

# 階層的な経路選択行動を考慮した動的な歩行者交通流モデル<sup>1</sup>

## Dynamic Pedestrian Modeling Considering Hierarchical Route Choice Behavior<sup>1</sup>

浅野美帆<sup>2</sup>・桑原雅夫<sup>3</sup>・田中伸治<sup>4</sup>・Agachai SUMALEE<sup>5</sup>・Edward CHUNG<sup>6</sup>

By Miho ASANO<sup>2</sup>・Masao KUWAHARA<sup>3</sup>・Shinji TANAKA<sup>4</sup>・Agachai SUMALEE<sup>5</sup>・Edward CHUNG<sup>6</sup>

### 1. はじめに

本研究は、鉄道駅等の施設での歩行者交通に対する施策の評価ツールとして、動的な歩行者交通流モデルを構築することを目的とする。

近年、交通計画における関心は、車両を中心としたものから歩行者を中心としたものへと移行しつつある。歩行者空間の重要性への見直しから、バリアフリー対策等さまざまな施策が提案されてきている。しかし、歩行者への交通施策の評価指標、評価のための手順は確立されていないのが現状である。

鉄道駅やイベント会場など、歩行者の交通量が多い場所では、交通流の到着パターンを考慮したうえで待ち行列延伸・解消状況、サービスレベルを評価する動的な解析手法が必要である。

歩行者の移動特性のうち、自動車交通と大きく異なるのは以下の3点といえる。

- ・ 歩行者は車道・車線による制約を受けず、任意の平面を自由に移動することができる。
- ・ 目的や年齢等の歩行者属性により、流動特性・経路選択特性は大きく異なる。
- ・ 歩行者属性によってはODが必ずしもあらかじめ定められておらず、周辺の環境に応じて時々刻々と目的地を変更しうる。

本稿では、上記のうち最初の2点を考慮し、ODが比較的明確に与えられている歩行者交通を取り扱う。

また、乗換駅における歩行者交通は、乗換駅の移動コスト改善によりそこに到着する歩行者の需要が変化するなど、より広範囲の交通行動にも影響すると考えられ

1キーワード：歩行者、シミュレーション、経路選択

2学生員、工修、東京大学大学院工学系研究科

(東京都目黒区駒場4-6-1、

TEL03-5452-6419、FAX03-5452-6420)

3正員、Ph. D.、東京大学国際産学協同研究センター

4正員、工修、東京大学生産技術研究所

5非会員、Ph. D.、Inst. for Transport Studies, Univ. of Leeds

6非会員、Ph. D.、Swiss Federal Inst. of Technology, Lausanne

る。本研究で提案するモデルは、広域の公共交通・自動車のネットワークで適用されるモデルと相互的にデータをやり取りすることが可能なデータ構造を備えることで、これまでに広域空間ネットワークで「乗換コスト」として単純に評価されてきた部分の補完も目指している。

### 2. 歩行者モデルのフレームワーク

#### (1) 既存の歩行者モデル

既存のモデルにおける経路選択は、歩行者空間上にノードとリンクを設定し、既存のネットワークモデルを用いるもの<sup>1)</sup>や、コストポテンシャルによって歩行者の移動方向を決定するもの<sup>2)</sup>がある。前者のモデルはネットワークモデルの手法をそのまま適用できることが利点であるが、歩行者の行動は必ずしもネットワークに沿うものではないため、比較的オープンな場所において表現できる選択行動に制限がかかることが問題点となる。また、後者のモデルには歩行者の行動空間の制限はないが、歩行者の移動方向が確定的に決まってしまう、選択行動のばらつきを考慮することができない。

既存の流動モデルは、個々の人間の挙動を詳細に表現するマイクロモデル<sup>3)</sup>と、全体の流量をマクロに扱うモデル<sup>4)</sup>の2種類に分けられる。マイクロモデルでは、歩行者の追従挙動、追い越し行動など多くの詳細な行動を記述する必要があるが、本研究で対象とするような比較的大きな空間内の流動を評価する際には、個々の詳細な挙動にまでさかのぼることは必ずしも重要ではなく、むしろ全体としての流動を捉えることが必要と考える。したがって、本研究では個々の挙動よりもマクロ的な流動を適切に表現するモデルを構築する。

