 左側入口密度
P_r	: 右側入口密度
P_c	: 臨界入口密度
L	: チャンネル長さ
W_l	: 左側道幅
W_r	: 右側道幅

2. 歩行者流のモデリング

2.1 歩行者のモデル 歩行者の挙動は個人個人歩く速度が異なるため、これを一つ一つモデル化するのは困難である。よ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。本研究では全ての歩行者の微視的挙動は同一であると近似し最も単純な格子気体モデルを変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へランダムに揺れながら希望する方向へ移動し、後ろ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。一般的には歩行者は前方 180 度の範囲に自由に移動可能であるがシミュレーションの簡単化のため前方及び左右の 3 方向のみに移動可能であると近似した。しかしながら数タイムステップで見ると歩行者は斜め方向にも移動している。したがってこのような正方格子状のランダムウォークモデルでも巨視的に見れば自由な方向への移動が含まれていると考えられる。

従来のランダムウォークは前後左右の 4 方向に移動するが、歩行者の流れには方向性があり前方と左右の三方向に移動する。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。

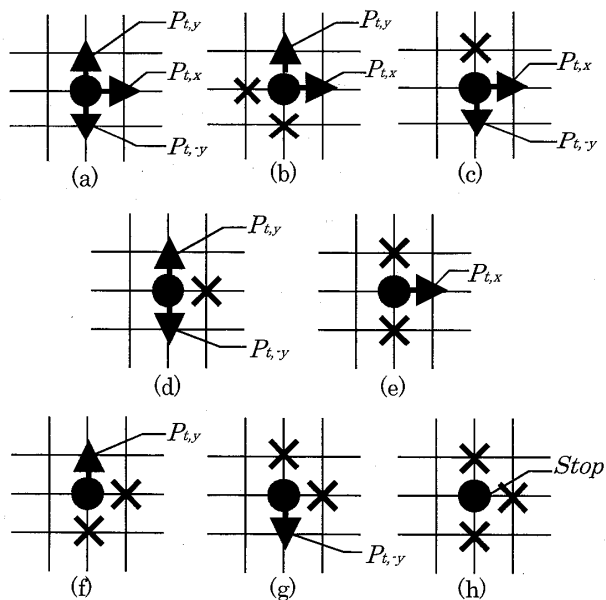


Fig.1 All possible configurations of the right walker (going to right) on the square lattice

歩行者移動の規則は次のように与える。右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 $P_{t,x}$ 、 $P_{t,y}$ 、 $P_{t,-y}$ とする。また歩行者は基本的に前方に移動するため移動方向を決定する確率に変化を与えることができるように、ドリフト係数 D を用いて次式で移動確率を決定する。前方あるいは左右のサイトに他の歩行者がいる場合、そのサイトへは移動できないものとする。ここで \times 印のサイトは他の歩行者が存在するところである。歩行者の配置は以下の 8 種類に分類され、各配置における移動確率は以下に示す。

配置(a)のとき

$$P_{i,x} = D + (1-D)/3 \quad (1)$$

$$P_{i,y} = P_{i,-y} = (1-D)/3 \quad (2)$$

配置(b), (c)のとき

$$P_{i,x} = D + (1-D)/2 \quad (3)$$

$$P_{i,y} = P_{i,-y} = (1-D)/2 \quad (4)$$

配置(d)のとき

$$P_{i,y} = P_{i,-y} = 1/2 \quad (5)$$

配置(e), (f), (g)のとき

$$P_{i,x} = P_{i,y} = P_{i,-y} = 1 \quad (6)$$

配置(h)のとき

$$P_{i,x} = P_{i,y} = P_{i,-y} = 0 \quad (7)$$

左方向に移動する歩行者の場合は式中の x を $-x$ と置き換えることにより移動確率が与えられる。すべての歩行者が上の移動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。一般的には歩行者は前方に障害物がない場合左右に少しそれながら前進する。この左右の揺れが $(1-D)/3$ で表されている。本論文では1マス前方と左右を見て移動するものと近似した。しかしながら1マス前方に他の歩行者または障害物が存在した場合、迂回路があれば本モデルの歩行者は自動的にこの迂回路を進む。

