

二方向交差交通流における 歩行者流動特性に関する基礎的分析

長島 愛¹・井料（浅野）美帆²・大口 敬³

¹非会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）
E-mail:a-naga@iis.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学生産技術研究所講師 生産技術研究所（〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1）
E-mail:m-iryo@iis.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学生産技術研究所教授 生産技術研究所（〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1）
E-mail:takog@iis.u-tokyo.ac.jp

歩行者交通は複数方向に移動する交通が任意の場所で交錯するため、サービスの質を評価する際、交差交通の存在は考慮せねばならない要素たりうるものである。しかし、その影響は今だ未解明の部分が多い。本研究では、歩行者流動実験データを用いて、二方向交差交通流の特性分析を行った。その結果、交差角度によって平均旅行時間が変化することや、歩行者が交差部分を通過する際の横方向位置によって通過しやすさが異なることがわかった。また既存のシミュレーションモデルを用いて交差歩行者流を表現し、上記の知見に関する再現性が不十分であることを指摘して、改善すべき問題点を提示した。

Key Words : pedestrian, bidirectional flow, experimental data, simulation

1. 研究の背景と目的

駅のホームやイベント会場の周辺等、歩行者が集中する場所では渋滞が発生して時に死傷事故を起こすこともあり、歩行者の交通容量を正しく評価し歩行空間を適切に運用することは重要である。一方渋滞が発生していない場合であっても、歩行者同士の動線が絡み合うことで動きづらくなるような状況も発生する。したがって、非渋滞時も含めた交通のサービスの質の評価の評価を行うべきである。

ところで歩行者は自動車と違い移動の自由が高く、交通量を計測するのも困難であることなどから、歩行者交通の研究は自動車のものと比べて未解明な部分も多い。特に歩行者固有の現象である、2方向以上の交差交通での交通特性に関しては、Fundamental Diagramに相当するような巨視的・基礎的な関係すら判明しているとは言いがたい。例えば歩行者全体の流量の合計が同じであっても、全員が同一の方向に歩いている場合と、様々な方向に歩く人が混在している場合とでは、後者のほうが歩きにくい。このように歩行者交通のサービスの質を考える場合、密度だけでなく交差交通の影響があることは明らかであり、それを定量化することが必要である。

本研究では特に2方向の歩行者流が交差する場合に注

目し、交差空間内の歩行者交通流動特性を明らかにすることを目的とする。方向別需要や交差角度などが与えられた場合の交通流率や旅行時間の変化特性を実験データから解析するとともに、現状の歩行者マイクロシミュレーションが得られた交通特性の知見を説明する性能を有しているかを検証する。

2. 歩行者交差交通の特性に関する既往研究

歩行者交通の容量・旅行時間特性の分析手法としては、実験や観測を行うことと、マイクロシミュレーションを用いることが挙げられる。実験・観測は実際に発生する現象を捉えられるのに対し、シミュレーションはそのモデルが正確でなければ必ずしも正しい結果を得られるとは限らない。一方、実験・観測では全ての現象について調べることは実質不可能だが、シミュレーションならば任意の状態について推定することができる。

歩行者交通に関する知見を得るための実験はこれまでにいくつか行われており、特にDaamen et al.により実施された実験¹⁾やAsano et al.の実験^{2) 3)}では二方向以上の歩行者流を交差させたケースでの実験も行われている。しかし交差の影響に関する詳細な解析は行われておらず、

十分な知見が得られているとは言い難い。

このように、マクロな交通流としての知見を得ることが困難なため、個々人の行動を表現するマイクロシミュレーションを構築し、個人の回避挙動の結果の積み上げとして、マクロな交通現象を再現する試みが多く行われている。例えばHelbing et al.のSocial Forceモデル⁴⁾は、歩行者が周囲の他の歩行者や障害物から距離に応じた反発力を受けるとして、歩行者の動きを運動方程式のように表現したものである。またJohansson et al.の提案したモデル⁵⁾はSFモデルを発展させたものであり、歩行者が他の歩行者や障害物から受ける反発力の力の大きさは単純に相手との距離だけに依存するのではなく、歩行者の希望する進行方向との位置関係や相対速度にも影響を受けるとしたものである。しかし、多くのモデルが提案されているにも関わらず、歩行者流の交差による影響を定量的に検証している研究はほとんどみられない。Asano et al.³⁾は、交差交通において、いずれかの方向の歩行者がもう一方の方向に通行権を譲ることによって効率的な流動が達成されていることに着目し、歩行者の譲り行動をゲームとして記述するモデルを提案した。しかし、実交通データとの比較検証が十分になされているとは言いがたい。

