

2001年度学士論文  
歩行速度・密度・交通流量間関係式の評価  
—シミュレーションによる検討—

東京工業大学  
理学部 情報科学科  
指導教官 高橋幸雄教授  
98-0581-1 岡田 公孝

2002年2月

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>歩行観測とその様子</b>	<b>4</b>
2.1	観測場所	4
2.2	歩行挙動	5
2.2.1	マクロ的歩行挙動	5
2.2.2	ミクロ的歩行挙動	6
<b>3</b>	<b>和田モデルとアルゴリズム</b>	<b>7</b>
3.1	和田モデル	7
3.2	歩行経路選択アルゴリズム	7
<b>4</b>	<b>和田モデルの改善</b>	<b>8</b>
4.1	割り込み歩行と B.C.S.	8
4.1.1	割り込み歩行	8
4.1.2	B.C.S. の導入とその発生条件	9
4.1.3	B.C.S. を求めるアルゴリズム	11
4.2	情報空間・視野	12
4.3	歩行可能速度ベクトル領域	13
4.4	その他	14
<b>5</b>	<b>歩行速度・密度・交通流量間関係式</b>	<b>16</b>
5.1	歩行速度・密度間関係式	16
5.2	交通流量・密度間関係式	16
5.3	先行研究における関係式	17
<b>6</b>	<b>シミュレーション</b>	<b>18</b>
6.1	可変パラメータとデータ	18
6.2	歩行流の特性量の計算方法	19
6.2.1	歩行速度	19
6.2.2	密度	20
6.2.3	交通流量・交通流率	20
<b>7</b>	<b>実験結果</b>	<b>21</b>
7.1	予想	21
7.2	結果・考察	21
7.3	まとめ	26
<b>8</b>	<b>今後の課題</b>	<b>28</b>
8.1	高密度下での歩行流の表現	28
8.2	B.C.S. の再導入	28
8.3	グループ歩行の表現	28
8.4	方向性の拡張	29
8.5	その他	29
<b>9</b>	<b>おわりに</b>	<b>31</b>

<b>A</b>	<b>和田モデル</b>	<b>33</b>
A.1	人体円 . . . . .	33
A.2	歩行速度 . . . . .	33
A.3	目的地と自由歩行 . . . . .	33
A.4	パーソナル・スペース . . . . .	34
<b>B</b>	<b>最適速度ベクトルの決定と歩行</b>	<b>35</b>
B.1	情報空間と視野 . . . . .	35
B.2	衝突領域 . . . . .	35
B.3	歩行可能速度ベクトル領域 . . . . .	37
B.4	最適速度ベクトル . . . . .	37

## 1 はじめに

我々が生活する上で最も基本的な交通手段の1つとして、歩行が挙げられる。歩行に関する研究は以前から行なわれてきているが、その多くは1人1人の歩行者の個人情報を見ないマクロ的な視点から歩行挙動を観察している。例えば歩行領域をメッシュ状に分割したり、歩行空間をネットワークとして捉えたりしたものが多い。そのため歩行者同士の衝突や回避等のミクロ的な視点から見た挙動についてはあまり考慮されてこなかった。

一方、[14]では歩行者同士の衝突や回避等に注目し、歩行挙動モデルをミクロの視点から考えている。つまり各時刻において周囲の歩行者の歩行経路を予測することで接触を避けるとともに、歩行のしやすさの目安として与えたポテンシャルを最大とするような速度ベクトルを選択する。この決定を微小時間毎に行ないながら少しずつ歩を進めることによって、「歩行」という挙動を得る。以降ではこのモデルを和田モデルと呼ぶことにするが、和田モデルではモデルの単純化という1つの目標から、歩行者の個人情報を表すパラメータ数を最小限に抑えている。それにも関わらず、シミュレーションでは追従や回避等の行動パターンであるミクロ現象が表現されている。また隊列化に代表される歩行流の変化といったマクロ現象までも表現することに成功している。このことからマクロ現象はミクロ現象の積み重ねとして引き起こされることが予想される。

歩行者は周囲に人が少ない状況の下では自分の意思に則した歩行速度で歩行することができるが、混雑している場所では思うような歩行速度を選択することができず、流れに身を委ねるばかりである。つまり歩行速度は歩行空間の混雑度に依存することがわかる。このことは日常生活を考えてみれば、誰しもが納得することだろう。[4]などの多くの文献では、混雑度を単位面積あたりの歩行者人数で表される密度と考えることで、歩行速度と密度との間に密接な関係があることが実際の観測データを用いた結果として確認され、その関係は直線的で負の相関が大きいということが示されている。さらに単位時間にある幅員をもつ通路を通過した歩行者数を示す交通流量が、歩行速度と密度の積にさらに幅員の長さを掛けたものとして表現されることも記されており、交通流量と密度との間にも深い関係があると言える。

本研究では歩行流を表す上で最も重要な要素である歩行速度・密度・交通流量間の関係式を、ミクロの視点から歩行挙動を捉えている和田モデルにいくつかの改良を加えた歩行挙動モデルによって評価することを目標としている。これら3つの量を歩行流の特性量とし、シミュレーション実験により歩行速度・密度・交通流量のデータを採取し、これを基に既存の研究において提言されてきたそれらの関係式の評価を行なった。その結果、定性的には既存の研究で提言されてきたような関係式が得られ、それらは高い相関を示した。しかし定量的に見ると、かなり誤差が見られ、現実的に考えても合致しない部分が存在する。これは高密度下での歩行流の様子が表現しきれないというモデルの性質が大きく影響している。高密度下での歩行流の表現を可能とすることが今後の大きな課題となり、新たなパラメータなどを導入する必要があると考えられる。

本論文の構成は次の通りである。まず2節で現実での歩行の様子をマクロ・ミクロの両方の視点から述べる。3節では和田モデルの概要を、4節では和田モデルの問題点を指摘し、本研究における改善点を述べる。また5節では既存の研究によって示された実測値に基づく歩行速度・密度・交通流量間の関係について述べるとともに、いくつかの研究結果の紹介をする。さらに6節でシミュレーション実験によるデータの採取方法を説明し、7節で実験結果とそれに対する考察について、8節で今後の課題について述べる。最後に付録としてA・Bで和田モデルの詳細を載せる。

## 2 歩行観測とその様子

### 2.1 観測場所

[13]では、渋谷駅ハチ公口前のスクランブル交差点(以下、渋谷駅前交差点と呼ぶ)における歩行の様子をビデオカメラで撮影し、観察している。渋谷駅前交差点の概観を図1に示す。

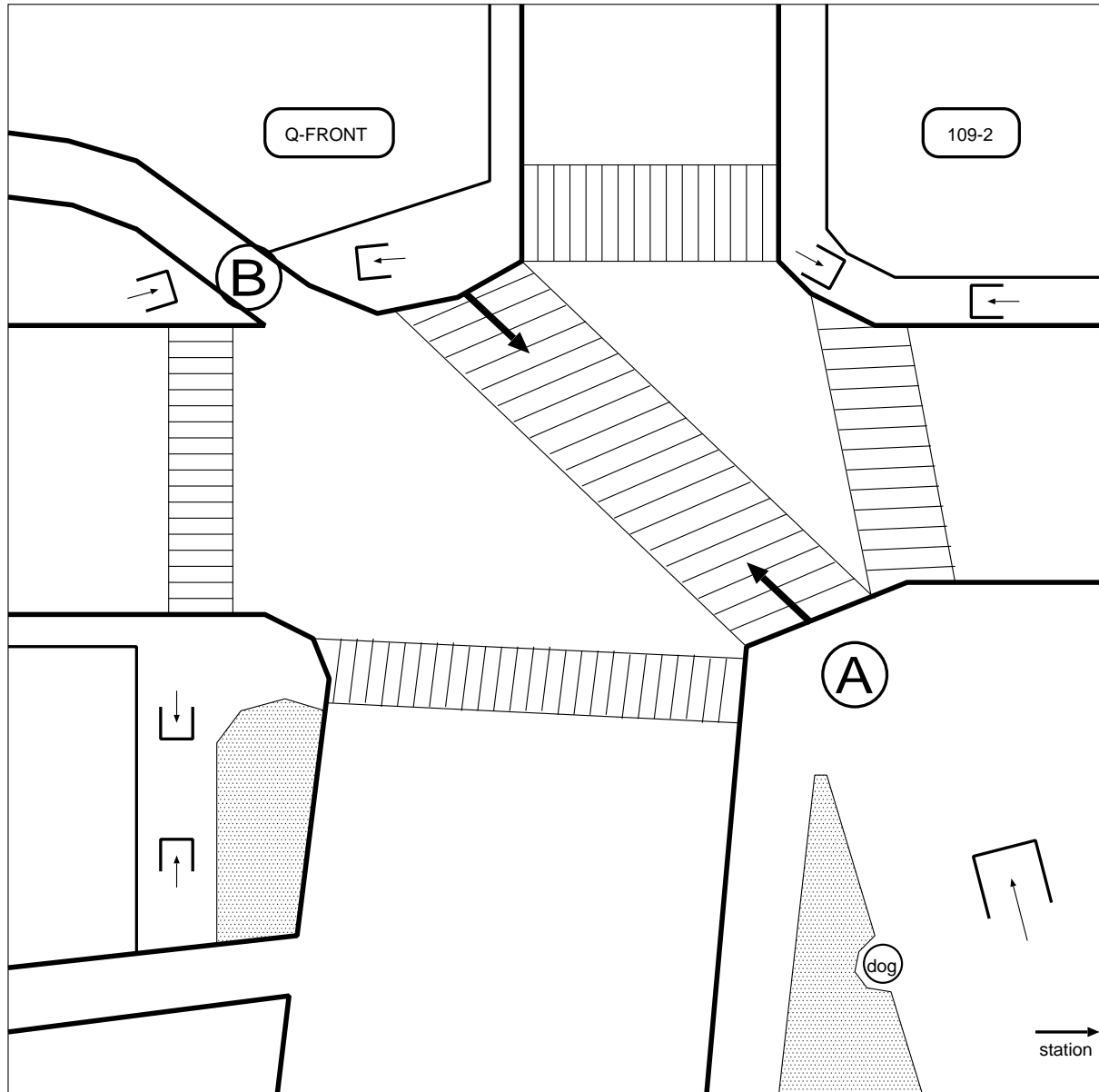


図 1: 渋谷駅前交差点の概観

渋谷駅前交差点はハチ公前広場 A・センター街 B の間を横断する人の数が圧倒的に多い。[13]によると、1998年6月30日(火)13:44:56~14:12:57と1998年9月13日(日)15:26:49~15:47:54の平均到着率は表1のようになる。ここでの平均到着率とは単位時間あたりに交差点に到着する歩行者数を表し、ある信号のサイクル中の交差点横断者数をサイクル長で割ったものとして計算し、その平均をとっている。ただし、「その他」はハチ公前広場・センター街間を横断する人以外の歩行者の平均到着率であり、これは全体の1割にも満たない。

表 1: 渋谷駅前交差点の平均到着率 [人/s]

観測日	ハチ セ街	セ街 ハチ	その他
'98.6.30(Tue.)	1.10	0.69	0.13
'98.9.13(Sun.)	2.08	1.42	0.08

ハチ:ハチ公前広場、セ街:センター街

## 2.2 歩行挙動

渋谷駅前交差点は駅からかなり近いこともあって常に人が絶えないが、それ以上にいろいろなタイプの歩行者がいることに気付く。1人で走のように急いで渡る人、カップルでくっつきながら渡る人、買物袋を抱えて渡る人、携帯電話で話しながら渡る人、グループで横に並びながら渡る人など、その様子はさまざまである。しかし一見1人1人がバラバラに歩いているように思えるが、全体としてはまとまって歩いていることがわかる。また各歩行者は一定の歩行速度で歩行すると思いきや、むしろその方が希で、加速・減速を繰り返しながら歩いている人が多い。

以下に挙げるようなマクロ・ミクロの両方の視点から見られる歩行挙動は一般的な交差点で観察されている。

### 2.2.1 マクロ的歩行挙動

交差点での歩行挙動をマクロ的な視点で見ると、図2のような歩行流を形成していることがわかる。特に図2(4)のような隊列化現象は典型的なマクロ的歩行挙動であり、歩行者は自分より前を歩行する歩行者に追従する様子がよく見られる。

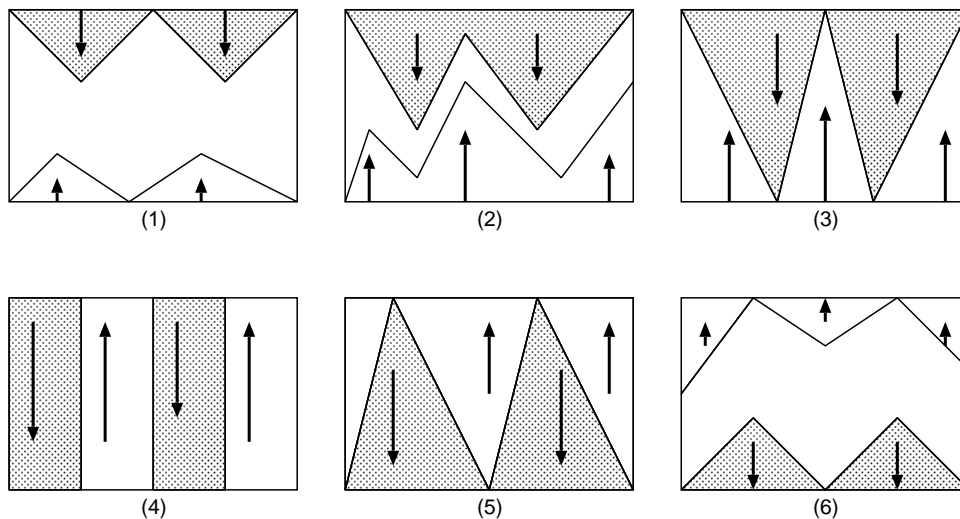


図 2: 歩行流の変化

図2は交差点における信号のサイクル間での歩行流の変化を表し、それは次のような流れで説明できる。

- (1) 信号が青になると一斉に歩行を開始し、歩行速度の大きい人たちに追従する形で三角形の流れが双方向にできる
- (2) 各方向の先頭の歩行者は互いに回避し合う