2.2 道路形状と境界条件 チャンネル内の対向流では図2, 図3に示す2種類の形状の道を考える。縦方向に道幅, 横方向に道の長さをとり, 長さ方向を x とする。図2のモデルは道幅変化の無い最も基本的なチャンネルのモデルであり, 図3のモデルは図2のモデルの中央にネックを設けた(道幅に変化を与えた)モデルである。

図2, 図3に示すようにチャンネルの左右側に出入口を設定する。右側の出入口における左方向に移動する歩行者の密度を P_l (一定) とし, 左側の出入口における右方向に移動する歩行者の密度を P_r (一定) とする。左側出口での左方向移動者の密度はゼロとし, また右側出口での右方向移動者の密度もゼロとする。壁は反射壁とし, 歩行者は壁の中には進まないものとする。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($P_l = P_r$)によって与える。このとき左右の入口にそれぞれ右方向に移動する歩行者, 左方向に移動する歩行者を入口にランダムに配置する。次に歩行移動規則に従って歩行者を移動し, 境界から移動した歩行者の数だけ出入

口に新しく歩行者を加える。これを繰り返し行うことによって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。

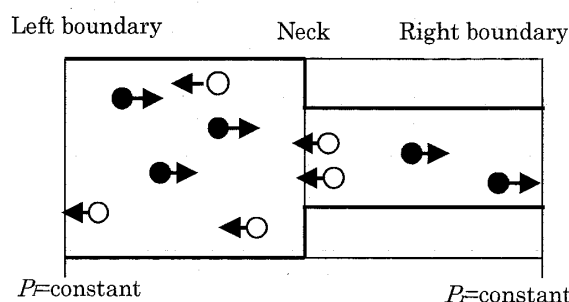


Fig.2 Simulation model without neck

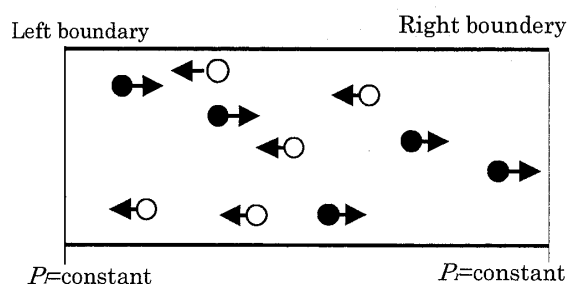
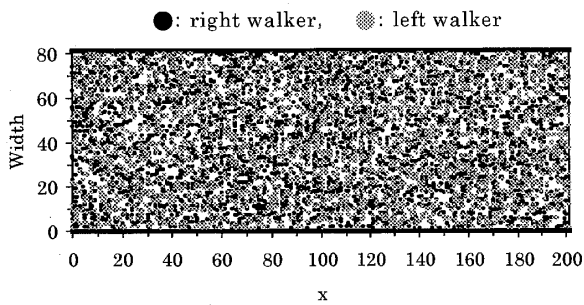
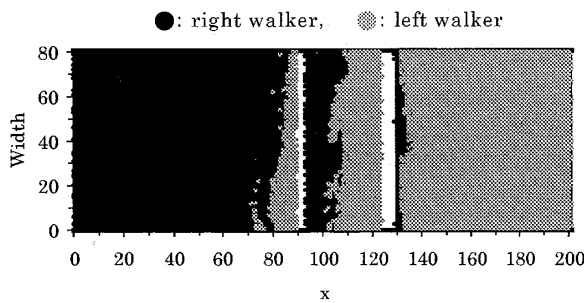
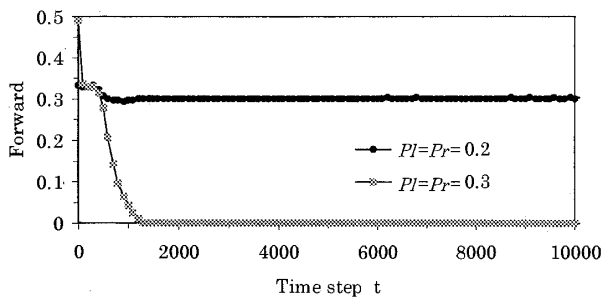
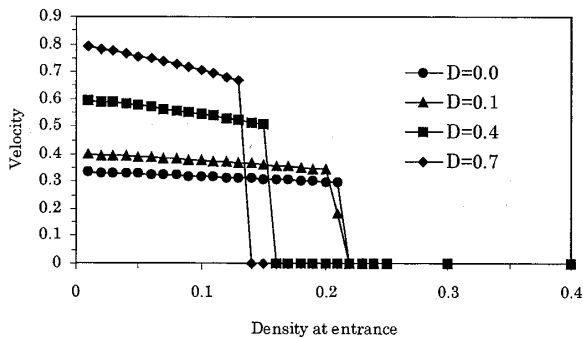