3. 分析に用いた歩行者実験データ

(1) 実験について

本研究では、Asano et al.により実施された歩行者流同実験のデータ³⁾を解析に用いる。実験は2006年5月23日の10:00から12:00に東京大学生産技術研究所内で実施した。被験者数は93名で内女性が17名であり、大半は20代の学生である。実験では、交通流の交差する角度、それぞれの方向の流入交通流率と人数を変化させ、各パターンについて2回ずつ被験者を歩かせた。被験者には交通流の方向別に赤と白の帽子をかぶらせ、指定した方向に指定した流入交通流率で歩かせた。流入交通流率は2パターンとし、需要パターンIでは、上流に待ち行列のある状態から、実験開始の合図と同時に一斉に双方とも歩行者を流入させた。需要パターンIIでは、一方のみIと同様にし、もう一方は2秒ごとに2人ずつ流入させるものとした。実験の様子は歩行区間の真上に設置したビデオカメラで撮影し、各歩行者の軌跡を取得した。分析に用いた実験データは、交差角度が90度、45度、135度の3通りであり、そのそれぞれに対して需要パターンI、IIの2通りの設定がある。また比較のため、需要パターンIと同様の流入方法で、交差交通のない一方のみの状態でも実験をおこなった。

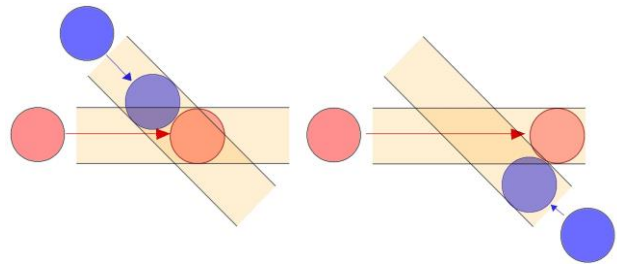


図-1 鋭角に交わる場合（左）と鈍角に交わる場合（右）のコンフリクトエリアの通過のしかたの違い

(2) 歩行者の軌跡の抽出

実験から得られたビデオ画像からフレーム毎に各歩行者の頭部の座標を抽出し、その軌跡を得た。歩行者の身長を一律に170cmであると仮定して、頭部の座標の軌跡を射影変換することにより床平面上の歩行者の位置座標を算出した。

また、歩行者は左右に重心移動しながら動くため、頭部の軌跡は左右に振動する。これを1秒分のデータの移動平均によって平滑化を行うことで、重心移動の軌跡の振動への影響を除いた軌跡データを得た。これを分析に用いるものとする。

(3) 分析観点

別々の方向へ向かう二人の歩行者がそのまま進むと衝突するような場合を考える。簡単のため、歩行者は進行方向を変更することができないとする。二人の進路の重なるコンフリクトエリア内に一人が入った後、交差角度が鋭角であればもう一人は先の一人に続くようにしてコンフリクトエリアに侵入し通過することができるのに対し、コンフリクトエリアの長さが等しくても、交差角度が鈍角の場合は先に入った一人がほとんどコンフリクトエリアを出るまでもう一人はエリア内に入ることができない（図-1）。このことから交差角度によって歩行者交通への影響が変化することが予測される。

次に、ある程度の幅を持った歩行者交通流が交錯する場合を考える。最初に交差交通に接触する側は常に交差交通との回避を考慮しなければならない。一方その反対側、つまり交差交通からみて下流側にあたる歩行者は、上流側の歩行者が交差交通を回避した際にできた間隙をぬって移動することができるので、回避にかかる負荷は小さくなると予想される。

そこで各歩行者の交通に影響を与えていると考えられる要素として、(i)交通流の交差角度、(ii) 交差する交通量、(iii) 同一方向の交通流の中における解析対象の被験者の横方向の位置の3つを取り上げ、これらが旅行時間や流率に与える影響の分析を行った。

