

連続空間上における  
歩行者動力学モデルに関する研究  
A study on pedestrian dynamics model  
on continuous space

指導教員 兼田敏之教授

名古屋工業大学 建築・デザイン工学科

稲垣 靖宏

平成21年2月13日

# 目次

第 I 章 研究の背景と目的	1
第 II 章 歩行者動力学モデル	2
II-1 方程式の解釈	3
II-1-1 歩行者推進力	3
II-1-2 社会作用力	4
II-1-3 集団凝集力	5
II-1-4 障害物回避力	5
II-1-5 その他の相互作用力	6
II-2 対象空間事例	6
II-2-1 二方向回避モデル	6
II-2-2 障害物回避モデル	8
II-2-3 経路再設定モデル	10
II-2-4 考察	10
第 III 章 集団行動のシミュレーション	11
第 IV 章 アーチング現象のシミュレーション	13
IV-1 アーチング生成のシミュレーション試行	13
IV-2 アーチング崩壊のシミュレーション試行	14
第 V 章 結論	16
参考文献	17
付録	付 1

## 第I章 研究の背景と目的

都市・建築空間をデザインするに際し、歩行者の行動モデル分析から、快適さや安全性を探ることは意義のあることである。近年、複雑系の発想を取り入れたエージェントアプローチが有望視されている。これまで離散空間(セル)上における歩行者エージェントモデルとして、ASPF\*などが知られているが、空間内でのエージェントの動作をより自然に表現するには、連続空間上における歩行者モデルが望ましい。

本研究では、Helbing<sup>1)</sup>らの提案した歩行者動力学モデルを検討し、その際RSU(Random Sequential Update)方式によるマルチエージェントシミュレータを用い、差分近似したシミュレーションモデルを作成するとともに集団行動、アーチング現象の再現を通じて、このモデルの特徴を探る。

---

\* Agent-Simulation of Pedestrian Flow

## 第II章 歩行者動力学モデル

本研究では、Helbing、Molnar、Farkas、Bolay<sup>1),2),3)</sup>らの歩行者動力学理論モデルから、シミュレーションモデルを試作し、その可能性を探る。

$\mathbf{f}_i(t)$  を歩行者  $i$  に影響を与える力の総和とし、 $m_i$  を歩行者  $i$  の質量とする。 $\boldsymbol{\xi}_i(t)$  は体系化できない振る舞い変動を反映した個別のばらつきであるとする、

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{f}_i(t) + \boldsymbol{\xi}_i(t)$$

と運動方程式が書ける。この運動方程式の  $\mathbf{f}_i(t)$  は、Helbing らの理論モデルから、式 (II.1) と書き表すことが出来る。

$$\mathbf{f}_i(t) = \begin{cases} \mathbf{f}_i^{dr}(t) + \sum_{j(\neq i)} [\mathbf{f}_{ij}^{soc}(t) + \mathbf{f}_{ij}^{att}(t)] + \sum_b \mathbf{f}_{ib}(t) + \sum_k \mathbf{f}_{ik}^{att}(t) & \text{(II.1a)} \\ \mathbf{f}_i^{dr}(t) + \sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{ph}(t) + \sum_b \mathbf{f}_{ib}(t) & \text{(II.1b)} \end{cases}$$

Helbing らの歩行者動力学モデルは、自分以外の歩行者に対する距離関係で、 $m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{f}_i(t) + \boldsymbol{\xi}_i(t)$  の右辺の式  $\mathbf{f}_i(t)$  が切り替わる。他者との距離が、自分の身体に接触しない状態では“対人非接触状態”で、式 (II.1a) で扱い、接触し体積力が加わる状態では、“対人接触状態”となり、式 (II.1b) で扱う。

## II-1 方程式の解釈

シミュレーションモデルを試作するにあたり、式 (II.1) の右辺を、 $\mathbf{f}_i^{dr1}(t) = m_i \frac{v_i^0(t) \mathbf{e}_i^0(t)}{\tau_i}$ 、 $\mathbf{f}_i^{dr2}(t) = -m_i \frac{v_i(t)}{\tau_i}$ 、 $\sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{soc}(t)$ 、 $\sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{att}(t)$ 、 $\sum_b \mathbf{f}_{ib}(t)$ 、 $\sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{ph}(t)$ 、 $\sum_k \mathbf{f}_{ik}^{att}(t)$  と 7 つの項に分け、各項毎に具体的な考察を行う。

### II-1-1 歩行者推進力

$$m_i \frac{v_i^0(t) \mathbf{e}_i^0(t)}{\tau_i} \quad (\text{II.2})$$

第 1 項は歩行者  $i$  の歩行者推進力であり、目的方向を向く意志の働く項である。この項は、時刻  $t$  における歩行者の実理想速度  $v_i^0(t)$  と目的方向を表す正規化ベクトル  $\mathbf{e}_i^0(t)$  との積で表される。