- (3) 回避した経路を後続の歩行者が追従するために流れが交互にできる
- (4) 流れに沿って徐々に隊列化し、しばらくこの状態が続く
- (5) 信号が点滅したすと先頭集団は広がり、後方からの歩行者が少なくなるので、青信号になったときと逆の三角形ができる
- (6) 赤信号になると後方からの歩行者はいなくなり、やがて全ての歩行者が横断を終える

### 2.2.2 ミクロ的歩行挙動

逆にミクロ的な視点、つまり個々の歩行者レベルで交差点での歩行挙動を見てみると、歩行経路・歩行速度について以下のような特徴が挙げられる。

- 各歩行者は目的地に向かって一直線に歩行するわけではなく、頻繁に経路変更を繰り返す
- 歩行流が隊列化してくると、後方の歩行者は前方の歩行者に追従する
- 加速・減速や経路変更を駆使しながら他の歩行者を回避したり、追い越したりする
- 回避や追い越しをするため、頻繁に歩行速度を変化させる
- 混雑しているときは、しばしば目的地に行くことよりも横断することを優先させる

### 3 和田モデルとアルゴリズム

[14]で採用されている歩行挙動モデルを、ここでは和田モデルと呼ぶことにし、歩行経路選択アルゴリズムについて簡単に説明する。詳細については付録で述べることにする。

#### 3.1 和田モデル

和田モデルでは歩行者を円で表し、各歩行者は線分で与えられた目的地を目指して歩行する。少ないパラメータでミクロ、およびマクロでの歩行挙動を表現することが和田モデルの目標であり、以下の8つのパラメータで歩行者を特徴付けている。

- 位置  $(x, y)$
- 速度ベクトル  $(u, v)$
- 人体円半径  $r$
- 標準歩行速度  $V_s$
- 最大速度比  $k$
- パーソナル・スペース比  $c$
- 情報空間の1辺の長さ  $d (= \tau V_s, \tau$ は定数)
- 目的地の端点  $(p_x, p_y) - (q_x, q_y)$

これらのうち時刻とともに変化するパラメータは位置と速度ベクトルである。また人体円半径や標準歩行速度、発生位置、目的地に関しては乱数を用いて与えている。

#### 3.2 歩行経路選択アルゴリズム

これら8つのパラメータを持つ歩行者は各シミュレーションクロック毎に周囲の状況を判断し、速度を決定する。周囲の状況を判断することをサーチと呼び、サーチから歩行経路選択までの概略を以下に示す。

1. 歩行空間内にいる歩行者に対して情報空間に入るかを判定する
2. 情報空間に入る歩行者に対して視野に入るかを判定する
3. 視野に入る歩行者に対して衝突領域を求める
4. サーチした歩行者に対して求めた衝突領域を重ね合わせることで合成し、非衝突領域内での最適速度ベクトルを求める

歩行空間内の全歩行者がサーチを終了すると、求めた速度ベクトルでシミュレーションクロックである  $\Delta t$  だけ歩行する。これを繰り返すことで、一連の歩行挙動が得られる。

## 4 和田モデルの改善

本研究を行なうにあたり和田モデルを基にモデル化を行なったが、和田モデルが十分現実世界における歩行流の様子を表現し切れているかと問われれば疑問が残る。そこで本研究では B.C.S. の導入・視野の撤廃・速度に依存した歩行可能速度ベクトル領域の導入という 3 つの改善について検討を行なった。

### 4.1 割り込み歩行と B.C.S.

#### 4.1.1 割り込み歩行

図 3 のように、非常に近い位置で同方向に向かって歩行している 2 人の歩行者  $j, k$  の間を歩行者  $i$  がすり抜けるという現象を、ここでは割り込み歩行と呼ぶ。わざわざ 2 人の間を引き裂いて歩行することが非常に不自然であるため、割り込み歩行は現実的には非常に起こりにくい現象である。実際には歩行者  $i$  は  $j, k$  の間ではなく、どちらかの脇を迂回するような歩行経路を選択するものと考えられる。しかし [14] におけるシミュレーションではこの現象を表現するには至っておらず、今後の課題として挙げられていた。

そこで本研究では、B.C.S. という概念を導入することで割り込み歩行の防止を試みた。B.C.S. とはある隙間を埋め立てた衝突領域 (Buried Collision Space) のことであり、特定の条件の下で 2 つの衝突領域の隙間に発生する。この導入により密度がかなり小さいときには歩行流の隊列化というマクロ現象における特徴の 1 つを、より鮮明に再現することに成功した。しかし高密度下では、歩行者の歩行可能速度ベクトル領域が衝突領域内に入ってしまうことから歩行者が立ち止まり、停滞してしまうという現象が起こってしまう。よって歩行速度・密度・交通流量間関係式の評価という本研究の目的にそぐわないため、今回は B.C.S. を導入することは断念した。高密度な場合についてはモデルの見直しが必要となり、今後の課題の 1 つとし、将来的には周辺密度によって B.C.S. の適用を各歩行者が判断するようなモデル化を目指す必要があると考えている。本モデルでは採用しなかったが、検討してきた B.C.S. について以下で説明しておく。

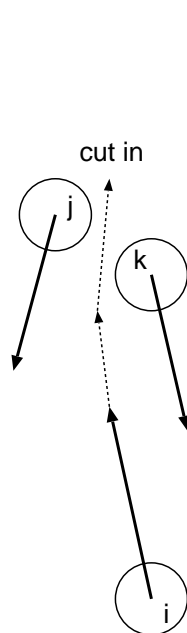


図 3: 割り込み歩行

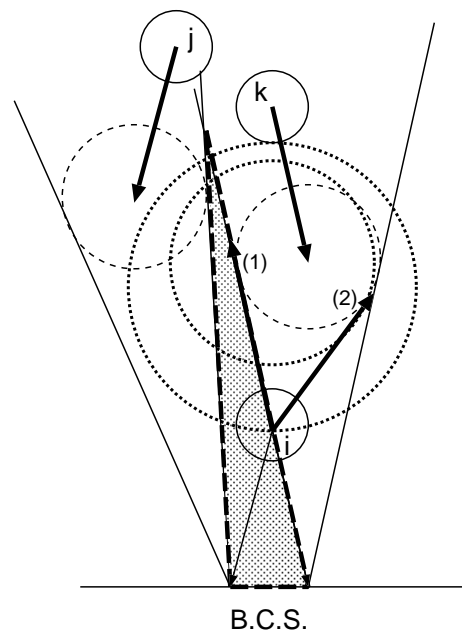


図 4: B.C.S. の導入による経路

#### 4.1.2 B.C.S. の導入とその発生条件

割り込み歩行が生じる図3のような状況で、 $j, k$  の衝突領域の隙間の内部をも衝突領域とすることで、割り込み歩行をせず、2人の歩行者の外側を迂回するような歩行経路を選択するようである。この新たな衝突領域のことをB.C.S.(Buried Collision Space)と呼ぶ。図4を例とすると、従来は(1)の経路を最適速度ベクトルとしてとっていたが、B.C.S.の導入によってそれが衝突領域に入ってしまうため、結果的に(2)の経路を選択する。なお衝突領域の2本の境界の交点を支点と呼ぶが、B.C.S.は2つの支点を結ぶ直線以外の境界上は衝突領域としている。

本来B.C.S.の形状は図5のようにさまざまなものが考えられるが、本研究では計算の複雑化を避けるために(1)の形状を採用している。なお2つの支点を結ぶ直線とポテンシャル円との接点最適速度ベクトルになる場合もあるが、割り込み歩行を防止するというB.C.S.の導入の意図とは反するため考慮しないこととした。

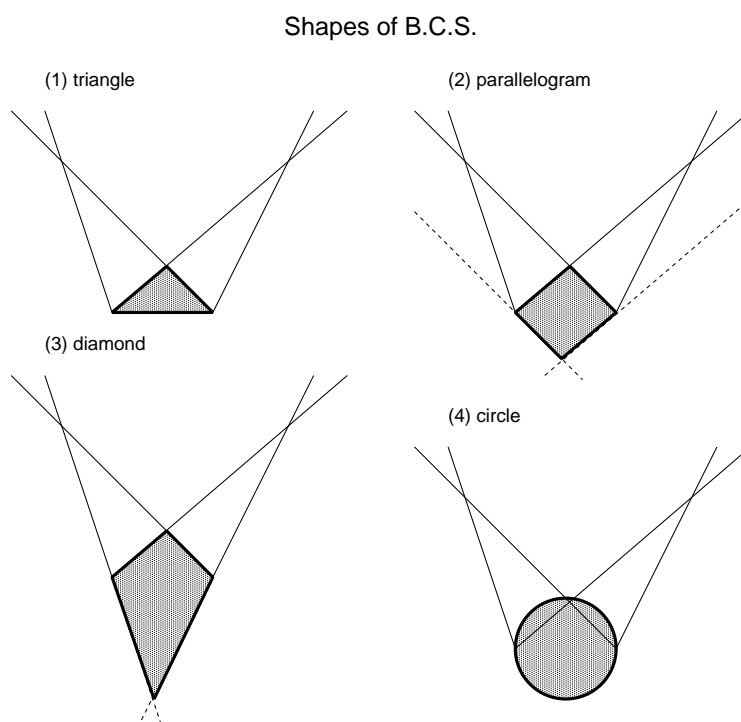


図 5: いろいろな B.C.S. の形状

B.C.S. はいつでも発生するものではなく、以下の条件が全て満たされるときのみ発生するものとした。

- 歩行者  $j, k$  の進行方向が同じとき
- $j, k$  の距離が一定距離未満のとき
- 一方の支点が他方の衝突領域 (境界含む) 外にあるとき
- 衝突領域の交点が実軸上に存在するとき

最初の2つの条件は割り込み歩行の定義から必要となるものである。特に2つ目の条件の一定距離とは、図6のように  $i$  が  $j$  と  $k$  の間を余裕を持って通過できるほどの距離と定めた。具体的には  $dist$  を  $j, k$  の距離、 $r_i, r_j, r_k$  をそれぞれ  $i, j, k$  の人体円半径とすると、

$$dist < 2a_1r_i + a_2(r_j + r_k) \quad (1)$$

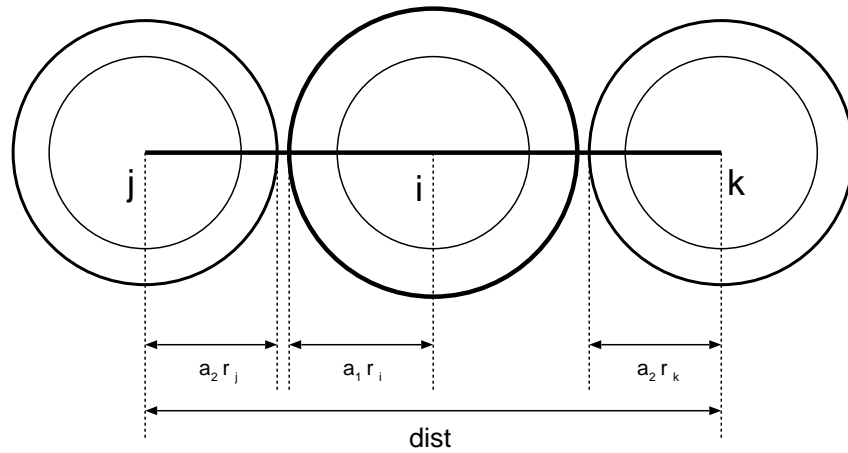


図 6: 歩行者  $j, k$  の距離と余裕係数

のときとする。ここで  $a_1, a_2 (\geq 1)$  をそれぞれ基準余裕係数・対称余裕係数と呼び、歩行者の大きさを人体円に対して大きな同心円で考えている。つまり図 6 のように歩行者  $i$  が  $j, k$  の間を余裕をもってすり抜けることができる場合は、B.C.S. を考慮する必要がないことになる。なお、基準余裕係数・対象余裕係数を合わせて単に余裕係数と呼ぶ。

3つ目の条件に関しては、一方の支点がもう一方の衝突領域内に存在した場合、考慮すべき B.C.S. が既に衝突領域内となっているためにこの条件を除いている。無駄な計算を省略するためであって、モデル自体に影響を及ぼすものではない。

最後に 4つ目の条件である。図 7 を例とすると (1)~(4) では B.C.S. が発生するが、(5) では B.C.S. は発生しないということになる。この理由として、(5) のような状況では将来的に歩行者  $j, k$  が離れていくことになるため、 $i$  がその間を通ることも将来的には可能となると考えたからである。