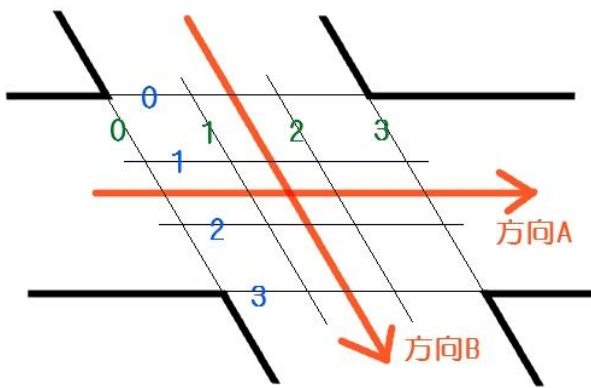


図-2 分析断面の取り方

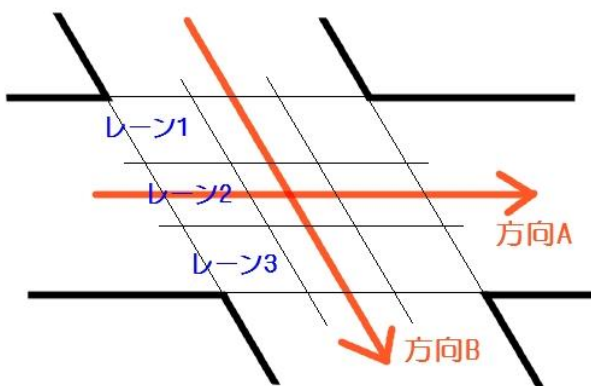


図-3 分析レーンの取り方

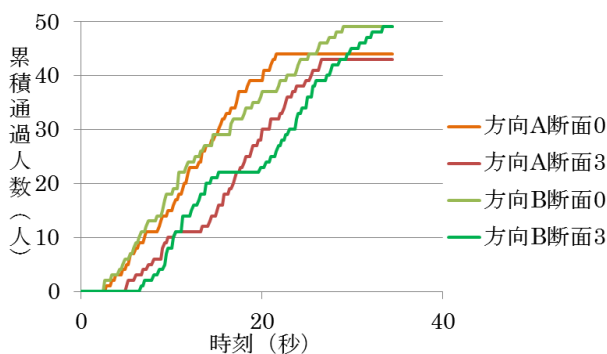


図-4 135度・需要パターンIのケースでの断面0および3における累積通過人数の時間推移

(4) 分析断面とレーンの設定

歩行空間のうち歩行者流が交差する部分を交差空間とする。交通流をある一つの断面において分析する場合のため、この交差空間内での分析断面の取り方を示す。図-2のように二つの交通流を便宜上方向A及び方向Bと名付ける。方向Aの交通流を分析する場合、交差方向Bの向きと平行に分析断面をとるものとし、交差空間の入り口及び出口、その間の交差空間内を3等分にする2断面の4つを断面として設定する。この4つを流入口に近いほうからそれぞれ0, 1, 2, 3とする。また、横方向の位置による交通特性の違いを調べる際の横方向の位置に

ついては、断面を設定する際に引いた直線を利用してレーンとして設定する。図-3は方向Aについてのレーンの設定のしかたを表したものであり、この図のように、1方向の流入口に近い方からレーン1, レーン2, レーン3とする。方向Bを分析する場合についても同様に分析断面とレーンを設定する。

4. 実験データの分析

(1) 累積通過人数

分析断面を通過した人数の累積値の時間推移を調べる。例として135度・需要パターンIの各方向の断面0及び3での累積通過人数をグラフにすると、図-4のようになる。135度で交差するケースでは図のようにグラフがしばらく水平になっている区間が表れており、これは一方の流れでもう一方の流れがせき止められてしまう時間が発生することで生じたものである。

また、図-5では45度・需要パターンIのケースを表しているが、グラフからわかるように交差空間通過時の方向別の平均流率は同じではない。最初は方向Aの流率が高く、それに対して方向Bの流率は低いが、方向Aの被験者があらかた交差点を通過したのち（時刻22秒ごろ）方向Bの流率も高くなっている。このように二方向とも同等の流入流率でありながら実際に生じた平均流率が異なるような現象は、需要パターンIの他の角度のケースでも見られた。