Fig.3 Simulation model with neck

3. ネック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 $W_l = W_r = 80$, チャンネル長さ $L = 200$ とする。また入口密度を左右で等しくとり ($P_l = P_r = const$), 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。黒い樹目は x 方向に移動する歩行者を, 灰色の樹目は $-x$ 方向に移動する歩行者を表す。図4は入口密度が $P_l = P_r = 0.2$ かつ $D = 0$ 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は入口密度を $P_l = P_r = 0.3$ かつ $D = 0$ 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

Fig.4 The pedestrian pattern at $P_l = P_r = 0.2$ Fig.5 The pedestrian pattern at $P_l = P_r = 0.3$ Fig.6 The plot of ratio of forward walkers against time. P_l : density at left inlet, P_r : density at right inletFig.7 The plot of the mean velocity against entrance density. D : drift

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に、灰色丸は図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は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つづけていることを示している。また図5,6より歩行者は $t=1400$ でほとんど移動しなくなるが、数人の歩行者はなおも移動している。完全に全ての歩行者が移動不可能となる時間は $t=2400$ である。そこで歩行者の流れは止まりチャンネルが閉塞する。また図5よりチャンネルが閉塞する場合にはその詰まる場所が多数存在していることを示している。

図7はドリフト係数 D 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。ここで平均移動速度は前方に移動した歩行者数を全歩行者数で割った値をシミュレーション時間の後半10000タイムステップで平均した値である。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出来る。図7よりドリフト係数を上げるに依り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って減少する。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。

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 ネットのないチャンネル内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 ($P_l = P_r = const$)。シミュレーション時間は22000タイムステップとし、ドリフト係数 $D=0$ としてシミュレーションを行う。右方向移動歩行者は左側の入口から流入し、右側出口より流出する。同時に左方向移動歩行者右側の入口から流入し、左側出口より流出する。

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、まず歩行挙動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(充分時間の経過した後)での歩行者パターン図である。図8(b),(c)のパターンは図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