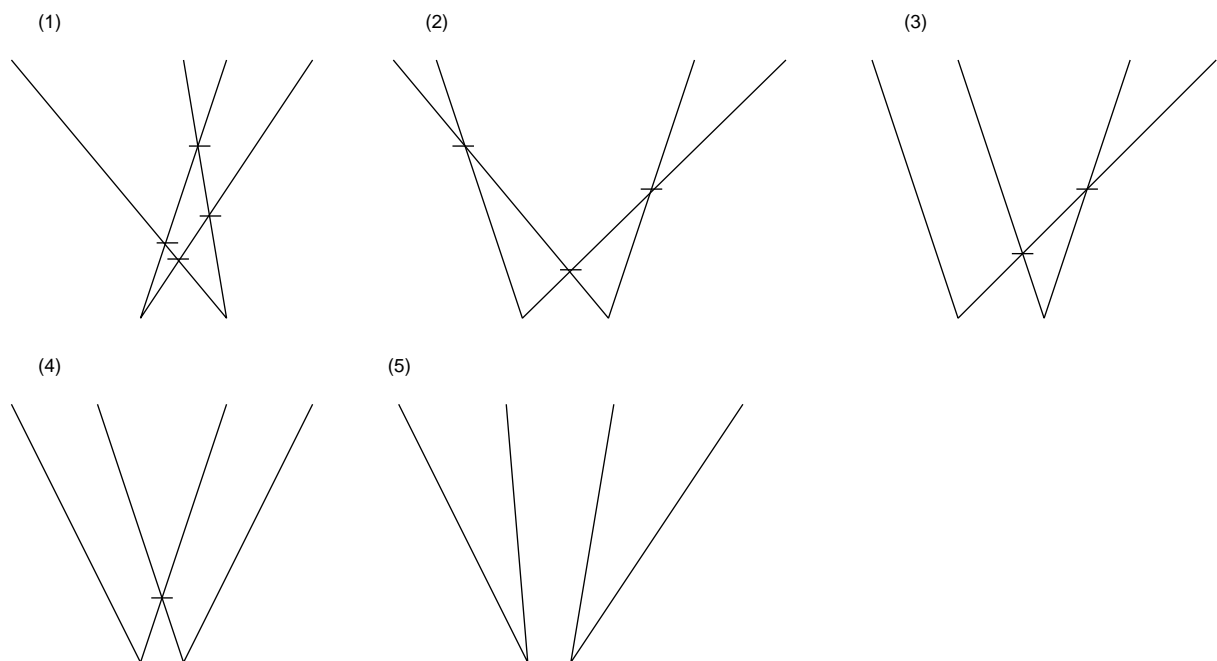


図 7: 衝突領域の交点

### 4.1.3 B.C.S. を求めるアルゴリズム

B.C.S. は既に述べた発生条件の下で、図8のように求めることができる。

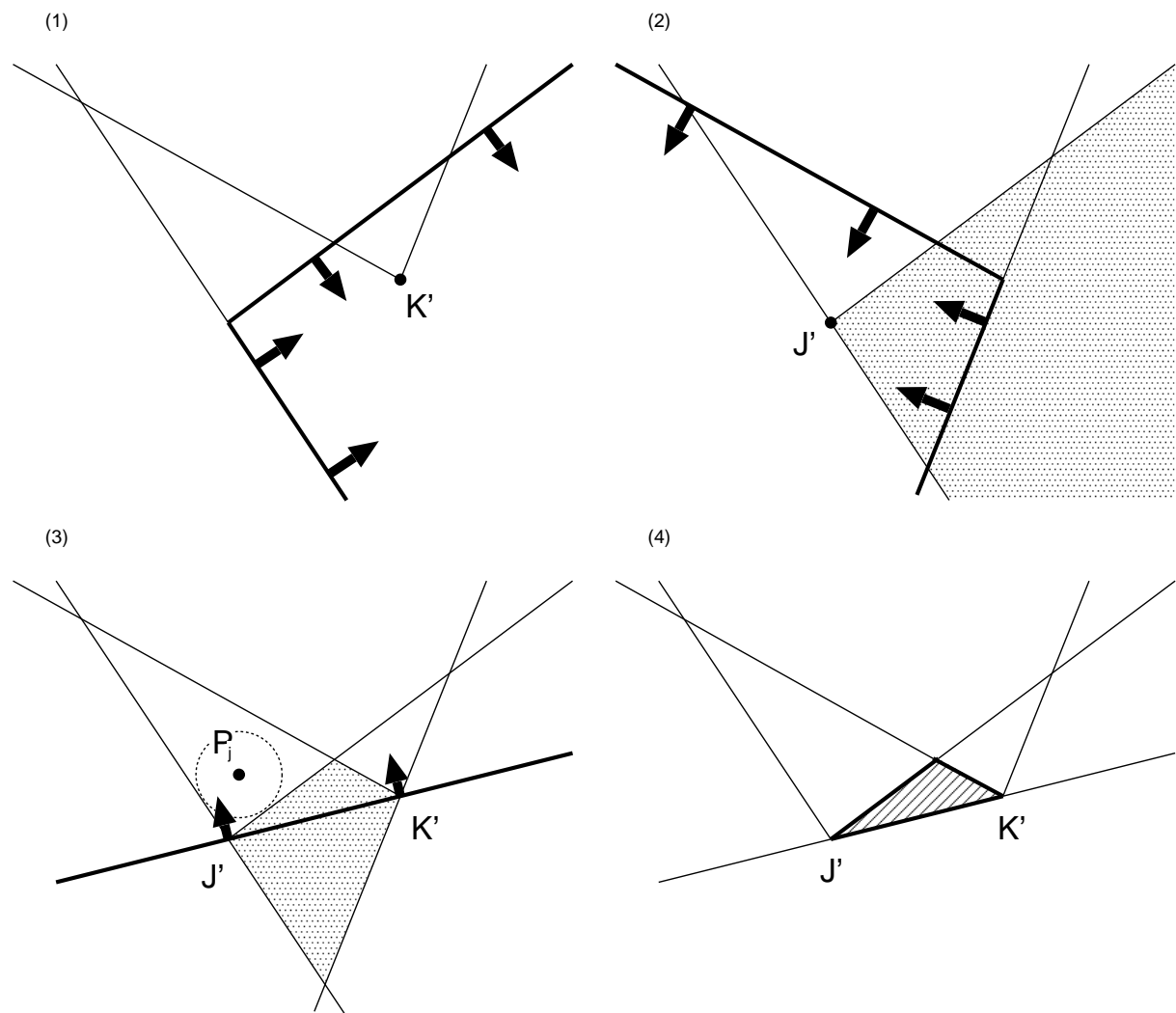


図 8: B.C.S. の求め方

- (1)  $j$  に対する衝突領域の境界に関して  $K'$  が存在する領域内に制限
- (2)  $k$  に対する衝突領域の境界に関して  $J'$  が存在する領域内に制限
- (3) 2つの支点を通る直線に関して  $P_j$  が存在する領域内に制限
- (4) 図8(4)の斜線部を得る (境界は線分  $J'K'$  のみ含まない)

なお、 $J', K'$  はそれぞれ歩行者  $j, k$  に対する衝突領域の支点であり、 $P_j$  は  $i$  に対する  $j$  の相対位置から  $j$  の速度ベクトルで単位時間移動させた点である。

このようにして作られた B.C.S. を含めた衝突領域を重ね合わせることで合成し、非衝突領域内で最大ポテンシャルとなるような速度ベクトルを選択する。求めた最適速度ベクトルでシミュレーションクロックだけ歩行し、それを繰り返すことで一連の歩行挙動を得る。

## 4.2 情報空間・視野

和田モデルでは各歩行者は情報空間を用いて認識する歩行者を制限している。そして視野という概念を用いることでさらに認識する歩行者を制限している。この理由として、混雑した状況では計算量が非常に膨大となってしまう、計算時間を短縮するという目的からこのような措置が取られたものと考えられる。しかしここ数年での計算機の発達には著しいものがあり、視野の概念を撤廃したとしても計算時間は実行可能な範囲に収まることが確認された。現実的にもある歩行者の陰に一部だけ隠れた歩行者を認識しないことは不自然であり、それ相当の影響を与えるはずである。

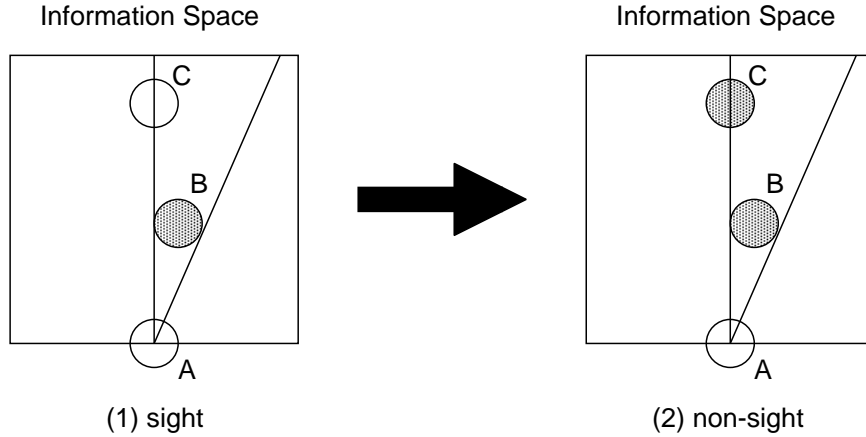


図 9: 視野の撤廃

図 9 を例にとると、視野を考えた (1) では歩行者 C は A から認識されない。逆に視野を撤廃した (2) では歩行者 A は B・C とともに認識できるようになる。本研究では視野の概念を撤廃してモデル化を行なった。

しかしこれだけでは混雑状態でも遠くの歩行者を認識してしまうことになり、衝突領域が拡大されて、歩行がかなり制限されてしまう。そこで情報空間の 1 辺の長さを速度に依存するように定めた。これまでは情報空間の 1 辺の長さを  $d$  と表すと、

$$d = \tau V_s \quad (2)$$

のように定めた。ここで  $\tau$  はサーチ距離係数、 $V_s$  は標準歩行速度である。しかし本モデルでは速度が小さいときには情報空間の大きさも小さくとり、中に入る歩行者を制限している。実際には速度ベクトルを  $(u, v)$  とすると、速度は

$$V_p = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3)$$

となり、

$$V_r = \begin{cases} 1 & V_p \geq V_s \\ V_p/V_s & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

と定めると、情報空間の 1 辺の長さは

$$d = f(\tau)V_r + 4cr_i \quad (5)$$

と表すことにした。ここで  $f(\tau)$  はサーチ距離係数に対する増加関数、 $cr_i$  は歩行者  $i$  のパーソナル・スペース円の半径である。本研究では試行錯誤の結果、

$$f(\tau) = 2\tau - 3 \quad (6)$$

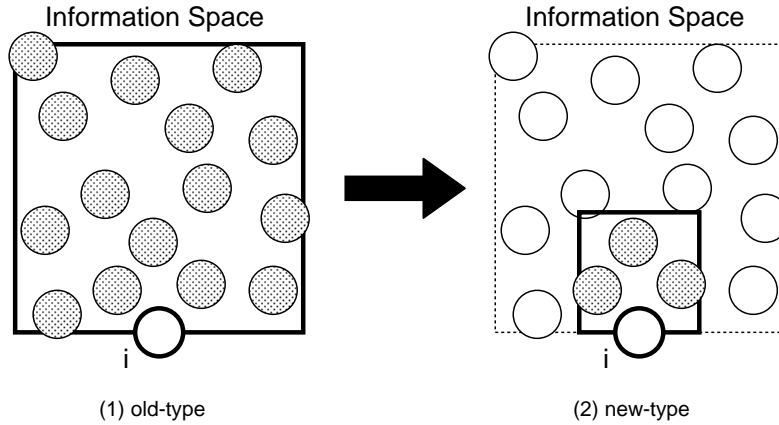


図 10: 混雑時の情報空間

とした。このように定めた情報空間は、混雑時は図 10 のようになりかなり小さくなる。特に速度が 0 になったときはかなり小さくなるため、歩行者  $i$  のごく近辺にいる歩行者しか認識していない。この改良により、混雑状態でもある程度は歩行者が流れるようになった。しかし依然として、情報空間内の歩行者から受ける影響力は変わらないものとしている。このこともまた不自然であり、距離や可視部分の割合などにも影響すると考えられ、このモデルでの改良は限界があるように思える。これらを考慮したモデル化は今後の課題としたい。

#### 4.3 歩行可能速度ベクトル領域

混雑した状況下では歩行可能速度ベクトル領域の大部分が衝突領域内に入り、歩行がかなり制限される。和田モデルでは歩行可能速度ベクトル領域が全て衝突領域内に入ってしまった場合、歩行はせず、その場での待機が選択される。この仕組みが和田モデルの 1 つの弱点となっている。というのも、高密度下では多くの歩行者が待機の選択を強いられるので、歩行が停滞してしまうことが多い。前方で歩行が停滞していると、そこに次々と歩行者がやってくるため、停滞している集団が膨れ上がり、次第に閉塞状態となる。しかし現実的には長時間停止することはなく、多少の遠回りは覚悟してでも低密度な場所へ回り込んだり、強引に人の間を切り割いたりするはずである。そのことを実現するためには新たなパラメータが必要になり、混雑度によってパーソナル・スペースの形状や大きさを変えざるを得ないだろう。