歩行者が物理的に取り得る最大速度を  $v_i^{max}$  とし、歩行者の希望巡航速度 (初期速度)  $v_i^0(0)$  とすれば、 $v_i^0(t)$  はパラメータ  $n_i(t)$  を用いて、

$$v_i^0(t) = [1 - n_i(t)] v_i^0(0) + n_i(t) v_i^{max} \quad (\text{II.3})$$

と表される。

また、パラメータ  $n_i(t)$  は、希望巡航方向へ進む速度の平均値を  $\bar{v}_i(t)$  とすれば、

$$n_i(t) = 1 - \frac{\bar{v}_i(t)}{v_i^0(0)}$$

と表され、実理想速度は必ずしも希望巡航速度と一致するとは言えないが、長時間歩行者の動きが妨げられない状況においては、実理想速度は希望巡航速度にほぼ等しい ( $v_i^0(t) = v_i^0(0)$ ) とする解釈が可能である。

尚、対人接触状態が長時間持続し、希望巡航速度に達することができない状態が長時間続く場合、逸早くその状態を抜け出したいという意志が歩行者に働くと考えられるため、実理想速度と希望巡航速度は一致しない。その場合、式 (II.3) から、歩行者の実理想速度はその最大速度\*に漸近すると考えられる ( $v_i^0(t) = v_i^{max}$ )。

$$-m_i \frac{v_i(t)}{\tau_i}$$

\* 走ってその場を逃げ出そうとするような状態

第2項は、第1項の時刻  $t$  における歩行者速度であり、これが第1項と一致しない場合は、目的地へ向かう歩行を妨げる力として働き、摩擦力のような働きをする。

$$\mathbf{f}_i^{dr}(t) = m_i \frac{v_i^0(t) \mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} \quad (\text{II.4})$$

第1項と第2項の和は、緩衝時間  $\tau_i$  の間で、歩行者が目的地に達するのに望ましい速度 (実理想速度) へと、随時修正を行う力として作用する。

## II-1-2 社会作用力

$$\sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{soc}(t)$$

第3項は社会作用力であり、一般に Social Force と言われる。主に、減速回避を行い、他者との社会的距離を維持しようとする斥力である。他者との衝突回避のために、他者から作用する力として解釈でき、 $\sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{soc}(t)$  は、対象  $x$  から歩行者  $i$  に向かう正規化ベクトルを  $\mathbf{n}_{ix}$ 、相互作用力を決める定数  $A_i$ 、作用が及ぶ距離  $B_i$ 、歩行者  $i$  と歩行者  $j$  の中心間の距離  $d_{ij}(t)$ 、歩行者  $i$  と歩行者  $j$  の身体の厚みの合計を  $r_{ij}$  として、

$$A_i e^{\frac{r_{ij}-d_{ij}}{B_i}} \mathbf{n}_{ij} \left( \lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos(\phi_{ij})}{2} \right)$$

と書ける。ただし、 $\phi_{ij}(t)$  は方向ベクトル  $\mathbf{e}_i(t)$  と  $-\mathbf{n}_{ij}(t)$  間の角度である。

後半の  $\frac{1+\cos(\phi_{ij})}{2}$  はカージオイド型の感度分布 (図2.1) を表し、その分布に従う力と、そうでない力の割合をパラメータ  $\lambda_i$  で調整する。混雑時の歩行者動力学モデルを考える場合においては、 $\lambda_i$  を1に近づけることにより、進行方向に対し、前方のみならず後方からも社会作用力を受けるモデルを作り出すことができる。また、 $\lambda_i < 1$  の時は、歩行者エージェント  $i$  と  $j$  は異なる方向を向いていることを表す。

本シミュレーションでは、断りの無い限り  $A_i$  の符号を正とし、社会作用力を対向者接近などによる回避行動を促す斥力として扱う。

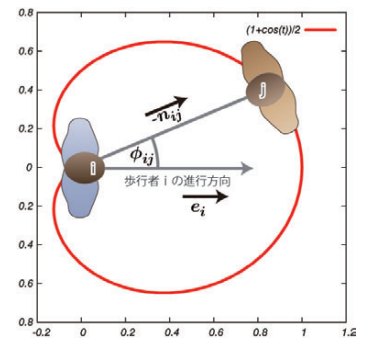


図2.1: 感度分布

### II-1-3 集団凝集力

$$\sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{att}(t)$$

第4項は集団凝集力であり、 $C_{ij}$ を比例定数として、 $-C_{ij}\mathbf{n}_{ij}(t)$ と表され、小集団がまとまる力として作用する。この項は、集団が他の歩行者や障害物などにより、分断後も再びまとまる作用を表している。

$C$ の符号が負の場合は、集団を離散させる力として解釈できるが、本シミュレーションでは、断りの無い限り集団をまとめる引力として扱う。

### II-1-4 障害物回避力

$$\sum_b \mathbf{f}_{ib}(t)$$

第5項は障害物回避力で、人以外で物理的に動かないものから受ける斥力である。本シミュレーションでは、壁から受ける斥力が代表的なものである。

この項は障害物に衝突、接触した場合のみならず、接触前にも斥力として歩行者に作用し、歩行者が障害物に必要以上に接近することを妨げる働きをする。

$k$ および $\kappa$ を比例定数、 $\Theta(z)$ を、 $z \geq 0$ の時のみ $\Theta(z) = z$ 、それ以外は $\Theta(z) = 0$ として働く関数として定義すると、

$$\left\{ A_i e^{\frac{r_i - d_{ib}}{B_i}} + \kappa \Theta(r_i - d_{ib}) \right\} \mathbf{n}_{ib} - \kappa \Theta(r_i - d_{ib}) (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{ib}) \mathbf{t}_{ib}$$