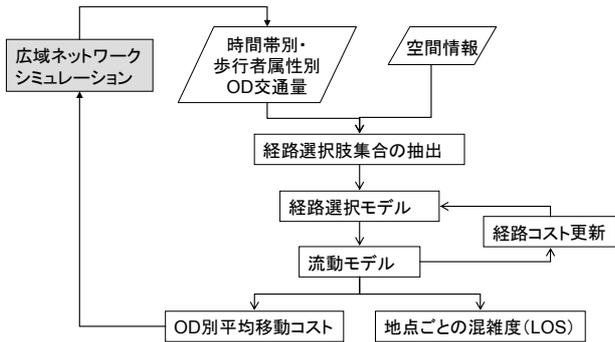
#### (2) 本モデルのフレームワーク

本モデルは、歩行者の経路選択と交通流動の2つのサブモデルからなる。経路選択モデルで配分される交通量を流動モデルで流し、得られた旅行時間を元に経路コストを更新していく。本モデルでは歩行者空間をノードとリンクからなるネットワークで記述するのではなく、後述する「サブエリア」の集合として記述することで、リンクに制限されない確率的選択行動を実現している。

経路選択サブモデルは、歩行者の「大まかな」経路選択行動を扱うモデルと、さらに詳細な移動軌跡の選択モデルとに分けられる。なお、本モデルでは歩行者は意思決定時刻における全対象区間の経路コストに基づいて、経路を決定すると仮定する（DUO）。

交通流動サブモデルにおいては、経路選択行動モデルで求められた各経路の選択確率と、より詳細な移動方向を基に、所与の交通量を対象とする空間に流し、旅行時間等の状態量を決定する。

また本モデルは、広域的な他の交通機関を対象とするネットワークモデルと相互にデータのやり取りが可能なデータ構造を持つものとする。

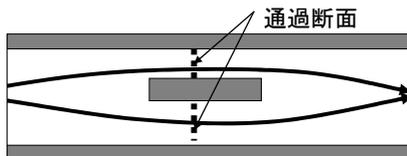


図一1 歩行者動的モデルのフレームワーク

### 3. 経路選択モデル

#### (1) 経路選択枝集合の抽出

オープンスペースにおいて、歩行者はほぼ無限の経路を選択しうる。しかし、実際に歩行者が知覚する経路は無限ではなく、ある限られた数の経路である。本研究では、歩行者は2つの障害物の間にある、通過すべき断面の順序によって経路を認識している、と考える。例えば、図一2のような通路の中心に障害物がある状態において、歩行者の経路選択行動は障害物の上側を通過するか、下側を通過するかのいずれかであろう。この選択行動は、図一2に設定した上下いずれの断面を通過するかの選択行動と言い換えることができる。逆に、歩行者は上側の断面を通過する任意の軌跡について、同じ1つの経路とみなしているとも言える。

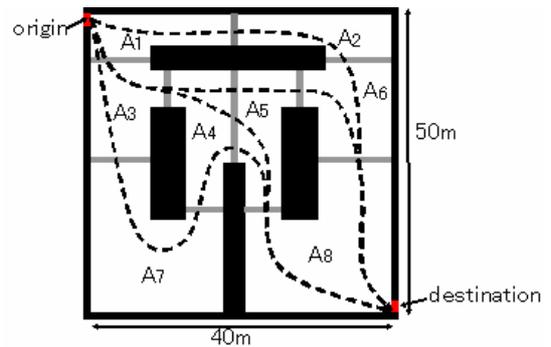


図一2 通路における経路選択行動

より一般的に経路選択のパターンを抽出するために、対象となる空間を、壁などの障害物と障害物間の断面とで区切られた「サブエリア」の集合で形成されていると

考える。図一3の $A_i$ はサブエリアを示しており、サブエリアは黒色の障害物と灰色の境界で仕切られている。

経路選択はサブエリア単位で行われる。図一3の例



図一3 経路選択枝集合の例

では、 $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_6 \rightarrow A_8$ 、 $A_1 \rightarrow A_3 \rightarrow A_4 \rightarrow A_5 \rightarrow A_8$ などが経路の選択枝となる。2つの隣接するサブエリアがただ1つの境界で接続されると仮定すると、通過する境界はサブエリアの組合せにより一意に決定する。また、各経路内での細かい移動軌跡は、その経路内で移動コストが最小となるよう決定する。