しかしモデルの単純化という目標から新たなパラメータの導入はひとまず見送り、本研究では歩行可能速度ベクトル領域に着目することにした。混雑度は歩行速度に影響を及ぼすことから、速度が小さい場合は混雑していて、非衝突領域内の歩行可能速度ベクトル領域がほとんど存在しないと考える。そこで速度によって歩行可能速度ベクトル領域の位置を進行方向とは逆向きに少しずつずらす。これにより横や後方への動きも可能とした。既に定義した  $V_r$  を用いると、パラメータ  $s$  のポテンシャル円の中心  $(u_s, v_s)$  は、

$$u_s = u_{opti} \frac{V_r + 1}{2} s \quad (7)$$

$$v_s = v_{opti} \frac{V_r + 1}{2} s \quad (8)$$

となる。ここで  $(u_{opti}, v_{opti})$  は標準歩行速度ベクトルを表し、

$$u_{opti}^2 + v_{opti}^2 = V_s \quad (9)$$

を満たす。また半径については和田モデルと同様に求められ、速度には依存しない。歩行可能速度ベクトル領域は、 $s = k/2$  のときにおけるポテンシャル円の境界を含む内部と言い換えることができる。

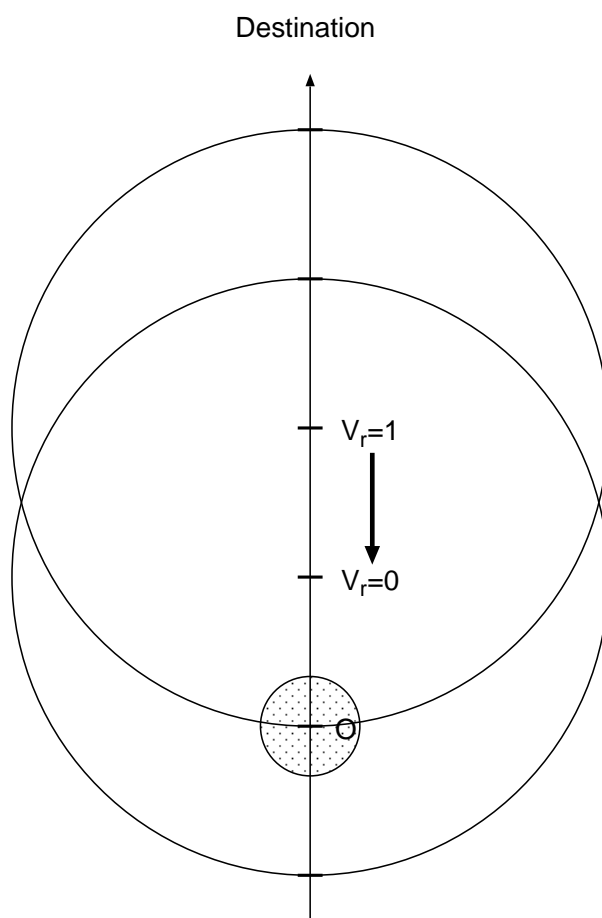


図 11: 速度に依存した歩行可能速度ベクトル領域

図 11 は  $V_r = 0, 1$  のときの歩行可能速度ベクトル領域を表している。 $V_r = 1$  のときは和田モデルにおける歩行可能速度ベクトル領域と一致している。しかし  $V_r$  が小さくなるにつれて、目的地に対して後方に歩行可能速度ベクトル領域をとる。そして  $V_r = 0$  のときは、中心が現地点  $O$  と  $V_r = 1$  のときの中心との中点になっている。つまり横や後方に向かって歩行することも可能となる。この理由として、混雑時は自分の思うような速度での歩行が不可能なことが多く、後方から回り込むなどしながら歩行可能な領域を見つけようとするからである。これにより混雑した状況下では多少の改善が見られたが、それでも 1 度待機を選択してしまうと連鎖反応が続き、対向する歩行者同士が壁を作り合っ閉塞状態になるといった悪循環が続いてしまう。よって高密度下での改善は依然重要となってくる。

#### 4.4 その他

本研究では歩行速度・密度・交通流量間の関係に注目し、和田モデルを用いた評価を行なった。基本的には [14] で用いられているシミュレータを基にしているが、これは渋谷駅前交差点という、ある意味で非常に特殊な歩行流の様子を再現するために作られたものである。よって渋谷駅前交差点における歩行流の特性を無視するために、次に述べるような変更を加えた。

- 信号による影響の無視
- 電車による影響の無視
- 4方向 ⇒ 2方向

まずは信号によって歩行が中断してしまうと歩行流の特性量間における関係式についての評価が困難になるため、信号による影響は無視する。よって歩行者が途切れることなく、絶えず行き来している状況を作り出している。また駅前の交差点ということで本来の渋谷駅前交差点を考える場合においては、電車の到着による影響は無視することができない。そこで [14] では到着率が周期的に変化するポアソン過程を用いている。しかし本研究では電車の到着による影響は無視し、到着は到着率の周期性を考えずに到着率が一定のポアソン過程に従うものとしている。さらに [14] では4方向のモデルを考えており、より複雑な歩行流の様子を表現している。しかし本研究では既存の研究と同様の条件を作り出すことから、そのうちメインの2方向に限定する。4方向のシミュレーションについては今後の課題とし、そのときの歩行速度・密度・交通流量間関係式を導くことも視野に入れている。

## 5 歩行速度・密度・交通流量間関係式

歩行挙動をモデル化し、解析するという研究は以前から行なわれてきている。そして歩行流における主な特性量として歩行速度がよく取り上げられるが、既存の研究により混雑度を表す密度と非常に密接な関係があり、直線的で負の相関が大きいことが知られている。また密度は交通流量にも変化を及ぼすとされ、交通流量は密度の2乗に比例することが知られている。そこで本研究ではそれらの関係式を和田モデルに基づいた歩行挙動モデルによって評価してみる。

### 5.1 歩行速度・密度間関係式

上で述べたように、先行研究では歩行の速さを表す歩行速度と混雑度には密接な関係があることが記されている。日常生活を考えても混雑しているところでは思うような速度で歩行することは困難であるが、誰もいないようなところでは自分のペースでの歩行が可能である。このことから、混雑度が増すごとに歩行速度が小さくなることがわかる。これを表現するために混雑度を表す1つの尺度として密度を考えると、密度が大きいときには歩行速度は小さく、密度が小さいときには歩行速度は大きくなるという関係にある。この2つの関係式としては直線モデル・ベキ乗モデル・指数モデル・対数モデルなどが議論されているが、一般的には直線の式で十分近似できると考えられている。実際に多くの研究でも直線モデルが採用されている。歩行速度を  $V[m/s]$ 、密度を  $K[人/m^2]$  とすると、正の定数  $a, b$  を用いて以下のように表される。

$$V = a - bK \quad (10)$$

ここで [4] によれば、 $a$  は自由歩行をしたときの速度、つまり標準歩行速度を表す。しかし実際の  $a$  の値は、標準歩行速度の実測値に比べてかなり大きい。もともと低密度の状況で歩行する場合、ほとんど周りの影響を受けずに歩行することができるため、自由歩行が可能となる密度は0よりも若干大きいときと考えられる。したがって式 (10) はある一定密度以上の範囲について成立する。[4] ではこの値を  $0.2 \sim 0.4[人/m^2]$  としている。また [5] では歩行者1人あたりが所有する空間の面積を歩行者空間モジュール  $M[m^2/人]$  と呼んでおり、

$$M = \frac{1}{K} \quad (11)$$

のように密度の逆数で表されている。これを用いると、 $b/a$  は歩行流が完全に停止し、速度が0になったときの歩行者空間モジュールと言える。

### 5.2 交通流量・密度間関係式

歩行空間を考えたとき、歩行速度とともに重要となる特性量が「単位時間にある幅員をもつ通路を通過する人数」である。この特性量のことをここでは交通流量と呼び、 $P[人/s]$  で表す。通路の幅員を  $L[m]$  とし、「単位時間に通路を通過する単位幅員あたりの人数」を  $Q[人/m \cdot s]$  とすると、

$$Q = \frac{P}{L} \quad (12)$$

となる。この  $Q$  を交通流率と呼ぶことにする。これは主に空間設計において通路の幅員を決定するときなどによく用いられ、[1] によると駅の建物やホームの設計などにも応用されているようである。

これまでの研究ではこれらの言葉が混同して使用されてきた。それらをまとめたものが表2である。特に  $Q$  に関しては、「量」という言葉よりも「率」という言葉の方がその性質を端的に表していると考えられ、本論文では「交通流率」という言葉を用いることとする。

表 2: 交通流量と交通流率

	$P$	$Q$
本論文	交通流量	交通流率
吉岡 [9][10][11][12]	—	交通量・交通流量
毛利ほか [8]	—	交通量
中村ほか [7]	流量	流率
加藤ほか [2]	—	流率
青木 [1]	—	流率
Fruin[5]	流動量	流動係数
河上ほか [3]	—	交通流量
交通工学ハンドブック [4]	交通量	交通流量

一般に交通流率は歩行速度と密度との積として表されると考えられている。つまり、

$$Q = KV \quad (13)$$

$$= K(a - bK) \quad (14)$$

となる。[8]によると少なくとも  $K \leq 1.5$  のときには、式 (13) が成立すると述べられている。密度が  $1.5[\text{人}/\text{m}^2]$  という状態は [6] によると、かなり歩行者の自由度が制限されている状態である。多くの研究と同様、本論文でも交通流量の代替量として交通流率を用いることとした。

なお、交通流量と密度の関係は以下ようになる。

$$P = QL \quad (15)$$

$$= KVL \quad (16)$$

$$= K(a - bK)L \quad (17)$$

### 5.3 先行研究における関係式

以前から歩行速度と密度の関係については多くの研究者が興味を示しており、多くの研究がなされてきた。特に実際の歩行の様子を観察し、分析する手法が採られることが多く、その関係式を回帰直線として導き出している。表 3 はこれまでに行なわれてきた主な研究によって得られた  $V - K$  関係式 (10) の係数  $a, b$  の値である。

表 3:  $V - K$  関係式の係数

	$a$	$b$	番号
吉岡 (通勤) [10]	1.61	0.33	(1)
吉岡 (行事・催物) [10]	1.349	0.376	(2)
吉岡 (買物) [11]	1.13	0.28	(3)
毛利ほか (通勤) [8]	1.48	0.204	(4)
加藤ほか [2]	1.141	0.169	(5)
Fruin[5]	1.356	0.341	(6)

## 6 シミュレーション

本研究ではシミュレーションを用いて、歩行速度・密度・交通流量のデータを得ることにより、それらの間に成り立つ関係式についての検討を行なっている。そのためには作成したシミュレータのパラメータを設定する必要がある。本研究では、

- シミュレーションクロック  $\Delta t$
- サーチ距離係数  $\tau$
- 到着率  $\lambda_S, \lambda_N$

の3種類を可変パラメータとした。それ以外のパラメータに関しては以下のように固定した。

- 人体円半径  $r = 22.5[cm]$ (男性)、 $20.0[cm]$ (女性)
- 標準歩行速度  $V_s = 1.36 + \sigma[m/s]$   
ただし  $\sigma$  は  $(-0.2, 0.2)$  上の一様分布に従う。
- 最大速度比  $k = 1.2$
- パーソナル・スペース比  $c = 1.2$

### 6.1 可変パラメータとデータ

既に述べた3種類の可変パラメータを変化させることで種々の状況が生まれる。まずシミュレーションクロックに関してはその逆数、つまり1秒のクロック数  $N_c$  を与えている。まず可変パラメータ  $N_c, \tau, \lambda_S, \lambda_N$  を指定してシミュレーションを行なう。クロック数は  $N_c = 10, 50, 100$ 、サーチ距離係数は  $\tau = 2.0, 4.0$  を考え、表4のようにその組合せとして6通りを用いた。

表 4: クロック数・サーチ距離係数によるデータの分類

$N_c \setminus \tau$	2.0	4.0
10	data0	data1
50	data2	data3
100	data4	data5

表 5: 到着率によるデータの分類

$\lambda_N \setminus \lambda_S$	1.0	1.5	2.0
1.0	data_*0	data_*1	data_*2
1.5	—	data_*3	data_*4
2.0	—	—	data_*5

さらに到着率を変化させることで、さまざまな密度の歩行空間を作り出すことが可能となる。 $\lambda_S \geq \lambda_N$  とし、表4の1組のデータに対して表5のように6つのデータを採った。つまり36回のシミュレーション実験を行なったことになる。このシミュレーション実験では到着率を  $2.0[人/s]$  以下に制限しており、交差点の両端でこの到着率を超えるとモデルの性質からか、歩行者同士が壁を作り合って機能しなくなる。

## 6.2 歩行流の特性量の計算方法

可変パラメータの各設定において、歩行流の特性量である歩行速度 $V[m/s]$ 、密度 $K[人/m^2]$ 、交通流率 $Q[人/m \cdot s]$ を計算する必要がある。1回の実験は30分間計測するものとしており、各シミュレーションクロックで歩行流の特性量を計算してそれを10秒間単位で平均をとって出力したものが表5の各データである。また歩行速度・密度を計算する際、図12の領域内の歩行者に、交通流率に関しては太線部を通過する歩行者に制限している。本研究では中心部の面積は交差点面積の1/4、中線の長さは交差点の1/2とした。歩行を開始してから最初の10秒間は歩行流が定常化せず、中心部の歩行者人数が極端に少ないと思われるので、計測の対象外とした。