と表される。この項は、物理的に壁と接触可能な状態 ( $r_i \geq d_{ib}$ ) になれば、“体積力”  $\kappa(r_i - d_{ib})$  が物体の圧縮力に対する反作用して効き始め、“運動摩擦”  $\kappa(r_i - d_{ib}) (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{ib}) \mathbf{t}_{ib}$  は壁に対して面に沿う向きの動きを妨げる力として作用する。

$$\sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{ph}(t)$$

第6項は対人接触状態において作用する斥力で、以下のように表すことができる。

$$\left\{ A_i e^{\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_{ij}}} + k \Theta(r_{ij} - d_{ij}) \right\} \mathbf{n}_{ij} + \kappa \Theta(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij}$$

この項は、他者を動きうる障害物だとみなした式であり、対人接触状態において、対人非接触状態の社会作用力と同様の働きをする。

第一項は、歩行者の中心間を結んだ方向に受ける力であり、第二項は歩行者間の折線方向に受ける力を表す。 $\mathbf{t}_{ij}$  は  $\mathbf{n}_{ij}$  に直交する正規化ベクトルであり、 $\mathbf{t}_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ 、 $\Delta v_{ji}^t = (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{t}_{ij}$  を意味する。

## II-1-5 その他の相互作用力

$$\sum_k \mathbf{f}_{ik}^{att}(t)$$

第7項はその他の相互作用力で、ショーウィンドウや路上でのハプニング等からの引力または斥力として作用し、第3項と同型の式の形をとる。

## II-2 対象空間事例

### II-2-1 二方向回避モデル

歩行者エージェントを、40m 四方の正方形の設定空間内で、全体の人数合計が88人に達するまで、東端、西端からランダム (1ステップ内に歩行者の発生する確率を9パーセントに設定) に歩行者エージェントを発生させ、対人回避が正常に行われるかを確認する。

歩行者エージェントは東西方向に歩行し、東端  $(100, 50+\alpha)$  から出現するエージェントは西端  $(50+\alpha, 0)$  を、西端  $(50+\alpha, 0)$  から出現するエージェントは東端  $(100, 50+\alpha)$  を目的地とし、目的地に到達した歩行者は消滅させる。ただし、 $\alpha$  は歩行者が時間を空けずして同じ地点に発生する可能性に対応した補正值で、本事例ではランダムに  $-11$  から  $11$  までの値を与えた (図2.2)。