サブエリアの分割方法については、2つの隣接するサブエリアがただ1つの境界で接続されていること、境界同士が交わったり接したりしないこと、サブエリア内はすべて歩行可能空間であること（障害物を中に含まない）、を満たしていればよい。ただし、サブエリアの個数が多くなればなるほど、経路選択枝も多くなるため、分割する断面の数は極力小さくすべきである。

#### (2) 経路選択モデル

各歩行者は、(1)で抽出した経路選択枝集合の中から、各経路の移動コストに基づいて経路選択を行っていく。(1)の経路選択枝集合はサブエリアの通過順序を示しているだけなので、サブエリア単位での経路選択枝が同じでも、エリア内部で歩行者が実際に取りうる軌跡は数多く存在する。ここでは簡単に、各経路の移動コストはその経路中の最短軌跡の移動コストで表されると考えよう。

出発地 $r$ 、目的地 $s$ を持つ歩行者の、時刻 $t$ における経路 $k$ 中の最短軌跡における移動コストを $TC_k^{rs}(t)$ とする。

各経路における認知コストの誤差が独立なガンベル分布に従う場合、経路の選択確率は、 $\theta$ を選択確率パラメータとしたロジットモデルで与えられる。

$$\Pr(R_{rs}^k(t)) = \frac{\exp(-\theta TC_{rs}^k(t))}{\sum_k \exp(-\theta TC_{rs}^k(t))} \quad (1)$$

では、 $TC_k^{rs}(t)$ は具体的にどのようにして求められ

るのだろうか。本研究では、図-4のようにサブエリアをセルに分割して考える。各セルの中心から隣接する8方向のセルの中心に向かうリンクを設定し、各リンク $a$ について時間帯ごとのリンクコスト $c_a(t)$ を与える。

経路 $k$ で通過するサブエリアに含まれるリンクの集合を $A_k$ とすると、経路コスト $TC_k^{rs}(t)$ は、

$$TC_k^{rs}(t) = \min_h \left( \sum_{a \in A_k} \delta_{a,h}^{rs}(t) c_a(t) \right) \quad (2)$$

ただし、 $\delta_{a,h}^{rs}(t)$ は、対象とする軌跡 $h$ がリンク $a$ を通過する場合1、そうでない場合0となる。

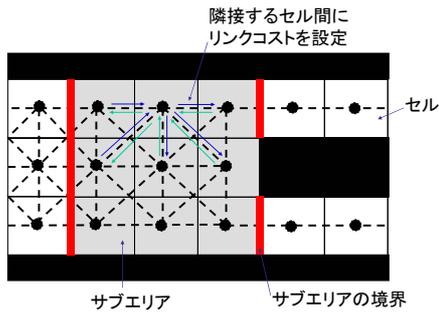


図-4 セル間の移動コスト計算

経路コストはサブエリア単位で単独に算出するのではなく、あくまで経路全体としての最小コストを求めている点に注意する。これは、サブエリア内の断面間の最短軌跡がかならずしも経路全体の一部としての最短軌跡と一致しないためである。

サブエリア単位で経路の選択枝を集約することにより、確率的な経路選択が可能となっている。ノードとリンクからなるネットワークモデルでは、歩行者の移動経路はノードの取り方によって異なってしまう。特にオープンスペースではこれが顕著となり、ノードの設定方法が問題となる。本稿のモデルは歩行空間全体を対象とした経路選択を行うため、断面の設定方法によらず同じ結果を再現することができる。

