

群集行動シミュレータを用いた自転車・歩行者空間の定量的評価による設計手法の提案

川崎 順二¹・水口 尚司²

¹株式会社ニュージェック 道路グループ (〒531-0074大阪府大阪市北区本庄東二丁目3番20号)

²株式会社ニュージェック 道路グループ (〒531-0074大阪府大阪市北区本庄東二丁目3番20号)

本研究では、歩行者・自転車の群集行動シミュレータを開発するとともに、歩道整備事業における幅員設定や自転車挙動の評価を例に、空間設計への適用を想定した幾つかの定量的評価指標を設定し、これらの数値が得られる挙動観測やシミュレーションを実施して交通円滑性や交通安全性の評価を試みた。その結果、歩行速度、心理的接触率、回避行動における側方間隔等を定量的に説明できた。

キーワード 群集行動シミュレータ、歩行者・自転車モデル、挙動観測、定量的評価

1. 研究の背景および目的

自転車や歩行者の適切な空間を確保することは、通行者の快適性、円滑性および交通安全性を確保する上で重要である。また、このような場所では、既往の設計基準や経験則に基づく標準的な幅員を適用するだけでは必ずしも十分でない場合もある。例えば社会実験で検証を行う方法があるが、費用、人数、場所、時間等の制約により、容易には実施しがたい。以上から、要求される通行環境を確保した歩行空間の計画を効率化できるシミュレーションモデルや、定量的評価に基づく設計手法があれば、事業や調査・設計への投資効果の最大化につながる。

本研究は、通路幅や路上施設の配置を変化させた様々なケースについて、歩行者や自転車の速度、密度、及び衝突回避行動等、細かな群集行動の挙動に関する数値を得ることができる個別要素法型のシミュレーターを開発するとともに、これを用いた定量的評価による自転車・歩行者空間の設計を行うことを提案するものである。

2. 歩行者・自転車モデルの概要

2.1 歩行者モデル¹⁾

2.1.1 基礎方程式

歩行者の挙動は、並進・回転の運動方程式から予測される。人要素 i の並進・回転の運動方程式は、

$$m_{pi} \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{F}_{mi} + \mathbf{F}_{ci} + \mathbf{F}_{ei} \quad \mathbf{I}_{pi} \dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \mathbf{T}_i$$

である。ここに、 m_{pi} : 人要素の質量、 \mathbf{v}_i : 歩行速度、

“ $\dot{\cdot}$ ”: 時間微分、 \mathbf{F}_{mi} : 自律歩行力、 \mathbf{F}_a : 接触力、 \mathbf{F}_a : 追従・衝突回避力、 \mathbf{I}_{pi} : 慣性モーメント、 $\boldsymbol{\omega}_i$: 回転各速度、 \mathbf{T}_i : トルクである。人要素は、シリンダーとしてモデル

化され、その質量と慣性モーメントは、

$$m_{pi} = \varepsilon_{pi} \sigma_{pi} B_{pi} \frac{\pi d_{pi}^2}{4}; \quad \mathbf{I}_{pi} = \varepsilon_{pi} \sigma_{pi} B_{pi} \frac{\pi d_{pi}^4}{32};$$

で与えた。ここに、 σ_{pi} : 人要素の密度、 B_{pi} : 人要素の高さ、 d_{pi} : 人要素の直径、 ε_{pi} : シリンダーと実際の人の体積の差を補正するパラメータである。人要素の位置、速度および角速度は陽的に追跡される。計算時間刻み Δt ($=0.002$ s) は数値的安定性に配慮して決定した。

2.1.2 相互作用力

図-1に個々の人要素に作用する物理接触および心理接触の発現領域を示す。この扇型の中心角は人の視野角であり、人要素の進行方向に対して $\pm 60^\circ$ である。

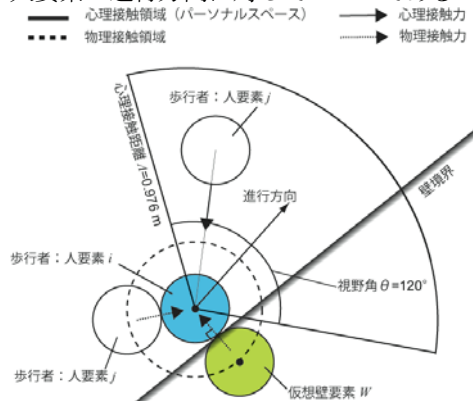


図-1 物理接触および心理接触の発現領域
物理接触力は、人要素 i, j あるいは人要素 i と仮想壁要素 W が以下の条件を満足するときに発現する。

$$|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j| \leq \frac{d_{pi} + d_{pj}}{2}; \quad |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_W| \leq \frac{d_{pi} + d_W}{2};$$

ここに, \mathbf{r}_i : 人要素 i の位置ベクトル, \mathbf{r}_p : 仮想壁要素 W の位置ベクトル, d_p : 仮想壁要素径である.