これに際し、式 (II.1a) 内の項を限定的に作用させ、

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

を歩行者エージェントに与えるルールとした。



図2.2に示す通り、社会作用力が正常に機能し、歩行者が各々、対人回避行動をとることが確かめられた。

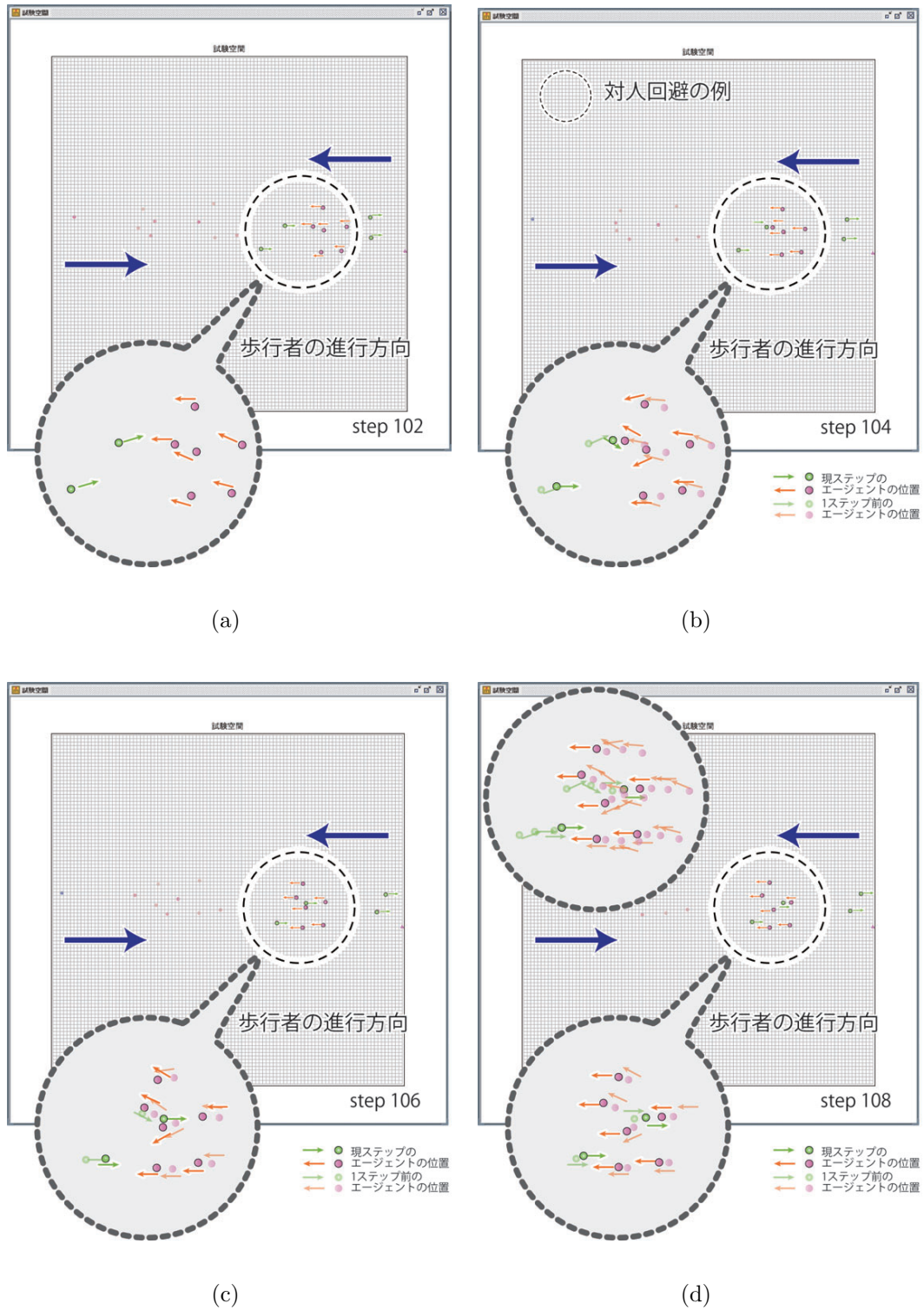


図2.2: 二方向回避モデルのシミュレーション事例

## II-2-2 障害物回避モデル

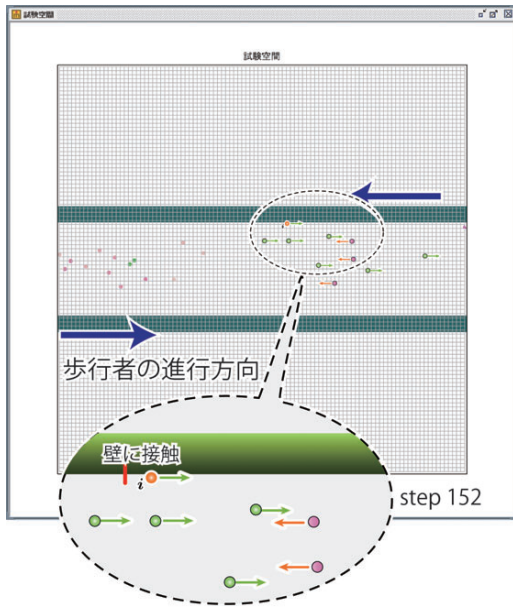
次に、障害物回避行動を確認するため、二方向回避モデルの空間内に、東西方向に9.6m幅の通路を設定する(図2.3)。この通路領域を、歩行者エージェントを二方向回避モデルと同じ条件で発生させ、障害物(壁)との距離を保つ作用を確認する。

これに際し、二方向回避モデルに障害物回避項を加えた、

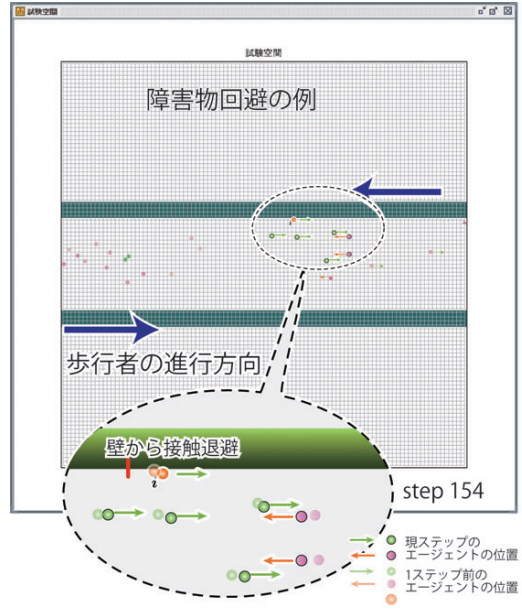
$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) \mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}^{soc}(t) + \sum_b \mathbf{f}_{ib}(t)$$

を歩行者エージェントに与えるルールとした。

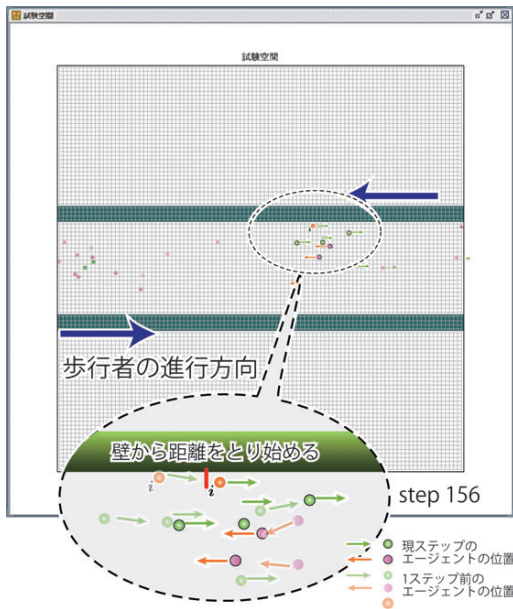
図2.3における壁際の歩行者*i*に注目すると、周囲の歩行者流に阻まれながらも、数ステップ後には、壁との距離を保つ回避行動に入る現象が確かめられた。