(2) 旅行時間

実験データの分析は、交通流が交差することで交通特性にどのような影響を与えるのか調べるのが目的であるが、取得した軌跡データには交差による影響を受けていないと思われる被験者のものも含まれている。そのためこれを除く作業を行う。

今回の分析で扱うのは2方向の歩行者流が交差する物である。A, Bそれぞれの方向について、1人目の歩行者

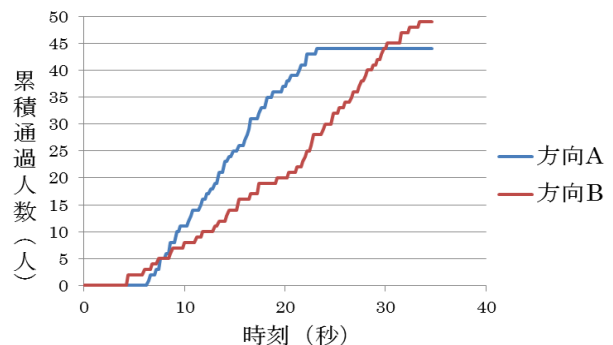


図-5 45度・需要パターンIのケースでの断面3における累積通過人数の時間推移

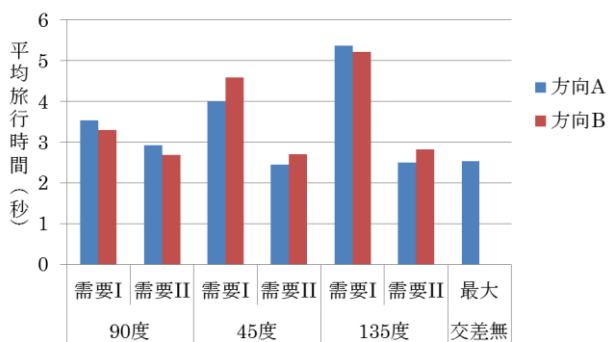


図-6 有効交差時間内における実験ケース別断面0-3間の平均旅行時間

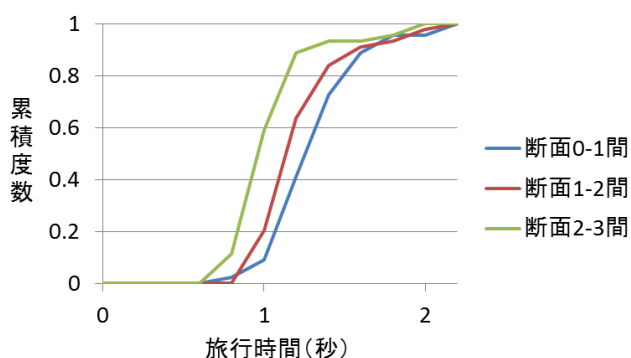


図-7 45度交差・需要パターンIの有効交差時間内での各歩行者の区間ごとの旅行時間の累積分布

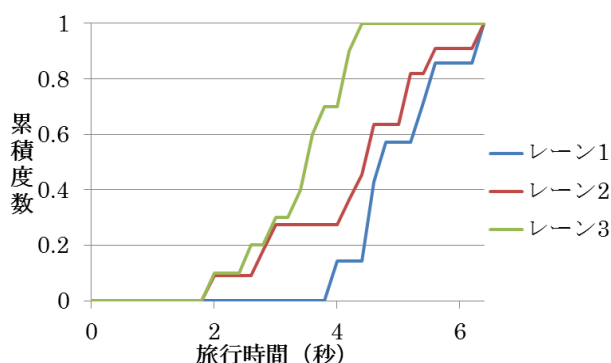


図-8 45度交差・需要パターンIの有効交差時間内でのレーン別各歩行者の旅行時間の累積分布

が交差空間に流入する時刻を t_{a0} , t_{b0} とし、最後の歩行者が流出する時刻を t_{a1} , t_{b1} として、 $\max(t_{a0}, t_{b0})$ から $\min(t_{a1}, t_{b1})$ までの時間を有効交差時間として取り出す。これにより、2本の交通流の交差が起こっている時間のみを扱うことができる。