なお, 仮想壁要素 W は人要素 i とそれらの中心座標を結ぶ直線が壁境界線と直角になるように配置される. 心理接触力は, 人要素 i, j が以下の条件を満足するときに発現する.

$$|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j| \leq A$$

ここに, A : 心理接触距離である. この心理接触距離は, 清野ら²⁾が観測した信号待ちの歩行者間の平均距離 (パーソナルスペース) を採用した. 上記の物理接触力と心理接触力は, スプリング- ダッシュポット系を基礎とするVoigtモデルから見積もられる.

また, Voigtモデルを用いて接触力を評価した研究は多く, その適用性が確認される^{2), 3), 4), 5)}.

なお, 物理接触力は, 「人- 人」および「人- 壁」に対して作用するが, 心理接触力は, 「人- 人」の間のみ作用する. 人要素 i へネットの作用力は以下のように記述される.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{ci} &= \mathbf{F}_{d(p/p)i} + \mathbf{F}_{d(W/p)i} + \mathbf{F}_{psi} \\ \mathbf{F}_{d(p/p)i} &= \sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}; \mathbf{F}_{d(W/p)i} = \sum_W \mathbf{f}_{iW}; \mathbf{F}_{psi} = \sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{psij} \\ \mathbf{T}_i &= \frac{1}{2} \left\{ \sum_{j(\neq i)} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \times \mathbf{f}_{ij} + \sum_W (\mathbf{r}_W - \mathbf{r}_i) \times \mathbf{f}_{iW} \right\} \end{aligned}$$

ここに, $\mathbf{F}_{d(p/p)i}$: ネットの人要素との物理接触力, $\mathbf{F}_{d(W/p)i}$: ネットの仮想壁要素との物理接触力, \mathbf{F}_{psi} : ネットの心理接触力, \mathbf{f}_{ij} : 人要素 i, j 間の物理接触力, \mathbf{f}_{iW} : 人要素 i と仮想壁要素 W 間の物理接触力, \mathbf{f}_{psij} : 人要素 i, j 間の心理接触力である. なお, $\mathbf{f}_{ij}, \mathbf{f}_{iW}$ および \mathbf{f}_{psij} は,

$$\mathbf{f}_{com.} = \left[\frac{(\mathbf{e}^n)^{pre} + k^n \Delta r^n \mathbf{n} + c^n \Delta t^n \mathbf{n}}{\mathbf{e}^n} + \frac{(\mathbf{e}^t)^{pre} + k^t \Delta r^t \mathbf{t} + c^t \Delta t^t \mathbf{t}}{\mathbf{d}} \right]_{com.}$$

$$= \mathbf{f}^n + \mathbf{f}^t; \mathbf{f}^n = \mathbf{e}^n + \mathbf{d}^t; \mathbf{f}^t = \mathbf{e}^t + \mathbf{d}^n;$$

$$\Delta r^n = [\mathbf{r}_{target} - \mathbf{r}_i]_{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{n}; \Delta r^t = [\mathbf{r}_{target} - \mathbf{r}_i]_{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{t}; d = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{target}|$$

$$\mathbf{n} = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{target}) d = (n^1, n^2) \quad \mathbf{t} = (-n^2, n^1)$$

$$\Delta v^n = [\mathbf{v}_{target} - \mathbf{v}_i] \cdot \mathbf{n}; \Delta v^t = [\mathbf{v}_{target} - \mathbf{v}_i] \cdot \mathbf{t}$$

より与える.