### (3) 経路コストの要因

経路コストの要因としては、flow independentなコストとして、歩行距離、視距や目的地の方向、急な方向転換の回数、壁からの距離、階段の上下移動が考えられ、これらは空間の情報から事前に与えられる。また、flow dependentなコストには、旅行時間や密度が挙げられ、こちらは後述する流動モデルから求められる。本モデルでは、通勤客や買い物客、高齢者といった属性別に経路コストを設定できるシステムとする。

### (4) 経路コストの計算例

図-3の空間を用いて、歩行距離のみを移動コストとし

た場合の計算例を以下に示す。図-5の赤線はそれぞれ左上から、経路① $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_6 \rightarrow A_8$ 、② $A_1 \rightarrow A_3 \rightarrow A_4 \rightarrow A_5 \rightarrow A_6 \rightarrow A_8$ 、③ $A_1 \rightarrow A_3 \rightarrow A_4 \rightarrow A_5 \rightarrow A_8$ 、④ $A_1 \rightarrow A_3 \rightarrow A_7 \rightarrow A_4 \rightarrow A_5 \rightarrow A_8$ における最短軌跡を示している。また、空間内の色は経路コストの等高線を示している。このとき、それぞれの経路のコスト=移動距離は表-1のように表される。このようにして得られたコストを確率的な利用者選択モデルに適用していく。

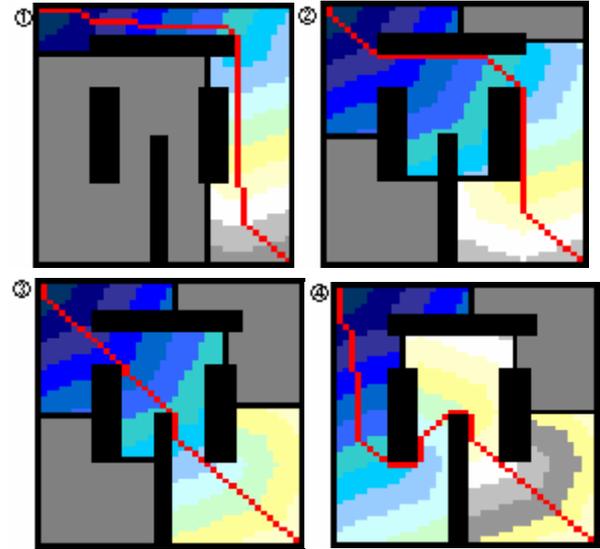


図-5 各経路における最短軌跡の算出例

表-1 各経路の最短移動距離

経路	①	②	③	④
移動距離(m)	79	74	64	87

## 4. 交通流動モデル

### (1) 基本モデル

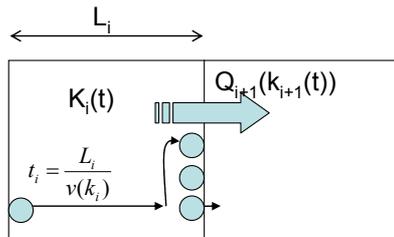
歩行者の流動では、①異なる方向への歩行者流動、②属性の異なる歩行者の流動、を同時に表現することが必要である。

本モデルでは、経路選択モデルで使用したのと同じセルを基本単位として隣接するセルとの間で流量をやり取りする。セルの形状は、一般的な建物の形状に沿うように正方形を基本としている。セルを基本単位とした流動モデルにブロック密度法<sup>3)</sup>があるが、セルの大きさは単位時間あたりに自由流速度で歩行する距離に等しくなければならないという制約条件がある。この条件下では、属性により自由流速度の異なる歩行者群や、正方形の対角線上を移動するなどセル内の移動距離の異なる歩行者群を同時に扱うことは難しい。本モデルでは各歩行者がセル間の移動を行う時刻を保持しておくことで、これら異なる歩行者群の移動を表現する。

セルは方向別属性別の交通量(歩行者数)と、それ

それぞれの歩行者がセルに流入した時刻を保持している。時刻  $t$  にセル  $i$  に流入した歩行者は、その歩行者属性の速度—密度関係から得られる歩行速度  $v(k_i(t))$  でセル内を移動していく。