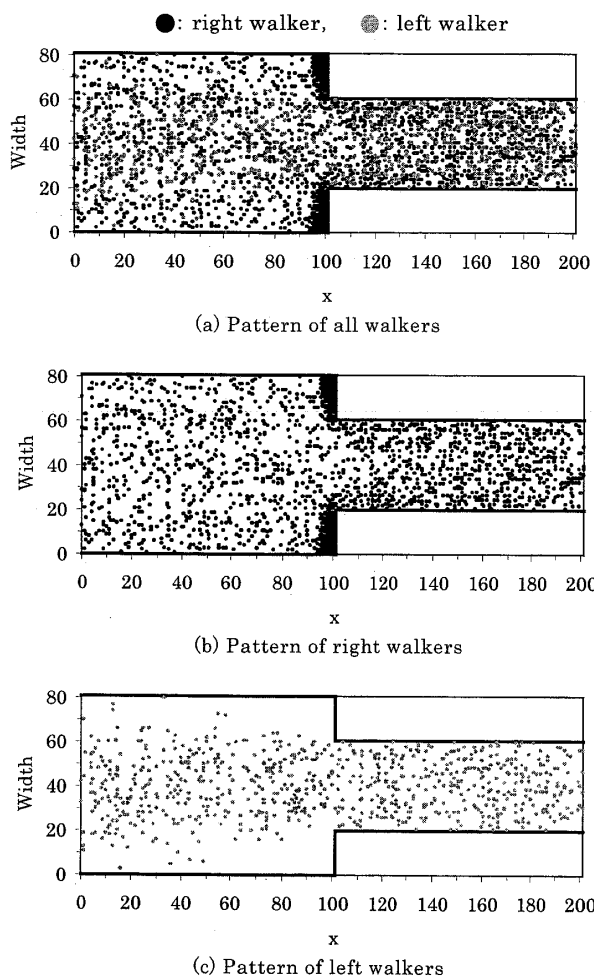


Fig.8 The pedestrian pattern at $P_l = P_r = 0.1$

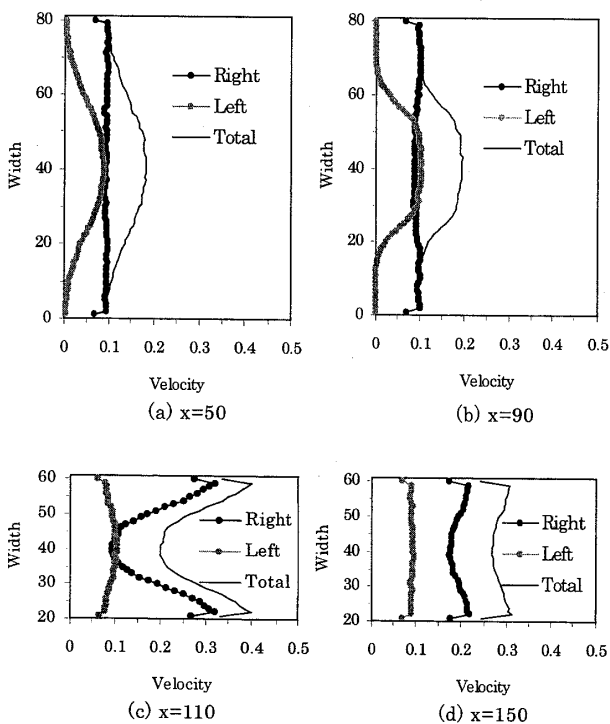


Fig.9 The plot of the mean velocity against width at $P_l = P_r = 0.1$

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．ネック部分には右方向に移動する歩行者が多少溜まっているが閉塞することはない．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央より壁付近で密度が高くなり，右側入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入口に進行する．

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．図中の黒い点が右方向に移動する歩行者の平均密度，灰色の点が左方向に移動する歩行者の平均密度，実線が全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に移動する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．逆に左方向に移動する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に広がっていく．道幅の狭まる段差付近(c)では右方向に移動する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所から狭い所へと移動するとき，壁際で道幅の狭い部分に入りやすいためである．右方向の歩行者が右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 $P_l = P_r = 0.143$ の場合における定常状態でのパターン図であり，図 11 は途中の時間 $t=17000$ におけるパターン図である．またパターン図における黒点，灰色の点はそれぞれ右方向と左方向に移動する歩行者を示している．図 12 はチャンネル内で歩行者が前方に移動する割合を示している．図 12 から明ら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 $t=15000$ を越えた辺りから前方に移動する割合が下がり，後にその割合は零となりチャンネルが閉塞することを示している．図 11 はチャンネルが閉塞する直前の状態を示したものである．チャンネル内ではネック部分より右方向歩行者が閉塞をし始め，その結果左右両方向の歩行者のクラスター形成によって閉塞し始め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 13 は長さ方向に対する入口密度 $P_l = P_r = 0.143$ に