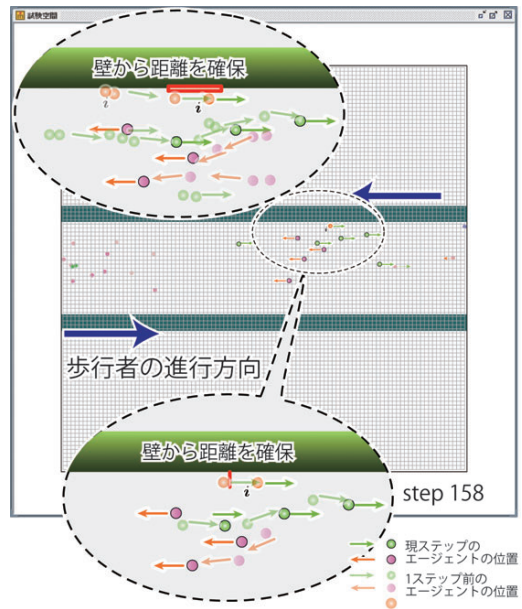
(a)



(b)



(c)



(d)

図2.3: 障害物回避モデルのシミュレーション事例

### II-2-3 経路再設定モデル

本歩行者エージェントモデルは、目標方向維持機能 (II.4) が備わっていることはすでに述べた通りである。ここでは、エージェントの位置 (A) とその目的地 (B) の途中に障害物が永続的に存在するため、歩行者が目的地に進むに際し、直線経路ちわとることができない事例を考える。その事例につき、二方向回避モデルと障害物回避モデルの応用として試作した、経路再設定モデルを通して考察を加える。

一例として、L字型経路 (図2.4) を想定し、歩行者エージェント  $i$  は A 地点に発生し、B 地点を目的地として歩行する。しかし、目的地まで直線で結んだ最短経路は、壁に邪魔されて選択することはできない。

そのため、当エージェントモデルは障害物回避モデルのルールに加え、B 地点を直線的に障害物を介さずに見渡せる C 領域内に、仮の目的地を設定する。そして、歩行者は C 領域に入るまで、障害物 (ここでは壁と自分以外の歩行者) を避けて進み、領域に入った後、新たに B 地点を目的値に再設定し、目的値まで障害物を避けて進む。

シミュレーションを試行した結果、歩行者エージェントは図2.4 に示すように、二方向回避モデル、障害物回避モデルで見せた回避行動をとりながら、最終目的地に到達することが出来た。

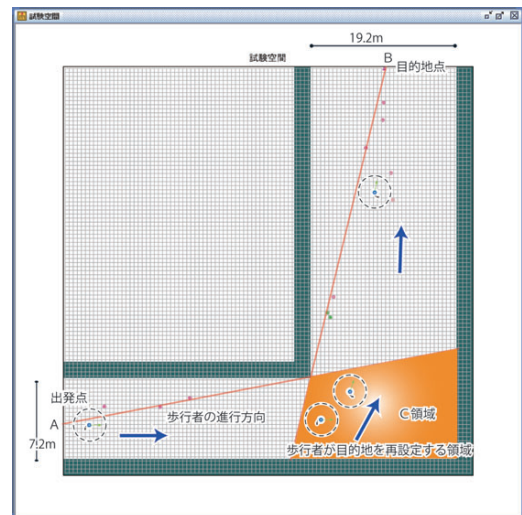


図2.4: 経路再設定モデルのシミュレーション事例

### II-2-4 考察

本節で挙げた3つの基本モデルは、いずれもセル空間モデルより滑らかな挙動を見せた。歩行者エージェントは、社会作用力や障害物回避力を受け、進行方向と速度が変化した後も、自動的に希望巡航速度に復帰し、進行方向も修正された。これは、歩行者推進力 (II.4) に組み込まれた、目標維持機能によるものだと考えられる。この項を操作することにより、本モデルは、L字型経路空間のような複雑さが加わる空間に対しても対応することができる。



## 第III章 集団行動のシミュレーション

式(II.1a)による集団凝集力が、集団全体の歩行速度と個人間距離にどのように影響を及ぼすかを調べるため、表5.2(b)に示すパラメータを用いて集団行動シミュレーションを行った。

### 集団凝集項の効果

集団凝集項を作用させたものと、そうでないものにつき歩行者集団を歩行させ、対向者回避をシミュレーションすると、集団凝集項が作用しない場合は、対向歩行者に分断された後、集団成員間の距離は離れてしまう(図3.1左)が、作用する場合その間の距離は、分断前の距離に戻る挙動を示す(図3.1中)。場合によっては集団でまとまり同方向に旋回して回避することが確かめられた(図3.1右)。