ここに, $\mathbf{e}^n, \mathbf{e}^t$: それぞれ法線および接線方向の弾性スプリング (弾性定数: k^n, k^t) による作用力, $\mathbf{d}^n, \mathbf{d}^t$: それぞれ法線および接線方向のダッシュポット (粘性係数: c^n, c^t) による作用力, $\mathbf{f}^n, \mathbf{f}^t$: それぞれ法線および接線方向の作用力, \mathbf{n} : 人要素 i の中心から接触対象要素の中心に向かう単位ベクトル, pre : 前ステップを示す添字, \mathbf{r}_{target} : 接触対象の要素の位置ベクトルである.

また, $com.$ には, $ij, iW, psij$ が該当し, それぞれの添字に対応する $target$ は人間要素 j , 仮想壁要素 W , 人間要素 j である.

本研究では人要素間に家族, 友達などの行動を示すグループ効果は考慮していない. 換言すると, 人要素は独

立した歩行として取り扱い, 法線方向には引張りに抵抗しないジョイント:

$$\mathbf{f}_{com.} = 0.0 \quad \text{then} \quad \mathbf{e}^n < 0.0$$

が導入されている. また, 接線方向には一定の限界を超える力が作用すると滑動するジョイント:

$$|\mathbf{e}^t| > \mu \mathbf{e}^n \quad \text{then} \quad \mathbf{f}^n = \mu \cdot \text{SIGN}(\mathbf{e}^n, \mathbf{e}^t)$$

$$\text{SIGN}(a, b) = \begin{cases} |a| & \text{when } b \geq 0 \\ -|a| & \text{when } b < 0 \end{cases}$$

を配置した. ここに, μ : 接触点における動摩擦係数である.

2.1.3 自律歩行力

本研究では人要素は, 自由歩行では平衡歩行速度で運動し, 歩行速度が減速した場合, 自律歩行力:

$$\mathbf{F}_{mi} = m_{pi} \mathbf{a}$$

で加速される. ここに, \mathbf{a} : 加速度ベクトルである.

運動方程式の数値積分より計算される歩行者速度は, 歩行者の混雑程度 (歩行者の数密度) との間に相関が確認されており, 線形近似式より与えられる^{6), 7)}.

本研究では, 平衡歩行速度の最大値 v_{max} は, 視認領域における他の人間要素の数密度 c_k と人間要素の存在場所の環境 (例えば, 階段) に依存したパラメータ ϕ より決定した.

$$v_{max} = v_{limit} (1 - \phi) - \gamma \cdot c_k$$

ここに, v_{limit} : 自由歩行時の平衡歩行速度の大きさ,

γ : 混雑が速度に及ぼす影響を示すパラメータである.

パラメータは, シミュレーションで対象とする歩行環境に配慮して設定される.

2.1.4 追従・衝突回避力 (予測回避行動)

歩行者は, 近い将来の歩行環境を予測しながら歩行速度を決定すると考えられる. 図-2 に示す追従・回避領域内の他の人要素 j が Δt_f 後に進むと予測される位置情報を基に追従・衝突回避力:

$$\mathbf{F}_{ci} = \begin{cases} m_i \sum_{j(\neq i)} \kappa \frac{(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \mathbf{e}_{vi}}{\Delta t_f} (\hat{\mathbf{e}}_{ij} \times \mathbf{e}_{vi}) \times \mathbf{e}_{vi} & \text{when } \hat{\mathbf{e}}_{ij} \times \mathbf{e}_{vi} \neq 0 \\ m_i \sum_{j(\neq i)} \kappa \frac{(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \mathbf{e}_{vi}}{\Delta t_f} (\mathbf{e}_x \times \mathbf{e}_y) \times \mathbf{e}_{vi} & \text{when } \hat{\mathbf{e}}_{ij} \times \mathbf{e}_{vi} = 0 \end{cases}$$

$$\kappa = \alpha \frac{\cos \hat{\phi}_{ij}}{|\hat{\mathbf{r}}_{ij}| / A_a}; \cos \hat{\phi}_{ij} = \mathbf{e}_{vi} \cdot \hat{\mathbf{e}}_{ij}$$

$$\hat{\mathbf{r}}_{ij} = \hat{\mathbf{r}}_j - \mathbf{r}_i; \hat{\mathbf{r}}_j = \mathbf{r}_j + \mathbf{v}_j \Delta t_f$$

が算定される. ここに, N_k : 追従・回避領域に含まれる他の人要素の総数, Δt_f : 予測時間 (=2.0s),

\mathbf{e}_{vi} : \mathbf{v}_i 方向の単位ベクトル $\hat{\mathbf{e}}_{ij}$: $\hat{\mathbf{r}}_{ij}$ 方向の単位ベクトル $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$: x および y 軸方向の単位ベクトル, α : 回避力のレベルに関する係数, $\hat{\mathbf{r}}_j$: 予測後の人要素 j の位置ベクトルである.