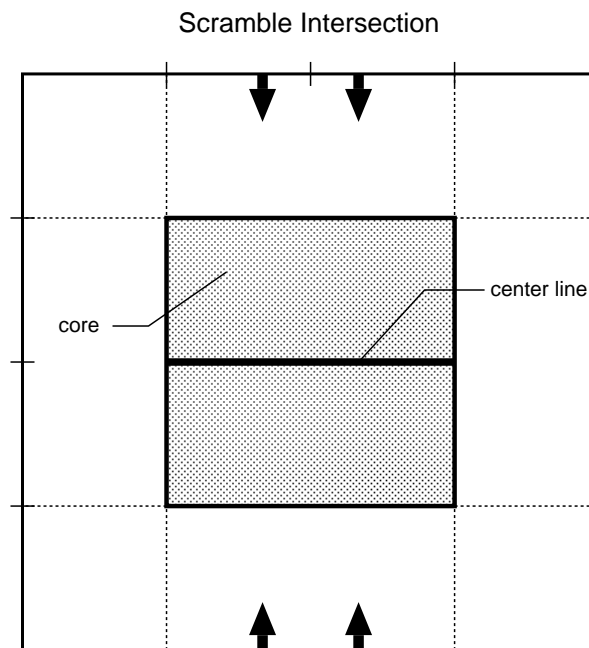


図 12: 交差点中心部と中線

### 6.2.1 歩行速度

各クロック毎に図12の中心部にいる全歩行者の速度の和を10秒間足し合わせ、そののべ歩行者数で割ったものを歩行速度として用いている。実際には $t$ クロック ( $10nN_c < t \leq 10(n+1)N_c, n \in N$ ) 時に中心部にいる歩行者 $i$ の速度を $V_i(t)$ 、歩行者の人数を $N(t)$ とすると、

$$V = \frac{\sum_t \sum_i V_i(t)}{\sum_t N(t)} \quad (18)$$

によって計測した。

### 6.2.2 密度

各クロック毎に図 12 の中心部にいるのべ歩行者数をその面積で割り、さらに計測時間である 10 秒間のクロック数で割ったものを密度とした。面積を  $S$  とすると、

$$K = \frac{\sum_t N(t)}{10N_c S} \quad (19)$$

である。なお本研究では交差点を  $15[m]$  四方の正方形としたため、 $S = 56.25[m^2]$  として計算をしている。

### 6.2.3 交通流量・交通流率

各クロック毎に図 12 の中線を通過する歩行者数を計測した秒数 10 で割ったものを交通流量とした。 $t$  クロック時に中線を通過した人数を  $M(t)$  とすると、

$$P = \frac{\sum_t M(t)}{10} \quad (20)$$

と表すことができる。また線分の長さを  $L$  とすれば式 (12) より、

$$Q = \frac{P}{L} \quad (21)$$

$$= \frac{\sum_t M(t)}{10L} \quad (22)$$

として、交通流率を表すことができる。なお本研究では  $L = 7.5[m]$  として計算をしている。

これら  $V$ 、 $K$ 、 $Q$ 、3 つの特性量を用いて式 (10)、(13) を評価していく。

## 7 実験結果

到着率を変化させて得られたデータを統合し、クロック数  $N_c$ 、サーチ距離係数  $\tau$  で分類した表 4 のような 6 種類のデータを用いて分析した。以下では  $N_c$ 、 $\tau$  の値によって得られるであろう結果の予想と、実際に得られた結果、およびそれに対する考察についてまとめる。

### 7.1 予想

クロック数は各歩行者が 1 秒間に周囲の状況を判断し、歩行速度を決定する回数にあたる。つまりクロック数が大きいほど、周囲の状況に敏感であるということが言える。クロック数が大きいときは対向する歩行者に対して、減速による回避行動よりも歩行経路の変更による回避行動を選択する比重が高くなると考えられ、歩行速度が大きくなると予想できる。

サーチ距離係数は、各歩行者が他の歩行者を認識する空間である情報空間の大きさに影響を与える。サーチ距離係数が大きいときは情報空間も大きくなり、より多くの歩行者を認識することができる。なお、情報空間の面積はサーチ距離係数の 2 乗に比例するものとしている。サーチ距離係数が大きいとき、より遠くにいる歩行者も認識できるようになるため、より将来性を重視した、すなわち将来的にもスムーズな回避行動ができるための歩行経路を選択することが予想される。つまりサーチ距離係数が大きければ歩行速度も大きくなると考えられる。

### 7.2 結果・考察

これらの予想の下でシミュレーション実験を行ない、6 種類のデータから得られた歩行速度  $V$ 、密度  $K$ 、交通流率  $Q$  について表 6 に示す。

表 6: 実験結果

データ	指標	平均値	標準偏差	最小値	最大値
data0 : $N_c = 10, \tau = 2.0$	$V$	1.202	0.055	1.028	1.352
	$K$	0.343	0.111	0.099	0.770
	$Q$	0.402	0.125	0.093	0.907
data1 : $N_c = 10, \tau = 4.0$	$V$	1.101	0.120	0.618	1.355
	$K$	0.385	0.143	0.094	0.898
	$Q$	0.397	0.108	0.107	0.867
data2 : $N_c = 50, \tau = 2.0$	$V$	1.192	0.063	0.939	1.348
	$K$	0.367	0.117	0.131	0.880
	$Q$	0.425	0.134	0.147	1.200
data3 : $N_c = 50, \tau = 4.0$	$V$	1.124	0.119	0.565	1.351
	$K$	0.379	0.147	0.133	1.275
	$Q$	0.400	0.113	0.160	0.973
data4 : $N_c = 100, \tau = 2.0$	$V$	1.193	0.062	0.942	1.366
	$K$	0.370	0.119	0.127	0.889
	$Q$	0.431	0.138	0.133	1.173
data5 : $N_c = 100, \tau = 4.0$	$V$	1.128	0.113	0.634	1.381
	$K$	0.379	0.140	0.123	1.177
	$Q$	0.402	0.111	0.147	1.093

クロック数の違いによって、これら歩行流の特性量にほとんど差がないことがわかり、歩行流に影響を与えるものではないと考えられる。

むしろ注目すべきはサーチ距離係数による影響であろう。まずサーチ距離係数が大きくなると、歩行速度が小さくなる傾向がある。これは上で述べた予想とは異なる結果となった。そして標準偏差は大きくなり、歩行速度にばらつきが目立つようになる。また歩行速度の最大値には影響を及ぼさないが、最小値は大幅に減少している。この原因として、サーチ距離係数の増加に伴って認識する歩行者が増えたことが挙げられ、それまで非衝突領域内であった最適速度ベクトルが衝突領域内となってしまう、大幅な減速を強いられる。厳密に言うならば、サーチ距離係数が大きくなると、スムーズな回避行動の選択による影響にも増して、非衝突領域の拡大による影響が大きくなるということになる。

次に密度に対する影響であるが、サーチ距離係数が大きくなると、それに伴って密度も大きくなっている。一方歩行速度とは逆に、密度の最小値には影響がなく最大値が増加している。このことから、歩行速度と密度との間には負の相関が存在すると考えられる。

さらに交通流率への影響を見てみると、サーチ距離係数が大きくなるにつれて交通流率は減少している。また標準偏差は歩行速度・密度とは逆に小さくなっており、これは最大値と最小値の差が小さくなることによる。しかし歩行速度と比べると値が小さいこともあって、実際はかなりばらつきが大きいこともわかる。

図 13~18 はそれぞれのデータに対する歩行速度と密度の散布図である。横軸に密度  $K$  [人/㎡]、縦軸に歩行速度  $V$  [m/s] をとり、それぞれのデータをプロットした。1 回のシミュレーション実験で 179 個の測定結果が得られ、それを 6 回行なったことから、グラフ上にはそれぞれ 1074 個の点が存在している。同時に描かれている直線は、 $V = a - bK$  を基に最小自乗法を適用して得られた回帰直線を表している。

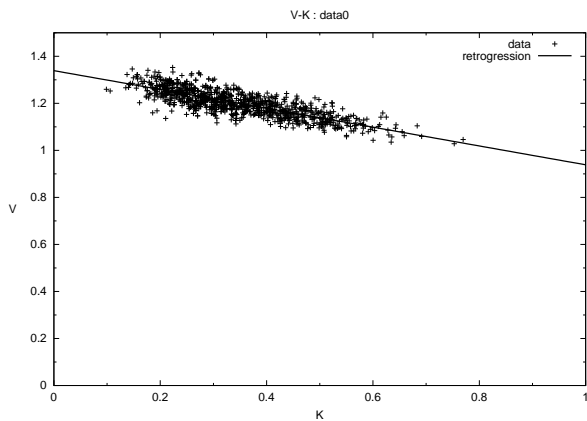
また図 19~24 はそれぞれのデータに対する交通流率と密度の散布図である。横軸に密度  $K$ 、縦軸に交通流率  $Q$  [人/m・s] をとり、それぞれのデータをプロットした。点の数は  $V - K$  グラフと同様、1074 個である。同時に描かれている 2 本の曲線は、実線が  $Q = \alpha K^2 + \beta K + \gamma$  を基に最小自乗法を適用して得られた回帰曲線を、破線が  $V - K$  グラフの回帰直線を式 (13) に代入することで得られる曲線をそれぞれ表している。2 本の曲線がほぼ同じ形をしていることが見てとれるだろう。

$V - K$  グラフの回帰直線  $V = a - bK$ 、 $Q - K$  グラフの回帰曲線  $Q = \alpha K^2 + \beta K + \gamma$  の係数を表 7 に示す。

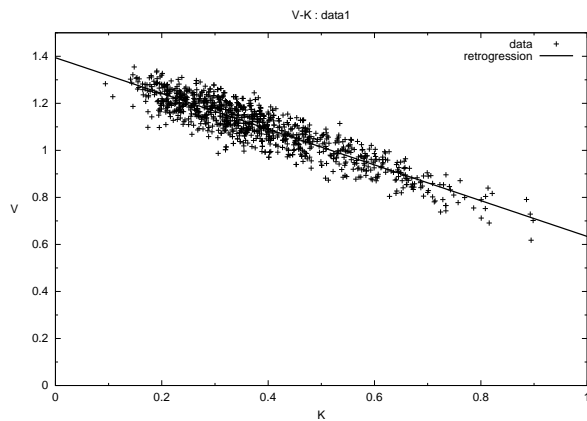
表 7: 回帰分析による近似式の係数

データ	$V - K$		$Q - K$		
	$a$	$b$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
data0	1.339	0.400	-0.205	1.215	0.012
data1	1.394	0.760	-0.803	1.397	-0.006
data2	1.353	0.439	-0.501	1.387	-0.010
data3	1.402	0.734	-0.590	1.267	0.017
data4	1.353	0.430	-0.449	1.328	0.007
data5	1.404	0.728	-0.734	1.370	0.003

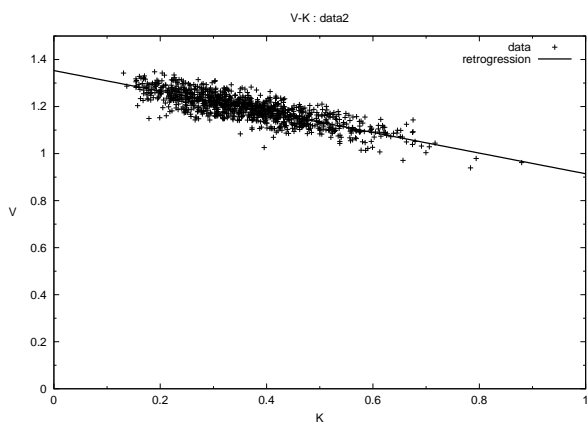
また表 8 は各データに対する歩行速度と密度との相関係数、交通流率と密度との相関比を表したものである。これによると、双方で非常に強い相関が見られる。特にサーチ距離係数が大きいと、相関がより強くなる傾向がある。