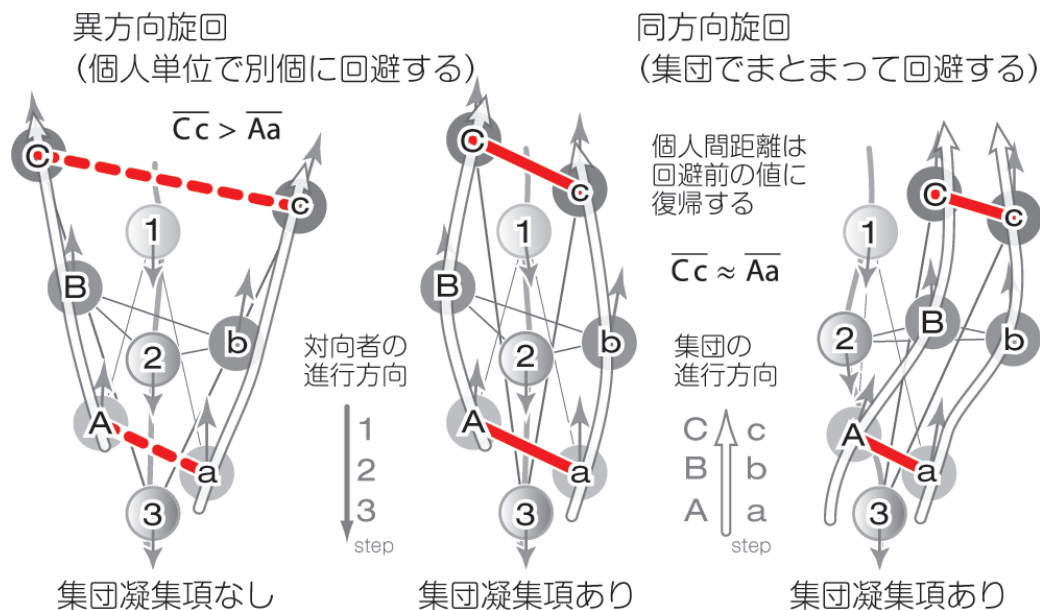


図3.1: 2人集団行動のシミュレーション事例

## 集団行動のシミュレーション分析

歩行者の歩行速度  $v_i^0$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) には個人差があり、正規分布 (平均速度  $1.52\text{ms}^{-1}$ 、標準偏差  $0.312\text{ms}^{-1}$ ) に従うことが知られている<sup>5)</sup>。それに従う巡航速度  $v_i^0$  を別個に与え、長さ 40m 通路を単独で 84 人を自由歩行させ速度を計測し、94 組と 104 組からなる 2 人と 3 人の集団を各同方向に歩行させ、それぞれの個人間距離と集団としての平均速度を計測した。

シミュレーション開始直後は値がばらつくが、ステップが進むと集団全体の平均速度は、安定したものとなる。各集団が通路を通り過ぎるまで、各ステップごとの値を計測し、その平均値、中央値、標準偏差を表 3.1 に示す。以上より、2 人より 3 人集団の方が個人間距離は大きくなり、Wills<sup>5)</sup> の測定値と同じ傾向を示した。平均速度に関しては集団規模に応じて増加してしまい、Wills らの計測値と逆の傾向を示した。RSU 方式は逐次処理を行うため、集団規模に応じて、先導者は後続者の接近による社会作用力が、後続者は先導者に集団凝集力が、より前方に進む力として働いたためと考えられる。

表 3.1: 集団における個人間距離と集団速度

集団規模		1 人	2 人	3 人
サンプル数		84(人)	94(組)	104(組)
個人間 距離 (m)	平均	—	0.583	0.797
	中央値	—	0.500	0.740
	標準偏差	—	0.224	0.179
	最大値	—	1.502	1.647
	最小値	—	0.275	0.605
速度 (m/s)	平均	1.544	1.762	2.018
	中央値	1.474	1.758	2.003
	標準偏差	0.425	0.280	0.361
	最大値	2.465	3.328	3.512
	最小値	0.694	0.546	0.673

## 第IV章 アーチング現象のシミュレーション

避難者がパニックに陥ったとき、避難行動自体に伴う危険が発生する恐れがあり、避難出口など避難経路の狭窄部分に、多数の避難者が殺到することにより、出口に堅く詰まった状態になって避難が阻害される現象はその代表的なものである<sup>4)</sup>。

その際に、出口には避難者による人間のアーチが形成されることが知られている。式 (II.1b) の対人接触時を示す事例として、避難事故の典型例の一つであるアーチング現象のシミュレーションを行う。

### IV-1 アーチング生成のシミュレーション試行

人が壁に囲まれた空間の中でパニックに陥り、誰もがその空間を脱出しようと試みたときに、この避難行動はしばしば大きな事故を誘発する。

アーチング生成プロセスの考察を行うため、表5.2(c) に示したパラメータを用い、6.0m 四方の正方形型の空間に 41 人のエージェントをランダムに配置し、右手中央の出口に一斉に避難を行わせるシミュレーションを試行する。