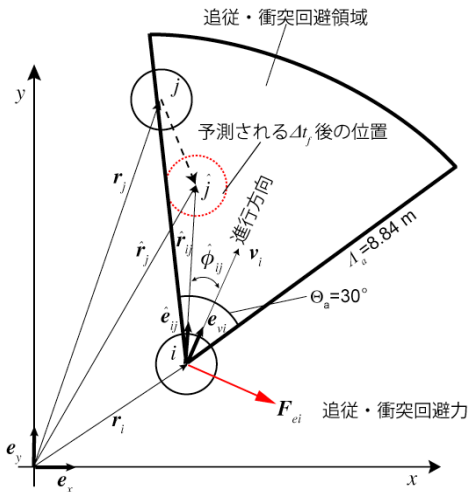


図-2 追従・衝突回避力発生領域

2.2 自転車モデル⁸⁾

2.2.1 基礎方程式

自転車モデルの基礎方程式は歩行者のそれと同様である。自転車は、搭乗者と自転車本体を表現するために1つの人要素と3つの自転車本体の要素で構成する。人要素と同じ直径の4つの要素の中心が同一直線上に並ぶように剛体連結して自転車を模擬する。なお、先頭から2番目の要素が搭乗者であるが、搭乗者である人要素の物理接触、心理接触や追従・回避の発現領域に、他の歩行者や自転車の要素間が含まれると、物理接触あるいは心理接触、追従・回避挙動に起因した要素間力が発現する。一方、自転車本体の要素については、心理接触力や追従・回避挙動に起因した要素間力は作用せず、物理接触力のみが考慮される。図-3 に搭乗者の要素に作用する心理接触および衝突・追従回避力の発現領域を示す。視野角は自転車の走行速度が歩行者よりも速いため歩行者の半分に設定した。また、追従・回避領域は歩行者モデルと同じく予測回避行動を考慮して設定した。自転車および歩行者の回避開始地点は、自転車の情報認知空間距離と回避開始距離に関する論文を参考とした⁹⁾。

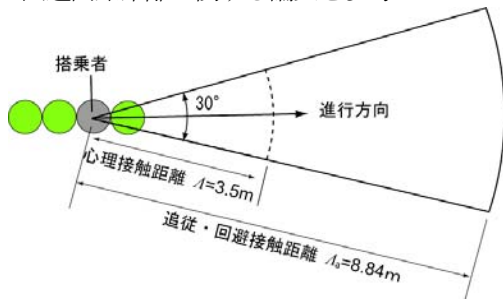


図-3 自転車の心理接触および追従・回避接触領域

2.2.2 剛体連結モデル

自転車構成要素の剛体連結は、Koshizuka ら¹⁰⁾の Passively Moving Solid モデルを用いて、自転車構成要素の重心周りの並進および回転の運動量が保存しつつ自転車構成要素の座標が修正される。具体的な座標修正計算手順は以下の通りである。

まず、時刻 t から Δt 経過時の自転車構成要素の仮速度と仮座標を歩行者と同様の基礎方程式を用いて計算し、

自転車構成要素全体の重心 \mathbf{r}_g と重心の並進速度ベクトル \mathbf{U} 、重心周りでの角速度ベクトル \mathbf{W} を算定する。

$$\mathbf{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{V}_i$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{I}^{-1} \sum_{i=1}^N \mathbf{V}_i \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_g)$$

$$\mathbf{r}_g = \frac{I}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_i ; \mathbf{I} = \sum_{i=1}^N |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_g|^2$$