このようにして取り出した有効交差時間内に交差区間を通り過ぎた被験者について、ケース毎の平均旅行時間を求めたものを図-6に表す。比較のため、需要パターンIで交差が無いケースも図に載せている。このグラフより、需要パターンIでは、平均旅行時間は90度交差、45度交差、135度交差の順で大きくなり、一番小さい90度

交差の場合でも交差無しの場合より数値が大きくなることがわかる。これらの違いはt検定の結果、いずれも5%有意水準で有意差が確認された。一方で、需要パターンIIの場合は、90度交差、45度交差、135度交差での値の大きさの違い重要パターンIの場合よりも小さく、値が一番大きくなるのも90度交差の場合であることがわかる。ただし、需要パターンIIの方向A（流入流率は「最大」）については、交差角度別の旅行時間には5%有意水準で有意差があった。

また、断面0-1間、1-2間、2-3間の3つの区間について、それぞれの被験者ごとの旅行時間の累積分布を調べた。45度・需要パターンIのケースの方向Aのものをグラフに表したものが図-7であり、旅行時間の長さは、断面0-1間、1-2間、2-3間の順に短くなる傾向が見られた。特に断面0-1間と2-3間、1-2間と2-3間の違いについてはt検定の結果5%の有意水準で有意差が確認された。他のケースの実験においても、同様の傾向が表れた。これは、別方向の歩行者流の流入口に近い方で歩行者流同士の衝突が発生しているエリアを抜けると進みやすくなるためであると思われる。

また、横位置による旅行時間の違いを調べるため、断面0を通過した位置がどのレーンであったかにより被験者を分類し、その分類ごとに断面0-3間の旅行時間の累積分布を調べた。上記と同様45度交差のケースの方向Aのものをグラフに表したものが図-8である。断面0におけるレーン位置が別方向の歩行者流の流入口に近いほど、旅行時間が長くなる傾向があることがわかり、他のケースの実験においても同様であった。これは、別方向の歩行者流の流入口に近いレーンほど、交差による影響を受けやすいためであると思われる。

(3) 実験ケース別平均交通流率

各ケース各方向の交通流の、有効交差時間内での断面3における累積通過人数から、有効交差時間における交

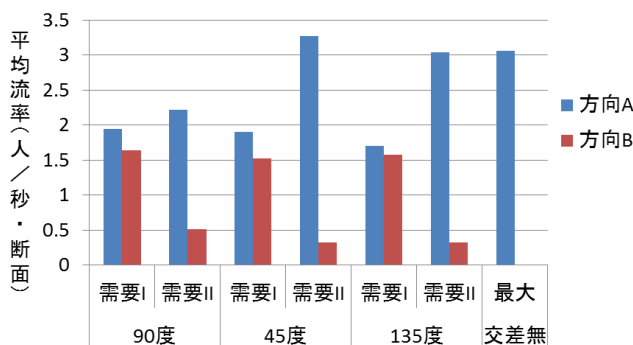


図-9 実験ケース別有効交差時間内分内での断面0-3間の平均流率

差区間の交通流率を求め、これを図-9に示す。比較のため、交差が無く流入流率が最大のものも図に載せている。このグラフより、45度交差で需要パターンIIのケースを除き、流入を同じ需要パターンIのものにしても、交差交通では交差の無い場合よりも平均流率が小さくなるのがわかる。また需要パターンIのものに注目すると、二方向とも最大の流率で流入させたにもかかわらず、方向によって平均流率が異なっていること、及び交差角度が異なっても流率が大きく変わらないことがわかる。

5. 既存のモデルによるシミュレーション

前章までのデータ分析は限られた条件、限られた回数の実験によるものであり、ここから交差交通の影響を一般化することは困難である。一方、複雑な歩行者交通流を評価するためにシミュレーションがよく用いられている。シミュレーションは交通状況を任意に設定できるため、ある現象について一般的な分析を行うのに便利である。既存のシミュレーションを用いて今回の実験と同様の条件で歩行者交通を発生させ、上述の知見が再現できれば、そのシミュレーションは交差交通の影響を十分評価できるということになる。そこで、シミュレーションでの再現性を確認し、再現できない場合に検討すべき課題についても整理する。