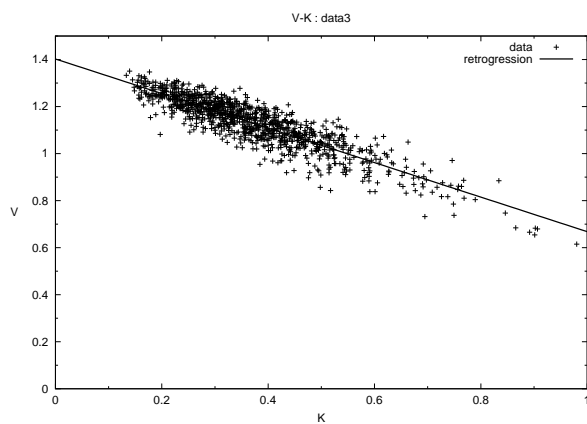
⊠ 13:  $V - K$  : data0



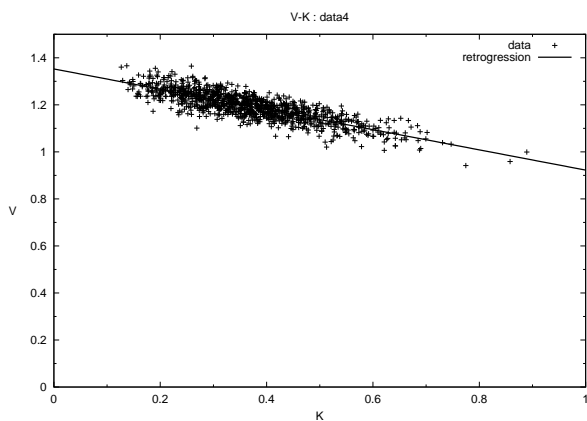
⊠ 14:  $V - K$  : data1



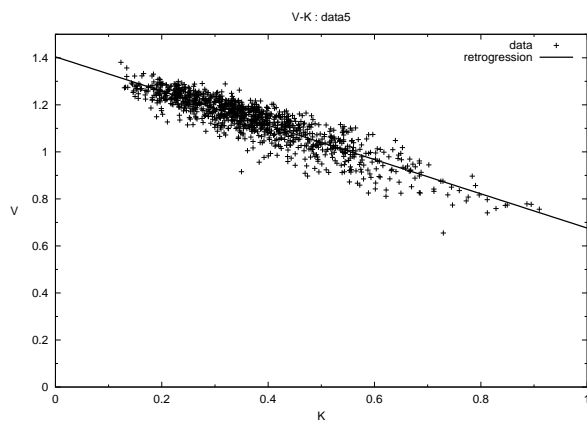
⊠ 15:  $V - K$  : data2



⊠ 16:  $V - K$  : data3



⊠ 17:  $V - K$  : data4



⊠ 18:  $V - K$  : data5

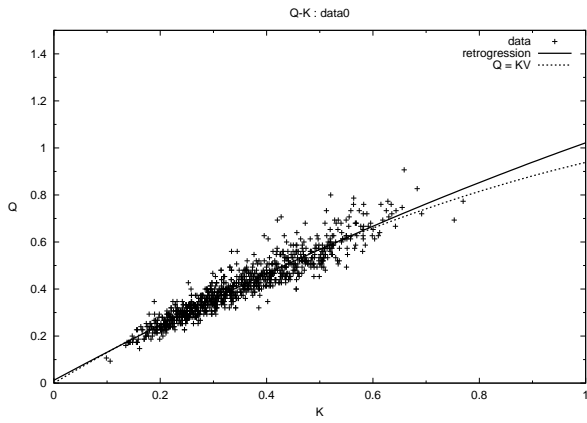


Figure 19:  $Q - K$  : data0

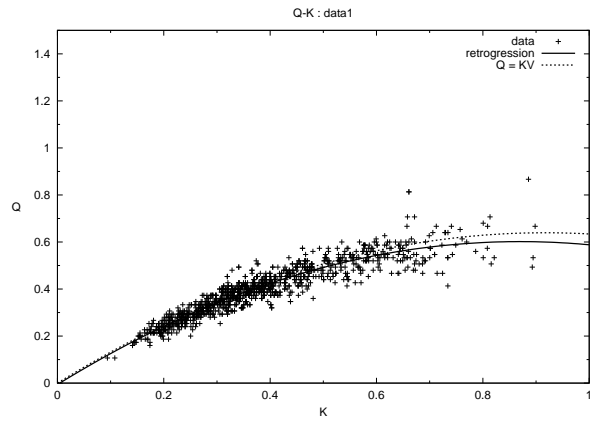


Figure 20:  $Q - K$  : data1

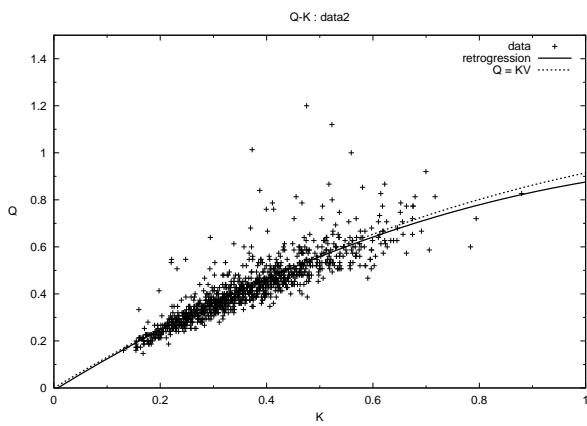


Figure 21:  $Q - K$  : data2

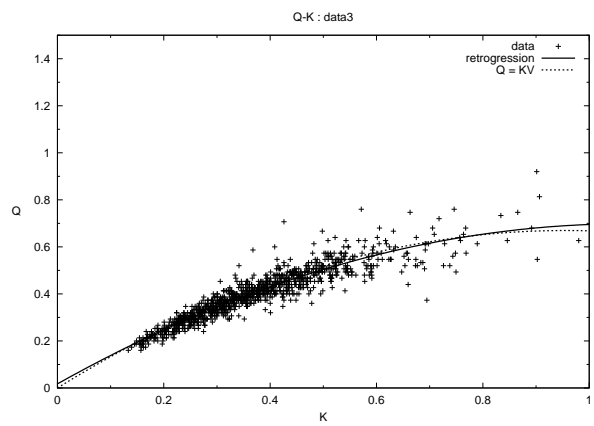


Figure 22:  $Q - K$  : data3

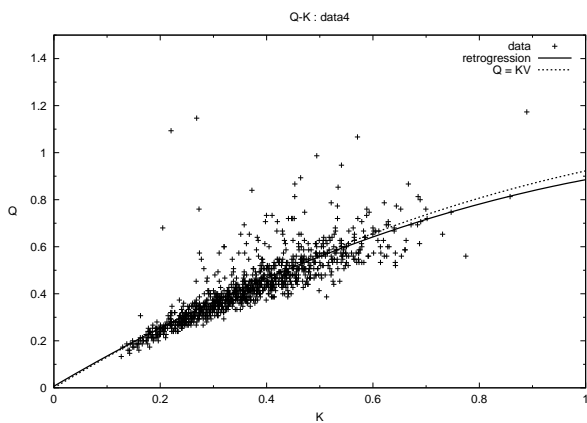


Figure 23:  $Q - K$  : data4

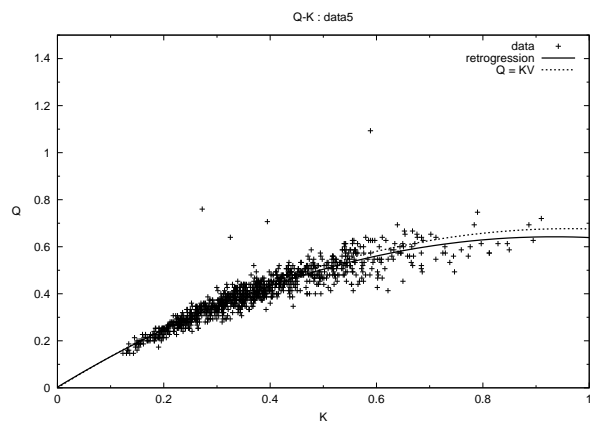


Figure 24:  $Q - K$  : data5

表 8: 相関係数・相関比

データ	$V - K$ 相関係数	$Q - K$ 相関比
data0	-0.804	0.942
data1	-0.905	0.929
data2	-0.818	0.863
data3	-0.908	0.930
data4	-0.826	0.833
data5	-0.906	0.921

表 7 を見ればわかるように、 $V - K$  関係式における  $b$  の値、 $Q - K$  関係式における  $\alpha$  の値がサーチ距離係数によって大きく異なる。特に  $\tau = 4.0$  としたときの  $b$  の値は、表 3 のどの文献のそれに対しても差異が大きい。このことは  $\tau = 4.0$  としたシミュレーションでは、高密度になればなるほど歩行速度の減少が大きいことを意味する。実際にはそれほど減速せずに回避行動をとるにも関わらず、それができずに大幅な減速を強いられることになっている。この理由として、混雑した状況下ではサーチ距離係数が大きいと、より多くの歩行者を認識するために歩行が制限されやすくなることが挙げられる。実際  $\tau = 2.0$  のときは最大でおよそ  $3[m]$  先の歩行者までを認識しているのに対して、 $\tau = 4.0$  では最大でおよそ  $5[m]$  先の歩行者まで認識している。高密度状態では歩行者が閉塞状態となってしまう、なかなか前方へ進まないという状況が生まれることがあり、本研究では高密度下での歩行流の様子を表現するまでには至らなかった。

これらの結果から、サーチ距離係数は  $\tau = 4.0$  よりも  $\tau = 2.0$  の方がもっともらしいと言える。またクロック数に関してはどれも大きな差はない。しかしクロック数が大きすぎると、1クロックで歩行する距離が実際にシミュレーションで表示できる距離よりも短くなってしまふことがある。その場合はそのクロックでの歩行は表示されないことになり、それ以降でのクロックで一度に歩行したように見える。よってシミュレーションを見せるときには、クロック数をある程度抑えることが求められる。

これに対して  $V - K$  関係式における  $a$  の値に関しては、標準歩行速度の値よりも大きくなることは [4] で提言されている。しかしこの実験では明確に断言するに足る結果が得られなかった。標準歩行速度の平均を  $1.36[m/s]$  としているため、 $a$  の値の方が下回っている場合も存在する。表 9 に標準歩行速度と一致するときの密度  $K_s$  を示したが、 $\tau = 2.0$  のときの値が負になっている。 $\tau = 4.0$  のときの値についても [4] に示されているような  $0.2 \sim 0.4[人/m^2]$  という値には程遠い結果となった。

また  $V = 0$  となる密度  $K_0$  についてであるが、シミュレーション実験では、表 9 にもあるようにサーチ距離係数によって値が異なるという結果になった。本モデルでは歩行空間の中心部に歩行者が限界まで入ったとき、およそ  $4.0[人/m^2]$  となるように設定されているため、少なくともこの値に近い結果が期待される。その意味でも  $\tau = 2.0$  のときはまだ許容範囲内であると言えるが、 $\tau = 4.0$  のときは明らかに値が小さい。これは  $b$  の値が大きいためであり、 $b$  の値が小さく、 $V - K$  回帰直線の傾きがもう少し緩やかであれば現実的な結果が得られるはずである。

さらに  $Q - K$  関係式において、交通流率が最大となる密度の値に注目した。既存の研究における値はおよそ  $1.8 \sim 3.6[人/m^2]$  となっているが、シミュレーション実験における値は表 9 にもあるように、若干高い値を示した。 $N_c = 10$ 、 $\tau = 2.0$  と設定されている data0 のものだけが、かなり大きな値を示している。これは  $Q - K$  関係式における  $\alpha$  の値が非常に小さいことに起因する。実際にはなぜ  $\alpha$  の値がこのデータだけ小さくなるのかについては現段階では不明であり、この原因についてはもう少し詳細を調べる必要があると思う。

表 9: 各設定における密度の値

データ	$K_s$	$K_0$	$K_{max}$
data0	-0.053	3.345	11.838
data1	0.045	1.834	3.481
data2	-0.016	3.084	5.533
data3	0.058	1.910	4.299
data4	-0.017	3.145	5.907
data5	0.061	1.929	3.734

$K_s$ :標準歩行速度のときの密度の値

$K_0$ :速度が0になるときの密度の値

$K_{max}$ :交通流量が最大になるときの密度の値

最後に図 19 ~ 24 に描かれている 2 本の曲線の比較を見る。図を見ればわかるように、今回の実験結果では密度が  $0.5[\text{人}/\text{m}^2]$  までは非常によく合致している。しかしそれを超えると、あるデータでは次第にずれが生じる。何度も述べているように、高密度下での歩行流の表現に難があるため、それ以上の密度での評価を厳密に行なうことは現段階では不可能である。このことから、高密度下での歩行流の様子を表現することの重要性が非常に大きいことがわかる。

以上のことから、 $V - K$  関係式における  $b$ 、 $Q - K$  関係式における  $\alpha$  の値には既存の研究で実測されたデータである表 3 の値とは違いが見られるものの、定性的にはよく合致しているものとみなすことができる。しかし定量的にはまだまだ問題点は多く、さらなるモデルの改良が求められる。

### 7.3 まとめ

本研究における実験結果は以下のようにまとめられる。

- クロック数はあまり歩行速度に影響を及ぼさない
- サーチ距離係数は  $\tau = 2.0$  とするのがもっともらしい
- 歩行速度・交通流率は密度と非常に高い相関がある
- 標準歩行速度となる密度の値は適切に計算ができていない
- サーチ距離係数が大きいときは速度が0になる密度の値が密集状態の限界値よりも小さい
- 交通流率が最大となる密度の値は既存の研究よりもやや大きい
- $V - K$  関係式における  $b$ 、 $Q - K$  関係式における  $\alpha$  の値は実測値と差がある

このように定性的には期待された結果がほぼ得られたが、定量的に見た場合、既存の研究と合致しない部分がある。この大きな理由が高密度下での歩行流の様子を表現しきれないというモデルの性質である。逆に言えば、高密度下においても歩行流を現実に近い形で表現できなければ、これらの値は正確に与えることができず、これをどう実現するかが今後の課題となってくるだろう。またサーチ距離係数の設定によっても歩行流の様子が変わってきたことから、他のパラメータの値を変更することによっても歩行流に影響を与える可能性がある。したがって、このようなパラメータを現実的な値に設定することも非常に重要なこととなり、試行錯誤を繰り返す必要があると思われる。