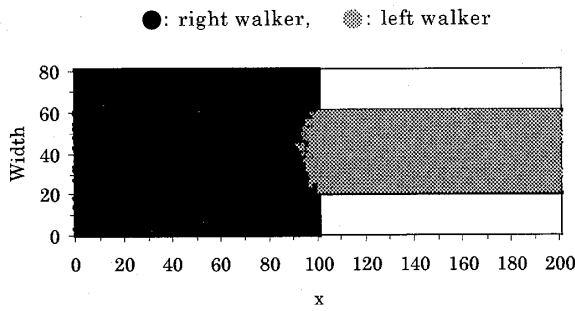


Fig.10 The pedestrian pattern at $P_l = P_r = 0.143$ and $t = 22000$

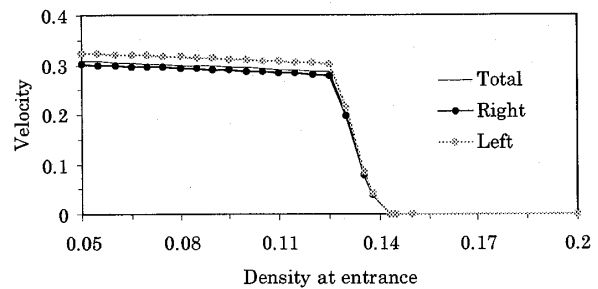


Fig.14 The plot of the mean velocity against density at entrance

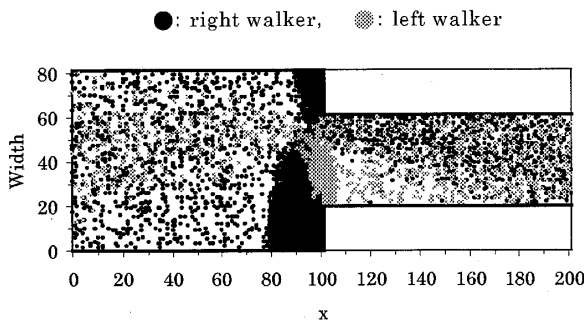


Fig.11 The pedestrian pattern at $P_l = P_r = 0.143$ and $t = 17000$

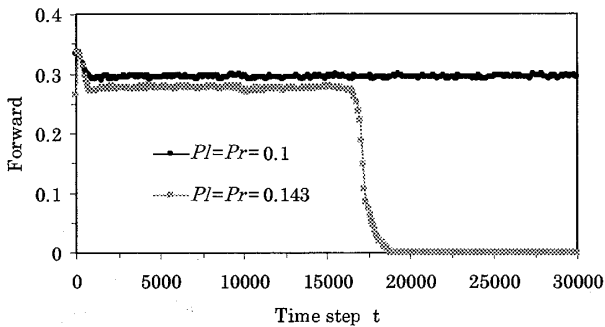


Fig.12 The plot of ratio of forward walkers against time t

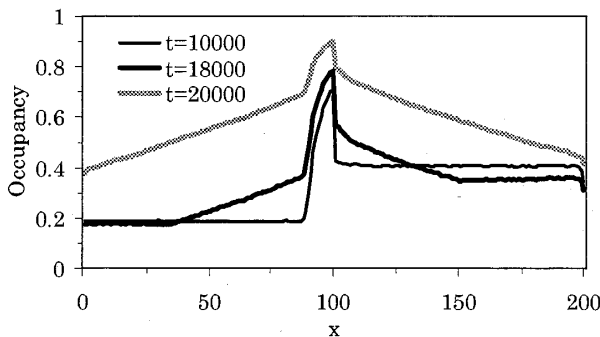


Fig.13 The plot of the mean occupancy against length. t : time

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。ここで平均占有率は道幅方向に対する歩行者の密度を全タイムステップの内の最後の 5000 タイムステップで平均した値を用いている。この図は時間の経過ととも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(臨界入口密度)を越えるとチャンネルが閉塞し、その閉塞の仕方はネック部分を中心に道幅の広い部分に右方向移動歩行者、道幅の狭い部分に左方向移動歩行者が詰まっていくという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、入口密度とチャンネル内歩行者の平均移動速度の関係を図 14 に示す。ここで平均移動速度はシミュレーション時間 $t = 22000$ の後半 10000 タイムステップで平均したチャンネル内における移動速度の平均値である。図 14 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内は閉塞することなく歩行者は流れ続けることができ、臨界入口密度を超えるとチャンネルは確実に閉塞する。

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な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ることを明らかに

した.

3. 歩行者の閉塞が起こる臨界入口密度 P_c をシミュレーションにより決定した.
4. 道幅変化のな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.
5. 道幅に変化を与えたチャンネル内の対向流に関しては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.
6. 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) D. Chowdhury et al. Physics Reports, 329 (2000) 199.
- (2) 長谷隆, 科学, 66-9 (1996) 617.
- (3) 吉川泰男, ほか4名, 機論, 63-610, B (1997), 2252.
- (4) 村松将邦, 長谷隆, 機論, 65-633, B (1999), 1599.
- (5) 村松将邦, 長谷隆, 機論, 65-635, B (1999), 2398.
- (6) Nagel, K. et al. Phys. Rev. E58 (1998) 1425.
- (7) H. Y. Lee et al. Phys. Rev. E59 (1999) 5101.
- (8) L.F. Henderson, Nature 229 (1971) 381.
- (9) D. Helbing, Phys. Rev. E 51 (1995) 4282.
- (10) M. Muramatsu, T. Nagatani, Physica A 275 (2000) 281.
- (11) M. Fukui, Y. Ishibashi, J. Phys. Soc. Jpn. 68 (1999) 2861.