ここに、 \mathbf{V}_i : 「搭乗者と自転車本体」の各構成要素の仮速度、 \mathbf{r}_i : 「搭乗者と自転車本体」の各構成要素の仮座標、 \mathbf{I} : 「搭乗者と自転車本体」の構成要素の重心周りの慣性モーメント、 N : 「搭乗者と自転車」の構成要素の総数である。次に、並進速度ベクトルおよび角速度ベクトルを用いて、剛体挙動を満足する「搭乗者と自転車本体」の各構成要素 i の移動速度ベクトル \mathbf{V}_{Bi} を求める。

$$\mathbf{V}_{Bi} = \mathbf{U} + (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_g) \times \mathbf{W}$$

また「搭乗者と自転車」の各構成要素 i の位置ベクトルは、

$$\mathbf{r}_i(t + \Delta t) = \mathbf{r}_i(t) + \mathbf{V}_{Bi} \Delta t$$

で修正される。計算が1ステップ進行する都度、「搭乗者と自転車」の各構成要素 i の位置ベクトルも修正される。

3. 歩行者・自転車空間の定量的評価への適用

3.1 歩行者空間における検討

3.1.1 検討対象と検討ケース

シミュレーションを行う領域は、奈良市内の観光地における約200mの交差点間を対象とした。この区間で歩道のない北側に幅員3.0mの歩道整備を行い、かつ歩道のある南側は現況歩道幅員6mから7.5mに拡幅することを想定した(図-4)。検討ケースは、歩道整備有と歩道整備無の2ケースを設定した。通行量や属性は通常時と社会実験時のピーク時間の観測値を用いることとし、歩道整備有のケースが北側3,428人、南側3,309人、歩道整備無のケースが北側2,100人、南側3,567人とした。



検討ケース	有効幅員	
	北側歩道	南側歩道
歩道整備無	0.75m	6.00m
歩道整備有	3.00m	7.50m

図-4 観測場所の様子と検討ケース

3.1.2 通行快適性

北側は歩行者交通量が約1.6倍に増加しているにもかかわらず平均速度は若干上昇しており、歩行空間が広いことため快適に歩行できる南側歩道と同程度の歩行速度となっている。以上から、北側歩道の計画幅員3.0mは機能面で無駄のない計画といえる。図-5に歩行者の平均歩行速度の時系列を示す。さらに、北側の心理接触率は、拡幅前に比べて0.27から0.18と減少している。

よって、北側歩道の整備は、北側を通行する歩行者の快適性の改善に寄与していることを示している。一方、もともと広幅員の南側歩道については、歩行速度、心理接触率のどちらも顕著な差は見られなかった。歩行者の心理的影響を示す心理接触率の時系列を図-6に示す。

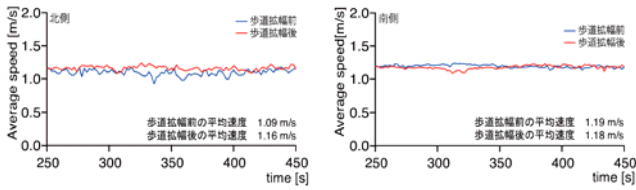


図-5 平均歩行速度の時系列

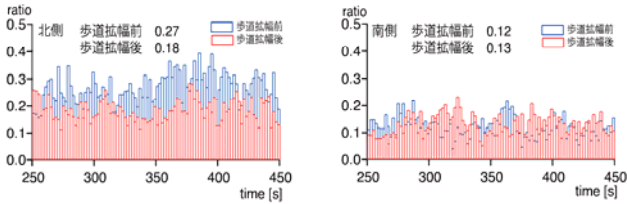


図-6 心理接触率の時系列

3.1.3 交通安全性

現状では北側において路肩から車道にはみ出す歩行者が存在するが、北側歩道が整備されたシミュレーション(図-7)では、視覚的な確認において、歩道内を行き交う歩行者が車道にはみ出すことはなかった。これは、歩行速度の増加や心理接触率の低下といった数値によっても裏付けられる。以上から、歩道有効幅員 3.0mの計画において、交通安全性が改善されるといえる。



図-7 通行状況のアニメーション表示

3.2 自転車空間における検討

自転車空間の妥当性を定量的に評価する上で、本研究では、衝突回避行動における回避時の側方間隔が快適性や交通安全性を定量的に評価するための評価事項のひとつと考え、現地での観測映像から自転車の回避挙動を抽出し、その特徴を把握するとともに、このような検討に自転車・歩行者モデルを適用する上で、一対一(「自転車」対「自転車」の対面回避挙動および「歩行者」対「自転車」の対面回避挙動を対象に再現性の検証を行った。