また既存の研究で提唱されてきた関係式

- $V = a - bK$
- $Q = KV$

が本モデルにおいても成立することが確認され、本モデルにいくらかの改良を加えることで、歩行流を表現する上で有効と言える。歩行者同士の衝突や回避に注目したミクロ的な歩行挙動の積み重ねによって、歩行流の変化などのマクロ的な歩行挙動が引き起こされると考えられ、その様子が観察できることになるだろう。つまりどのようなミクロ現象がどのように積み重なることで、どのようなマクロ現象を観察することができるかが確認できるはずである。

## 8 今後の課題

本研究では和田モデルにいくらか改良を加えたモデルを採用した。しかし和田モデル自体に問題がないとは言い切れない。これまでに述べてきた問題点のほかにも、実際にこのシミュレーションではミクロおよびマクロ的な歩行挙動の特徴をまだまだ表現しきれていない。そこで今後は以下で示すような問題点を改善し、いかにしてモデルを構築していくかということが課題である。

### 8.1 高密度下での歩行流の表現

本研究で作成したシミュレータは少ないパラメータながらも、ある程度の歩行挙動を実現していると思われる。しかしそれは一定密度以下の場合である。一定密度を越えると対向する歩行者同士で壁を作り合ってしまうために、結局は双方の歩行者が動けなくなってしまうといった現象が起こる。現実世界ではいつまでも同じ場所にとどまっているようなことはなく、体を横にしながらか前の歩行者を押しやるようにして進んだり、わざわざ遠回りをしてまでも低密度状態の方へ迂回したりといった選択をするであろう。しかし現段階では1度停止してしまうとなかなか前へ進めなくなることが多く、さらに後続から歩行者が集まってきてしまうために集団がどんどん膨らみ、最終的にはほとんどの歩行者がその場から動けないといった状況が生まれてしまう。この状態を本論文では閉塞状態と呼んでいる。

今回のシミュレーション実験では閉塞状態になってしまう密度の境界はおよそ $1.0[\text{人}/\text{m}^2]$ 前後であった。また密度は歩行者の到着率を変えることで変化させているが、到着率が双方でおよそ $2.0[\text{人}/\text{s}]$ を越えると閉塞状態になってしまう場合が出てくる。少なくとも $1.5[\text{人}/\text{m}^2]$ くらいまでの密度であれば閉塞状態にならずに、歩行が可能となるようにすべきであろうと思っている。

今後はどうモデル化をすれば閉塞状態ができないようになるかを調べ、試行錯誤を繰り返す必要がある。そのためには混雑状況によってパーソナル・スペースなどを変化させてやるのが重要になってくるかもしれない。もしくは各歩行者が混雑状況の中では他人を押しでも直進しようとするなどモデルに組み込む必要があるのかもしれない。または高密度下では目的地に重きをおくのではなく、ひとまず横断することを第一に考えるようにすればよいのかもしれない。現段階ではモデル化にまでは至っていないが、将来的には高密度であっても閉塞状態にはならず、遅い速度であろうとも歩行ができるようなシミュレータをぜひ作成したい。

### 8.2 B.C.S. の再導入

本研究では割り込み歩行の防止を目的として、B.C.S.(Buried Collision Space) の導入を検討してきた。高密度下では逆にB.C.S. が1つの原因で双方の歩行者が立ち止まってしまうことがしばしば観察されたことから、今回はB.C.S. の採用は見送ることとした。しかし注目すべきは低密度下ではそれなりの成果を出し、割り込み歩行の防止に成功したことである。つまりB.C.S. 自体は高密度下でない限りは有用であることが言え、B.C.S. の再導入が期待される。

そこで各歩行者が周囲の混雑状況を把握した上で、B.C.S. を適用するか否かの判断を行うことができるようなモデル化を考えていきたい。今後はどのようなときにB.C.S. の適用を行なうかに焦点が集まる。現段階では速度や情報空間内の人数などによって、周囲の混雑状況を把握できるものと考えている。

### 8.3 グループ歩行の表現

和田モデル同様、本モデルでは歩行者は単独歩行しているものとして考えている。もちろんこのことは実際とは大きく異なり、グループ歩行が歩行空間全体に与える影響は大きいものである

と考えている。実際に渋谷駅前交差点での歩行の様子を観察してみると、約半数の歩行者がグループを形成しながら歩行していることがわかり、[13]でもそのことが報告されている。

グループ歩行を表現するためには、いろいろなことを考慮する必要がある。グループ内の歩行者の歩行速度は一般的にはばらばらであるが、グループを崩さないためにも歩行速度をある程度一定にしなければならない。またグループ内でのパーソナル・スペースと、グループ外でのパーソナル・スペースとの概念を変える必要もある。ほかにも考慮すべき点があるが、それらを実現するには新たなパラメータの導入を余儀なくされる可能性が高い。そこでとりあえずはグループ内歩行者の人体円を全て含むようなグループ円を考えていくつもりである。

#### 8.4 方向性の拡張

本研究では歩行者を対向する2方向のみに限定してモデル化を行なった。しかし最終的にはスクランブル交差点などでのあらゆる歩行流の表現まで視野に入れており、多方向に拡張したモデルを構築することが目標となる。その前段階として、まず4方向でのシミュレーションを行なうつもりであるが、モデル自体には大きな変化はなく、計算量の増加が見込まれる程度であると考えている。

4方向でのシミュレータが実現すれば、新たな歩行速度・密度・交通流量間関係式を求めることができる可能性がある。実際に歩行していても、誰も歩行者がいない場合、同方向の歩行者のみの場合、対向する歩行者がいる場合、自分の前を横切る歩行者がいる場合となるごとに、より加速・減速を頻繁に行なっていることがわかる。今後はとりあえず4方向モデルを考えることで、横断する歩行者が他の歩行者にどんな影響をどの程度及ぼしているかを考えていきたい。

#### 8.5 その他

これまでに今後の課題として歩行モデルの改善すべき点を述べてきたが、細かい部分ではまだまだ改善の余地はある。モデルの単純化という1つの目的があるため、人体やパーソナル・スペースの形状を変えることは難しい。また衝突領域を求めるアルゴリズムなどを変えることは、和田モデルのベースを崩す恐れがあるのでこれも難しい。しかし情報空間や視野を拡張することによって、モデルが現実世界のものに近づく可能性はある。

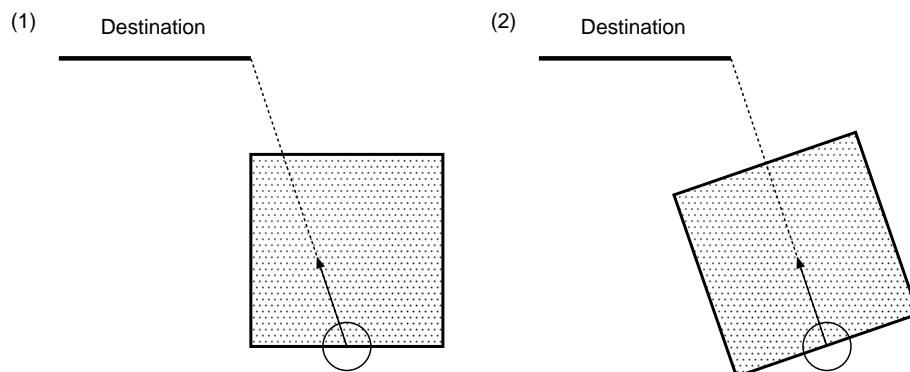


図 25: 情報空間の向き

まず情報空間であるが、ここでは1辺の長さが $d$ の正方形を考えてきた。形状に関しては円、扇型、長方形、菱形などが考えられるが、本質的にはあまり問題ではないと思われる。むしろ情報空間の向きに問題がある。図 25(1)が現在考えている情報空間である。歩行者の現在位置にかかわらず、目的地と正方形の1辺が常に平行となっている。それに対して図 25(2)はそれを改良した

ものである。正方形の一辺が目的地への最短距離をとった標準歩行速度ベクトルに平行になるように、情報空間を形成している。歩行者はまず目的地へ最短距離をとるような速度を考える。つまりその方向を正面に向いて歩行するものと考えられる。よってその方向を基準に情報空間を形成することが自然であると言えよう。

また視野については距離や可視部分の割合に関わらないものとしている。このことは現実世界においては不可解なことで、多少でも体が隠れば及ぼす影響がそうでない場合と比べて小さいと考えるのが一般的であろう。和田モデルでは、

- 計算の複雑化
- 衝突領域の拡大による歩行可能速度ベクトル領域の減少

の2点を回避するために、付録Bのような視野の定義を用いていた。しかしこの定義では背後に隠れる歩行者の存在を無視しすぎである。と言いつつも、その前にいる歩行者と同様の影響を受けるとも思いにくい。このことから基準の歩行者からの距離と体の可視部分の割合によって重み付けをすることで衝突領域の大きさを緩和してやることができる。どのように重み付けて視野の影響を考えていくかが今後の課題となってくる。

## 9 おわりに

歩行における歩行流の特性を調べることは、さまざまな分野に応用が可能であり、特に建築設計や都市開発などの分野への期待が高まる。また個人の挙動が歩行流に与える影響にも関心が集まっており、このことを調べることも重要となってくる。そのためには歩行挙動モデルを構築し、シミュレータを作成する必要がある。そこで本研究では、ミクロ的視点から歩行挙動を捉えた和田モデルを基に歩行挙動モデルを構築し、シミュレータを作成した。モデルでの挙動を現実に見られる挙動と比較することで、歩行流の特性量である歩行速度・密度・交通流量間関係式を導出した。その結果として、既存の研究で提唱されてきた式(10)、(13)が成立することが確認された。このことから、モデルをいくらか改良していくことによって十分に現実の歩行挙動の表現が可能になると考えられる。またそれによって、当初の主たる目的であった個人の挙動が歩行流に与える影響を見ることもできるはずである。

しかし本モデルはまだまだ発展途上であり、以下のような課題が挙げられる。

- 高密度下での歩行流の表現
- グループ歩行の表現
- 方向性の拡張

特に高密度状態でのシミュレータについては早急な改善が求められるとともに、情報空間、視野、パーソナル・スペースなどの拡張を試みる必要があると考えられる。さらにはB.C.S.の再導入などによって、各歩行者の意思決定に基づいたモデル化を熟慮していくべきであろう。

## 謝辞

本論文の作成に際して論文全般に渡って御指導頂いた、高橋幸雄教授に感謝致します。また高橋(幸)研OBの和田剛さんには数多くの助言を頂きました。最後に、高橋(幸)研の皆様方はもちろんのこと、学生室を共同で使用している小島(政)研や三好研の皆様方にも大変お世話になりました。この場をお借りして、御礼を申し上げます。

## 参考文献

- [1] 青木俊幸. 駅の旅客流動. bit, Vol. 31, No. 9, pp. 91-98, 1999.
- [2] 加藤邦男・上原孝雄・中村和男・吉岡松太郎. 群集対向流動の解析. 日本建築学会論文報告集, Vol. 289, pp. 119-129, 1980.
- [3] 河上省吾・松井寛. 交通工学. 森北出版, 1987.
- [4] 交通工学研究会. 交通工学ハンドブック. 技報堂出版, 1984.
- [5] ジョン.J. フルーイン (長島正充 訳). 歩行者の空間. 鹿島出版会, 1979.
- [6] 高橋幸雄・森村英典. 混雑と待ち. 朝倉書店, 2001.
- [7] 中村和男・小林實. 交通環境における歩行行動. IATSS Review, Vol. 10, No. 5, pp. 6-19, 1984.
- [8] 毛利正光・塚口博司. 歩行路における歩行者挙動に関する研究. 土木学会論文報告集, Vol. 268, pp. 99-108, 1977.
- [9] 吉岡昭雄. 歩行者交通と歩行空間(1) - 歩行者交通量の変動と設計のための交通流量 - . 交通工学, Vol. 13, No. 4, pp. 25-36, 1978.
- [10] 吉岡昭雄. 歩行者交通と歩行空間(2) - 歩行速度・密度・交通量について - . 交通工学, Vol. 13, No. 5, pp. 41-53, 1978.
- [11] 吉岡昭雄. 歩行者交通と歩行空間(3) - 買物・通勤(駅構内通路)の速度、密度、交通量 - . 交通工学, Vol. 16, No. 3, pp. 13-21, 1981.
- [12] 吉岡昭雄. 歩行者交通と歩行空間 その特質と特性. 道路, Vol. 487, pp. 10-16, 1981.
- [13] 和田剛. 渋谷八丁公前交差点における横断者の歩行分析. 東京工業大学 情報科学科 1998年度 学士論文(高橋(幸)研究室), 1999.
- [14] 和田剛. スクランブル交差点における歩行挙動モデルとシミュレーション. 東京工業大学 数理・計算科学専攻 2000年度修士論文(高橋(幸)研究室), 2001.