この歩行者は流入時刻から  $L_i/v(k_i(t))$  秒後に、下流セルの容量  $Q(k_{i+1}(t))$  に従ってセル  $i$  からセル  $i+1$  に移動する。もし下流側の容量を超えて歩行者が到着している場合には、流出可能な歩行者の待ち行列群にFIFOに基づき格納された上で、下流セルの容量に応じて順次流出していく。



図—6 歩行者流動モデル

### (2) 方向別・属性別を考慮した流動モデル

実際の歩行者速度は、セル内の方向別属性別交通量により決定される。このとき、各方向各属性別々に算定されるのではなく、歩行者速度は全方向全属性を考慮した関数となる。これは、例えば直交や対面する2つの交通流においては、個人の希望する方向の交通量だけでなく、セル内の進行方向と直交・対面方向の交通量比率が速度に大きく影響する<sup>6)</sup>ためである。同様に、高齢者比率が多いなど、同じ方向でも自由流速度の異なる歩行者流が混在している場合も、自由流速度の大きい歩行者流は速度の小さい交通流に影響を受ける。方向別属性別それぞれに設定した歩行者速度を用いて、(1)の手順を繰り返していく。

### (3) 歩行者の移動方向の決定方法

ある時刻にセルに流入した歩行者の移動方向は、その瞬間の移動コストを用いた経路別の最短軌跡方向である。最短軌跡の方向は、3(2)で示した経路ごとの最短軌跡算出モデルから得られている。この移動方向は、1秒～数秒程度の短い時間で更新されていく。

## 5. 広域ネットワークモデルとの接続

ここで提案しているモデルはあくまで歩行者を対象としている。しかし、駅空間におけるサービスレベルは個人の鉄道利用行動など、より上位の意思決定に影響を及ぼしている。また逆に、鉄道の新線開通、ロードプライシングなど広域を対象とした施策は、駅空間を利用する歩行者の交通量に影響を与える。

このような広域の状況との相互作用を考慮するため、本モデルのインプットとなるOD交通量やアウトプットとしての駅利用コストのデータ構造は、公共交通や道路交通を対象としたシミュレーションと共有可能な形式にしていく予定である。

## 6. おわりに

本稿では、駅構内等混雑する施設における、動的な歩行者交通流を表現するためのモデルのフレームワークを示した。本モデルは完全情報下の歩行者を対象としたものであるが、意思決定のタイミングを考慮する、異なる経路選択要因を設定するなどにより、さまざまな歩行者属性に対して適用ができると考えられる。

また、歩行空間における人の状態には、歩行だけでなく、待ち合わせをする、サービスを受けるための待ち行列に並ぶといった状態が考えられる。待ち行列の形成は施設内のサービスレベルに大きな影響を及ぼすと予想され、今後組み込んで行くべき課題であろう。

今後、経路コストや複数の歩行者属性を含むセルの速度関数といった各モデルの詳細な記述方法の検討や、パラメータの調整、実データに基づく性能検証を行っていく。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会の支援により行われている。

### 参考文献

- 1) Gloor, C. et al: Hybrid techniques for pedestrian simulations, 4<sup>th</sup> Swiss transport research conference, 2004.
- 2) Hoogendoorn, S.P. and Bovy, P.: Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models, Transportation Research part B, Vol. 38, pp.169-190, 2004.
- 3) Helbing, D. et al: Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation simulations, Pedestrian and evacuation dynamics, pp.21-58, Springer, 2002.
- 4) 安藤恵一郎ら：旅客流動シミュレーションシステムの改良，鉄道総研報告，Vol. 5, No. 8, pp. 3-10, 1991.
- 5) 桑原雅夫，吉井稔雄，堀口良太：ブロック密度法を用いた交通流の表現方法について，交通工学，Vol. 32, No. 4, 1997.
- 6) Lam, W.H.K. et al: A generalized function for modeling bi-directional flow effects on indoor walkways in Hong Kong, Transportation research part A, Vol. 37, pp. 789-810, 2003