この時の歩行者希望巡航速度は  $5.1ms^{-1} = v_i^0(0)$  に設定したが、時刻  $t$  における歩行者の速度は、

$$v_i^0(t) = [1 - n_i(t)]v_i^0(0) + n_i(t)v_i^{max}$$

における  $n_i(t)$  の値により変化することを前提としている。 $v_i^{max}$  は人間の動くことが可能な最大速度であり、本試行では  $v_i^{max} = 10.0ms^{-1}$  とした。

$n_i(t)$  は通常状態では 0 に近い値をとり、エージェントは希望巡航速度で歩行しようとするのが普通であるが、本章では緊急時または混乱時を想定しているので、時刻  $t$  (パニック状態を脱出していない状態) におけるエージェントの速度は、通常状態より大きいと考えられる。

従って、シミュレーションにおいては、エージェントが出口から脱出していない限り、 $n_i(t) = 0.95$  と固定し、脱出後は  $n_i(t) = 0$  と一律に定めた。

得られた結果を図4.1 に示す。

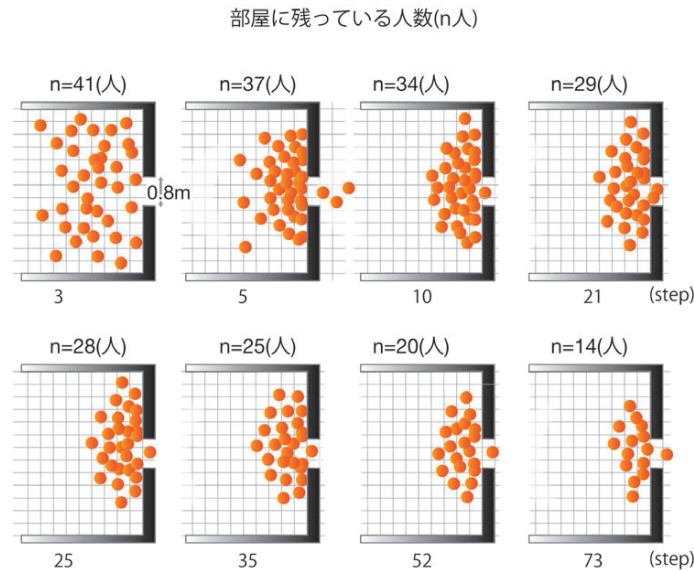


図4.1: シミュレーションによるアーチング生成までの過程

## 考察

本シミュレーションの典型的に結果によると、避難口に向かう避難者は、まず数名が渋滞に巻き込まれず脱出に成功し (図4.1 3-5step)、その後はアーチを作っては崩壊し、再び生成と崩壊を繰り返すことがわかる。

ただし、エージェントとエージェントが接近しすぎて、事故がすでに発生しているものと考えられる場面 (図4.1 10-35step) があり、現実の問題として、このようなケースでは負傷した人が他の歩行者にとっての新たな障害物となり、事故はさらに悲惨なものになると考えられる。

## IV-2 アーチング崩壊のシミュレーション試行

前節のアーチング生成過程に続き、式 (II.1b) の対人接触時を示す事例として、避難事故の典型例の一つであるアーチング崩壊プロセスのシミュレーションを行った。



崩壊時の極めて短時間に起きる力の変化を調べるため、集団行動の時よりも細かい差分単位を用い、各パラメータも補正したもの(表5.2(c))を用いて、41人のエージェントが6.0m四方の部屋から0.8m幅の出口を通り避難するシミュレーションを行った。

崩壊プロセスを視覚的に観察するとともに、そのアーチ端部のエージェントに1ステップ毎に作用する力も計測した。

アーチ崩壊時に端部では瞬間的に英国のフットボール場で起きた渋滞事故<sup>3)</sup>から推定された、幅1m当り4,450Nを超える値がかかることが確かめられた(図4.2)。これは、煉瓦壁を押し倒し、鉄製の柵を曲げた時の値である。

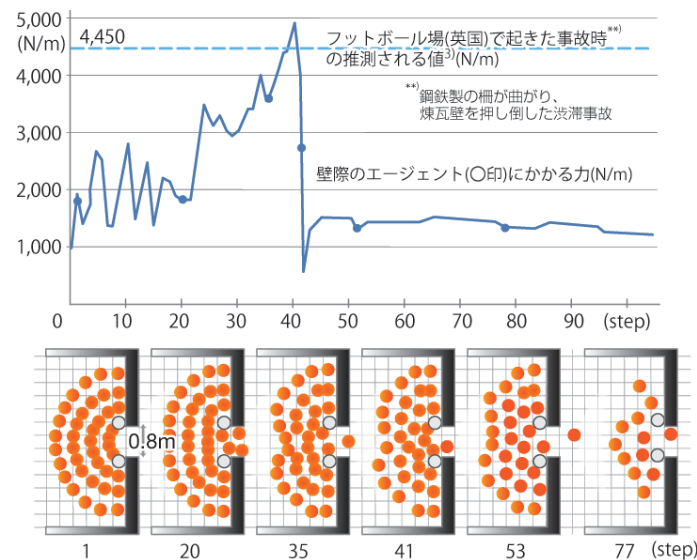


図4.2: アーチング崩壊のシミュレーションによる人間にかかる力の試算

## 考察

シミュレーションからアーチングの崩壊過程を観察すると、エージェントの幅1mあたりに大きな力が周期的にかかるかと推察できる。

当シミュレーション試行においても、瞬間的(図4.2 上段 39step 付近)に4,500Nを超える大きな力が加わり、その後は半分以下にまで下がる。半分以下に下がったとしても、依然1,500Nあたりの力がしばらく平均して加わるため、安全とは言えない状況が続く。