3.2.1 観測領域と解析対象

自転車交通が非常に多く一般的に存在する形状の大阪市内の歩道を解析対象とした。観測領域は歩道の距離がおよそ 35m、最大歩道幅 4.5m、最小歩道幅 1.5m の区間(図-8)である。観測では様々な回避行動形態を対象に約 400 事例を収集した。この中から自転車同士の回避挙

動と自転車と歩行者の回避挙動を、自転車同士の対面回避で 28、自転車と歩行者の対面回避で 30 抽出し、撮影角度等の補正を加え、0.1 秒毎の画像解析を実施した。



図-8 観測場所の状況と平面図

3.2.2 回避挙動

(1) 回避時の側方間隔の観測結果

回避地点の側方間隔を計測した結果、図-9 に示す軌跡が観測され、「自転車」対「自転車」の対面回避では平均 1.18m、「自転車」対「歩行者」の対面回避では平均 1.20mであった。図-10 には自転車の走行速度の結果も併示するが、いずれの場合も回避時の側方間隔と速度の間には相関性は見受けられず、また、対「自転車」か、対「歩行者」による違いも見られなかった。

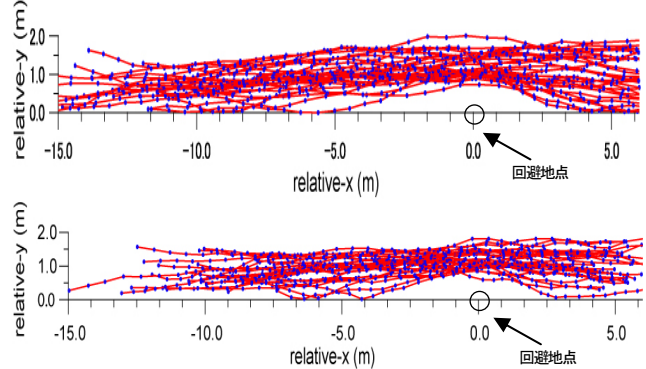


図-9 対面回避挙動軌跡「自転車」対「自転車」(上)
同「自転車」対「歩行者」(下)

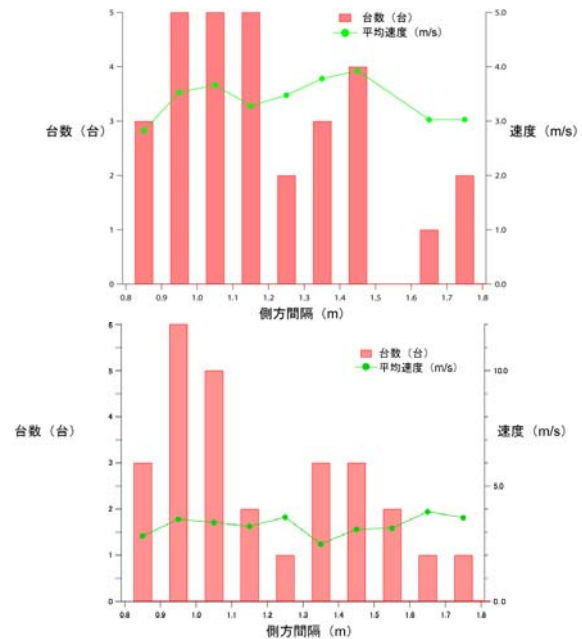


図-10 側方間隔と速度 「自転車」対「自転車」(上)
同「自転車」対「歩行者」(下)

3.2.3 回避挙動のシミュレーションによる再現性

図-11に予測回避行動を取り入れたシミュレーション結果と観測結果の平均的な軌跡を示す。また、図-12にシミュレーション結果のアニメーション表示を示す。自転車や歩行者の回避行動における軌跡の再現性が確認できる。また、図-13に相対速度の推移を示す。改良前のモデルでは心理接触領域に入ると急激な減速が見られるが、改良後のモデルにおいては予測回避行動により回避できており、観測結果に近い結果が得られている。以上から、本研究のモデルを用いて、例えば側方間隔を評価指標とした空間の評価が可能といえる。