## 付録

### A 和田モデル

ここでは3節に挙げた和田モデルについて詳しく説明する。和田モデルの特徴としては計算の複雑化を避けるために、従来使用されてきたモデルに比べて単純化されているという点である。

#### A.1 人体円

人体をモデル化する際、通常人体を真上から見て表現し、楕円や円弧を合成したもの、あるいは三角形などで表現するのが適当であると考えられる。しかし和田モデルではモデルをより単純化するために半径  $r[cm]$  の円で人体を表現している。

#### A.2 歩行速度

一般的に密度と歩行速度との関係は非常に強く、高密度であればあるほど速度は遅くなる。しかし個々の歩行者には自分にとって歩きやすい速度があり、密度が低く十分歩行速度をあげることができたとしても無理に加速しないケースが多い。この速度を標準歩行速度といい、 $V_s[m/s]$  で表す。言い換えれば、標準歩行速度とは物理的・心理的な制約や拘束がない下での歩行速度のことである。

また、歩行者は他の歩行者との衝突を避ける場合などに瞬間的に加速することがある。このときの最大の歩行速度  $V_{max}[m/s]$  を最大歩行速度と呼ぶ。標準歩行速度に対する最大歩行速度の比を最大速度比と呼び、 $k(> 1)$  で表す。

#### A.3 目的地と自由歩行

通常、歩行者はある領域を持つ目的地に向かって歩行をしている。歩行者の参入は点で与えているが、目的地を点として歩行する人はほとんどいないと思われる。そこで和田モデルでは目的地として、2点  $(p_x, p_y)$ ,  $(q_x, q_y)$  を与え、それらを結ぶ線分を考えている。さらに乱数を用いて歩行者が横断歩道の右側に行きたいのか、左側に行きたいのかをまず決定し、左側に行きたいときは目的地の左端は横断歩道の左端とし、右端は乱数で決定する。右側に行きたいときも同様である。

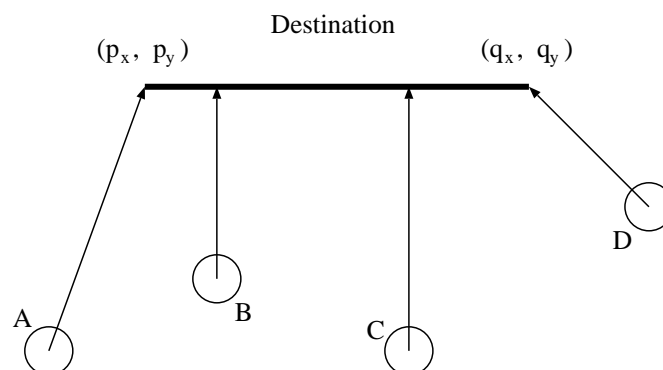


図 26: 目的地と自由歩行

また歩行者の経路としては、周囲の障害がなければ目的地への最短経路を選択すると考えられる。この歩行を自由歩行と呼ぶ。もちろん、自由歩行をするときには標準歩行速度で歩行するこ

とになり、そのときの速度ベクトルを標準歩行速度ベクトルと呼ぶ。和田モデルではこの自由歩行の原則に従い、図 26 のような経路を選択するものとしている。

#### A.4 パーソナル・スペース

他者がこの空間に入り込むと不快感を感じるような、歩行者を取り巻く目で見えない空間をパーソナル・スペースと呼ぶ。通常パーソナル・スペースは形状が楕円であったり菱形であったり、また円であったとしても人の位置が中心にないようなものがあることが多いが、ここでもモデルの単純化のために図 27 のような人体円に対する同心円を考えている。

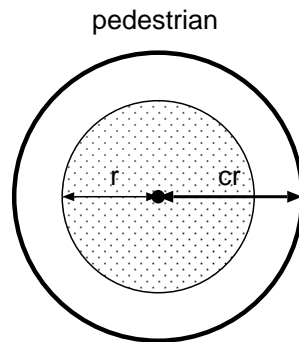


図 27: パーソナル・スペース

またパーソナル・スペース比として、人体円の半径  $r$  に対するパーソナル・スペースの半径の比を  $c(> 1)$  で表す。このときパーソナル・スペース円の半径は  $cr$  と表される。

## B 最適速度ベクトルの決定と歩行

各歩行者は歩行中絶えず、前方の歩行者を認識して衝突の危険性を探る。それを認識した歩行者の全てに適用することで、最終的に衝突を避けることができる領域を見つける。その非衝突領域内で最適な点への速度ベクトルを求め、歩行を行なう。この操作を繰り返し行なうことで、歩行という一連の挙動を成しているのである。

### B.1 情報空間と視野

まず各々の歩行者は前方に他の歩行者を認知すると、衝突の危険を察知して回避行動を選択する。しかし前方にいる歩行者全てから影響を受けているわけではなく、空間内に入った歩行者に限定している。そこで図 28 のような情報空間と呼ばれる、認識する可能性のある空間を定める必要がある。つまり情報空間内にいる歩行者のみが自分の歩行に影響を与える可能性があるとしている。形状については円や扇形、長方形、菱形など、いろいろなものが考えられるが、和田モデルでは 1 辺の長さが  $d[m]$  (ただし  $d = \tau V$ ) の正方形を情報空間としている。ここで  $\tau[s]$  をサーチ距離係数と呼び、一定の時間とする。

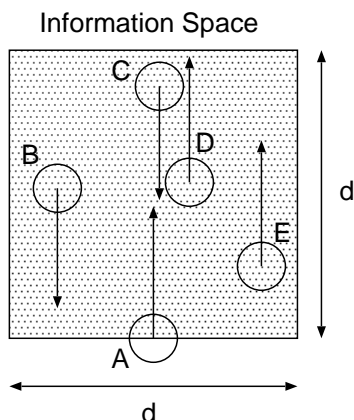


図 28: 情報空間

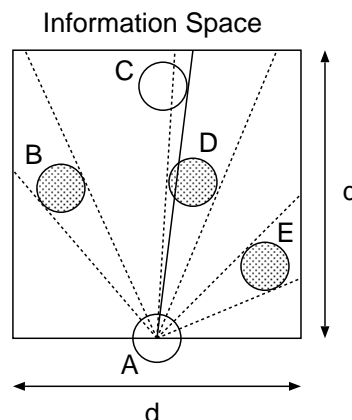


図 29: 情報空間と視野

しかし各歩行者は情報空間内にいる歩行者全員から影響を受けるわけでもない。情報空間内にいて、かつ視野に入る歩行者からのみ影響を受けるものとしている。和田モデルでは歩行者の一部が他の歩行者に隠れるときは視野に入らないものとしている。つまり、情報空間内の歩行者の人体円に 2 本の接線を引き、それらの間の領域に他の歩行者の一部が含まれない場合に視野に入るものとする。図 29 を例とすると、歩行者 B, D, E は A の視野に入るが、C の人体円に引いた接線が D の人体円と交わるため、C は A の視野には入らないことになる。

### B.2 衝突領域

歩行者  $i, j$  の位置を  $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 、速度ベクトルを  $(u_i, v_i), (u_j, v_j)$  とすると  $t$  秒後の  $i, j$  の位置はそれぞれ  $(x_i + u_i t, y_i + v_i t), (x_j + u_j t, y_j + v_j t)$  となる。 $i, j$  のパーソナル・スペース円の半径をそれぞれ  $c_i r_i, c_j r_j$  とすると、 $i, j$  が衝突する (つまりパーソナル・スペースが交わる) ということは、 $t$  についての 2 次方程式

$$\{(x_i + u_i t) - (x_j + u_j t)\}^2 + \{(y_i + v_i t) - (y_j + v_j t)\}^2 = (c_i r_i + c_j r_j)^2 \quad (23)$$

$$(u^2 + v^2)t^2 + 2(xu + yv)t + (x^2 + y^2 - c^2 r^2) = 0 \quad (24)$$

が  $t > 0$  で解を持つことと同値である。ただし、 $x = x_j - x_i, y = y_j - y_i, u = u_j - u_i, v = v_j - v_i, cr = c_i r_i + c_j r_j$  としている。式 (24) における判別式を  $D$  とすると、

$$\begin{aligned} D/4 &= (xu + yv)^2 - (u^2 + v^2)(x^2 + y^2 - c^2 r^2) \\ &= c^2 r^2 (u^2 + v^2) - (xv - yu)^2 \end{aligned} \quad (25)$$

これが負になるように歩行者  $i$  は速度ベクトルを変化させていく。

また歩行者  $i$  は、速度平面上での歩行者  $j$  との衝突領域を求める必要がある。そこで  $D = 0$  とおくと、

$$m = \frac{v}{u} = \frac{xy \pm cr \sqrt{x^2 + y^2 - c^2 r^2}}{c^2 r^2 - x^2} \quad (26)$$

となる。これは衝突領域の境界の傾きを表している。式 (26) の根号の中は、歩行者  $i$  と  $j$  のパーソナル・スペース同士が重なっていないことが仮定されているので、非負となる。よって以下のような境界の式を得る。

$$v_i = m(u_i - u_j) + v_j \quad (27)$$

それぞれの位置を  $I, J$  とすると、実際に求めるアルゴリズムは以下ようになる。

1.  $I$  の位置を  $J$  の速度で単位時間移動させ、 $I'$  とする
2.  $J$  の単位時間後の位置  $J'$  を考える
3.  $J'$  を中心とした半径  $cr$  の円を考える
4.  $I'$  から  $J'$  を中心とした円に接線を引く (式 (27) に相当)
5. 接線で囲まれた図 30 の網かけ部分が衝突領域 (便宜上、境界上は含まないものとする)

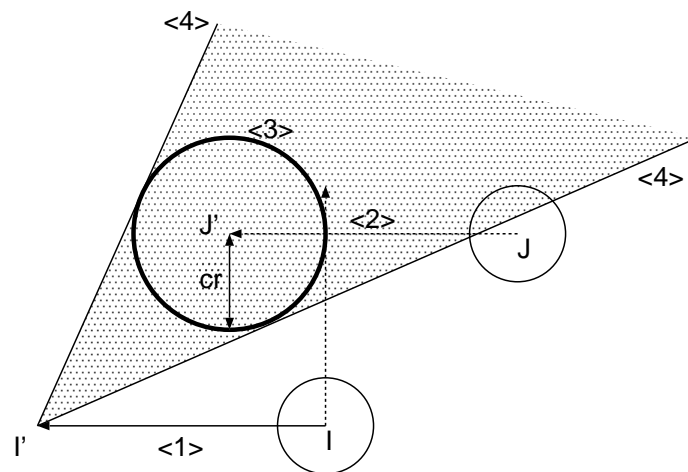


図 30: 衝突領域の求め方

ここで求めた領域は、歩行者  $i$  が単位時間にそこに進むといつか歩行者  $j$  と衝突することを表している。この作業を視野に入る全ての歩行者に対して行ない、それぞれの衝突領域を合成することによって最終的な衝突領域を得る。

### B.3 歩行可能速度ベクトル領域

歩行者が単位時間に歩くことができる範囲を歩行可能速度ベクトル領域と呼ぶ。実際には現地地点  $O$  と最大歩行速度で歩行した場合の単位時間後の地点  $B$  を直径とした円の内部がそれにあたるものとする。

また歩行のしやすさを表すポテンシャルを考え、パラメータ  $s$  を導入する。標準歩行速度で歩行した場合の単位時間後の地点を  $A$  とし、 $O(s=0)$ 、 $A(s=1)$ 、 $B(s=k)$  のように定める。このとき以下のアルゴリズムで図 31 のような図が描ける。

1.  $O$  と  $B$  との midpoint  $C(s=0.5k)$  を考える
2.  $O$  と  $C$  の距離  $R$  を半径として  $C$  を中心とした円を描く (この円周内が歩行可能速度ベクトル領域)
3.  $C$  で最大半径  $R$ 、 $A$  で最小半径  $0$  となるような半径の一次式  $r(s)$  を導く
4. 線分  $AC$  上の点  $s$  を中心に半径  $r(s)$  の円を描く

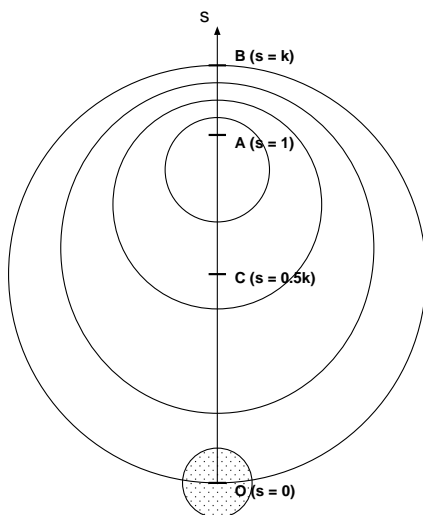


図 31: ポテンシャル円

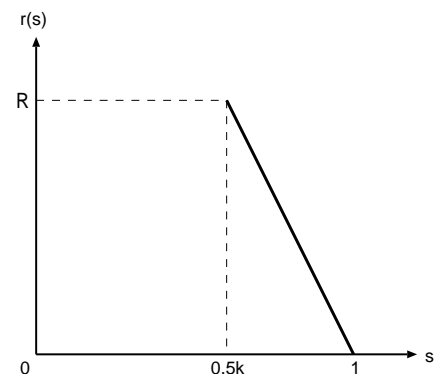


図 32: ポテンシャル円の半径のグラフ

実際  $r(s)$  は以下の式で与えられ、グラフを描くと図 32 のようになる。

$$r(s) = \frac{R}{1 - 0.5k}(1 - s) \quad (0.5k \leq s \leq 1) \quad (28)$$

こうして描かれた同一円周上のポテンシャルは一定となっている。

### B.4 最適速度ベクトル

各歩行者は非衝突領域内で最大ポテンシャルの速度ベクトルを最適速度ベクトルとして選択する。全ての歩行者が最適速度ベクトルを選択した後、シミュレーション・クロックである  $\Delta t$  だけこの速度で歩行する。これを繰り返すことで一連の歩行挙動が得られるのである。