瞬間的に大きな力が加わった時は、最も安定したアーチが崩壊する瞬間(図4.2 下段 35step)であり、この瞬間が避難者にとって最も危険な状態だと考えられる。

## 第V章 結論

本研究では、Helbingらの歩行者動力学モデルの特徴を検討するとともに、差分近似によるエージェントシミュレーションを試行した。

集団行動のシミュレーションでは、集団凝集力の作用を再現するとともに、集団規模に対する個人間距離の傾向を再現することができた。集団平均速度の再現するには、さらに社会作用力と集団凝集力のバランスを調整する必要がある。

アーチング現象のシミュレーションでは、差分単位を小さく設定しアーチの形成から崩壊のプロセスを再現するとともに、崩壊時のアーチ両端の人にかかる力の大きさも微視的に計測することができた。このことにより、歩行者安全対策の動的解析を行うツールとしての可能性が示唆された。

本動力学モデルは、歩行者行動を微視的に再現できるという長所がある。一方、シミュレーション手段として、RSU方式では差分単位の設定に応じて、歩行者エージェントが過敏に反応するため、適切なパラメータ設定には困難を伴う。その克服が今後の課題である。

## 参考文献

- 1) Dirk Helbing, Péter Molnár, Illés J Farkas and Kai Bolay “Self-organizing pedestrian movement”, *Env. & Plan B*. 2001, vol.28, pp361-383 (2001)
- 2) Dirk Helbing, Illés J Farkas, Péter Molnár and Tamás Vicsek “Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations” *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (2002)
- 3) Dirk Helbing, Illés J Farkas and Tamás Vicsek “Simulating dynamical features of escape panic” *Nature* 407, pp487-490 (28 Sep 2000)
- 4) 日本建築学会 『建築物の火災安全設計指針』 pp96-99 (2002)
- 5) Wills, A “Human movement behaviour in urban spaces: implications for the design and modeling of effective pedestrian environment”, *Env & Plan B*, vol.31, pp805-828 (2004)
- 6) 日本建築学会 『建築設計資料集成』 pp49-50,53 (1993)

## 付録

本研究で用いたパラメータは以下の通りである。

表5.1: パラメータ

$1$ ( $\text{m}\cdot\text{cell}^{-1}$ )	0.4
差分単位 ( $\text{s}\cdot\text{step}^{-1}$ )	1/3
$m_i$ (kg)	60.0
$2r_i$ (m)	0.8
$v_i^0$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1.52
$\tau_i$ (s)	0.2
$A_i$ ( $\text{kg}\cdot\text{cell}\cdot\text{step}^{-2}$ )	15.5
$B_i$ (cell)	0.54
$C_i$ ( $\text{kg}\cdot\text{step}^{-2}$ )	103.0
$k$ ( $\text{kg}\cdot\text{step}^{-2}$ )	5.0
$\kappa$ ( $\text{kg}\cdot\text{cell}^{-1}\cdot\text{step}^{-1}$ )	5.0
$\lambda_i$	0.5

(a) 対象空間事例のパラメータ設定

$1$ ( $\text{m}\cdot\text{cell}^{-1}$ )	0.4
差分単位 ( $\text{s}\cdot\text{step}^{-1}$ )	1/3
$m_i$ (kg)	60.0
$2r_i$ (m)	0.8
$v_i^0$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1.2
$\tau_i$ (s)	0.2
$A_i$ ( $\text{kg}\cdot\text{cell}\cdot\text{step}^{-2}$ )	15.5
$B_i$ (cell)	0.54
$C_i$ ( $\text{kg}\cdot\text{step}^{-2}$ )	103.0
$k$ ( $\text{kg}\cdot\text{step}^{-2}$ )	5.0
$\kappa$ ( $\text{kg}\cdot\text{cell}^{-1}\cdot\text{step}^{-1}$ )	5.0
$\lambda_i$	0.5

(b) 集団行動シミュレーションのパラメータ設定

$1$ ( $\text{m}\cdot\text{cell}^{-1}$ )	0.4
差分単位 ( $\text{s}\cdot\text{step}^{-1}$ )	1/100
$m_i$ (kg)	60.0
$2r_i$ (m)	0.4
$v_i^0$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	5.1
$\tau_i$ (s)	1.1
$A_i$ ( $\text{kg}\cdot\text{cell}\cdot\text{step}^{-2}$ )	50.0
$B_i$ (cell)	1.23
$C_i$ ( $\text{kg}\cdot\text{step}^{-2}$ )	50.0
$k$ ( $\text{kg}\cdot\text{step}^{-2}$ )	55.6
$\kappa$ ( $\text{kg}\cdot\text{cell}^{-1}\cdot\text{step}^{-1}$ )	150.5
$\lambda_i$	0.6

(c) アーチングシミュレーションのパラメータ設定