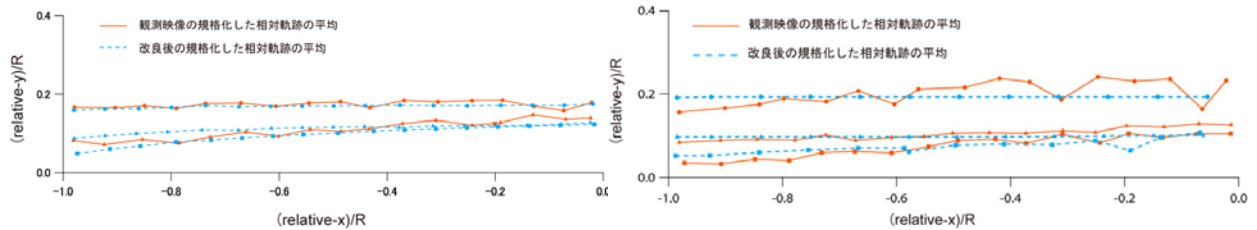


図-11 対面挙動の軌跡「自転車」対「歩行者」(左)「自転車」対「自転車」(右)

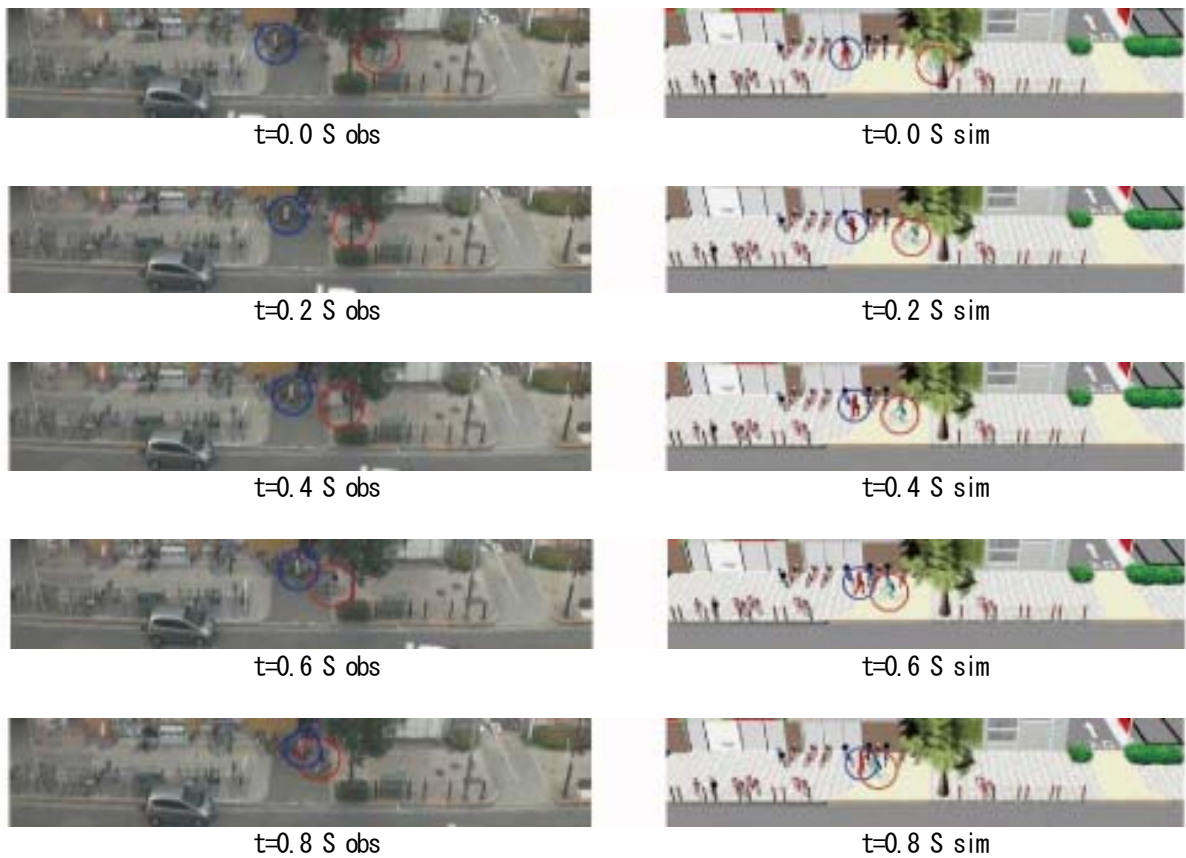


図-12 0.2秒毎の対面挙動の軌跡 (左: 観測画像, 右: シミュレーション)

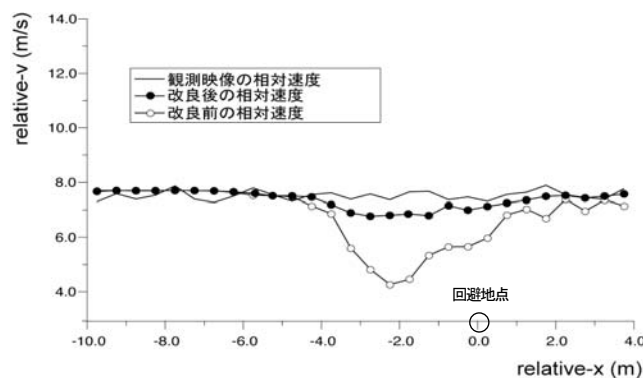


図-13 回避挙動中における平均相対速度の推移

4. 研究の成果と今後の展開

本研究では、歩行者・自転車の群集行動シミュレータを開発し、幾つかの例を対象に歩行者・自転車空間の設計における定量的評価への適用を試みた。

その結果、通行円滑性や交通安全性における機能面については定量的に説明できたが、快適性や交通安全性に関する心理面の評価については、現時点では定性的評価となっている。

実際の設計では、繁華街、通学路、観光地、駅周辺等、様々な場所を扱うため、検討対象の空間について機能面だけでなく、開放感や通行しやすさ等の快適性や防犯上の安心感等の心理面も重視して、適切な評価指標を設定することが必要な場合もあると考えられる。

このような場合、事前に観測とアンケート調査を実施し、歩行者や自転車の密度、速度、側方間隔等の評価指標と通行者が感じる快適性や交通安全性に関する心理的要素との対比を行い、その関係を明らかにした上で、シミュレーション結果のこれらの評価指標の数値と対比することで定量的評価が可能である。

今後は、このような試みについても研究を深めていく所存である。

謝辞: 本研究における群集行動シミュレータの開発や挙動観測にあたり、長年に渡り懇切丁寧にご指導をいただいております京都大学工学研究科社会基盤工学専攻 後藤仁志教授、原田英治准教授に厚く御礼申し上げます。また、本研究の実施に際し、ご理解とご協力をいただいた奈良県様を始め、観測場所の提供等にご協力をいただいた関係者の皆様方に厚く御礼申し上げます。

5. 参考文献

- 1) Gotoh, H., Harada, E. and Andoh, E.: Simulation of pedestrian contra-flow by multi-agent DEM model with self-evasive action model, *Safety Science*, Vol. 50, issue 2, pp. 326-332, 2012.
- 2) 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一: 被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について, 土木学会論文集, No. 537/I-35, pp. 233-244, 1996.
- 3) 後藤仁志, 原田英治, 久保有希, 酒井哲郎: 個別要素法型群集行動モデルによる津波時の避難シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1261-1265, 2004.
- 4) 後藤仁志, 原田英治, 丸山由太, 高橋和秀, 大庭啓輔: 津波防災のための市街地改善計画に対する避難行動シミュレータの貢献, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 1371-1375, 2008.
- 5) 清野純史, 三浦房紀, 八木宏晃: 個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション, 土木学会論文集, No. 591/I-43, pp. 365-378, 1998.
- 6) 小関憲章, 渡部貞清: 群集旅客流の交差, 日本建築学会論文報告集. 号外, 学術講演要旨集(42), pp. 762, 1967.
- 7) 劉建宏, 大枝良直, 角知憲: パーソナルスペースを用いた障害物を回避する歩行者の群集流動, 土木学会論文集D, Vol. 64, No. 4, pp. 513-524, 2008.
- 8) 原田英治, 後藤仁志, 安藤栄祐: 群集歩行シミュレータのための歩行行動モデルの改善, 第 30 回交通工学研究発表会論文集, pp. 333-336, 2010.
- 9) 朝田伸剛, 大佛俊泰: 歩行者空間における歩行者と自転車の回避行動, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp. 41-48, 2000.
- 10) Koshizuka, S., A. Nobe and Y. Oka: Numerical analysis of breaking waves using the moving particles semi-implicit method, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 26, pp. 751-769, 1998.