(1) モデルの仕様と設定条件

シミュレーションには、Asano et al.のモデル³⁾を用いる。このモデルでは、歩行者は少し将来の周辺歩行者の行動を先読みし、その先読み時間内に目的地方向へ最も進むことのできる行動を選択する。ある時刻においてランダムに定められた順番で各歩行者が行動を決定するものとし、その際歩行者は先読み時間の分だけ将来の他の歩行者の行動を知っているものとする。歩行者の進む速さは歩行者ごとに定められた速度で進むか止まるかの二

表-1 シミュレーションパラメータ

	入力数値
歩行者人体円の半径	0.17(m)
歩行者探索扇の半径	8.0(m)
歩行者探索扇の角度の1/2	60.0(deg)
方向変更の最大角速度	360.0(deg/sec)
方向変更の角度の刻み数	20
先読み時間	4.0(sec)
Best Responseの回数	2
歩行者の平均希望速度	1.3(m/sec)
希望速度の標準偏差	0.3(m/sec)
希望速度の下限	0.7(m/sec)
希望速度の上限	1.9(m/sec)

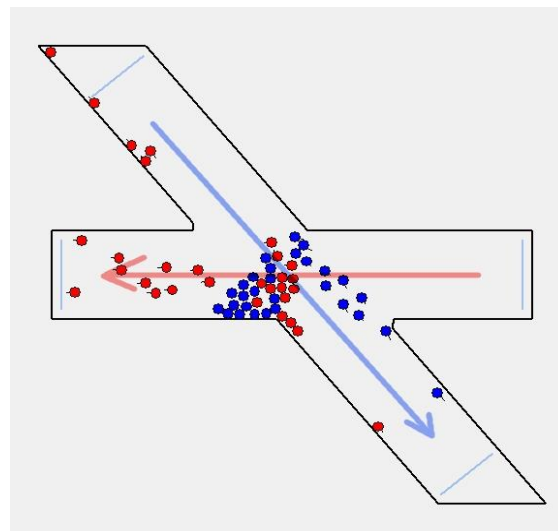


図-10 135度・需要パターンIのシミュレーション
(丸が歩行者、同色の矢印の方向に進む)

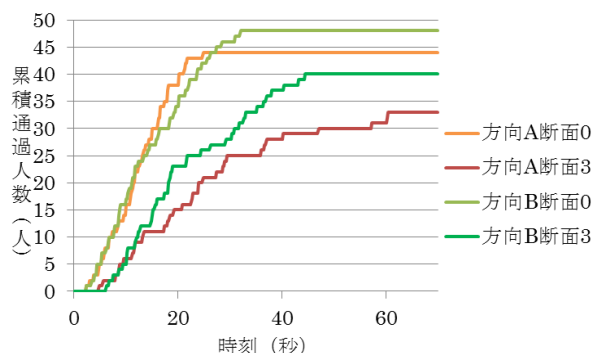


図-11 135度・需要パターンIのシミュレーション
断面0及び3における累積通過人数の時間推移

通りである。また歩行者は先読み時間分進んだ時に目的とする方向へ最も進むことのできる行動を選ぶ。進む方向を変更する際は、シミュレーションパラメータとして設定された歩行者探索扇を、同じく設定された刻み数によって等分した角度のうちから方向を選択する。シミュレーションパラメータは表-1の通り設定した。OD別発生交通量は実験データから発生交通のデータを取り出して用いた。

(2) シミュレーションの結果

135度交差・需要パターンIのケースにおいて、図-10のように交差部分の下流側で交通流の詰りが生じてしまう現象が見られた。この詰りに巻き込まれた歩行者はほとんどがそれ以上動けなくなり、目的地へ到達することは無かった。図-4と同様に断面0及び3における累積通過人数の時間推移を表したものが図-11であり、グラフの形状も異なっていることがわかる。この他のケースのシミュレーションではこのような詰まりが生じることはなかったものの、実験で観測されたような交通流の状態を完全に再現できているとは言い難い。例えば45度交差

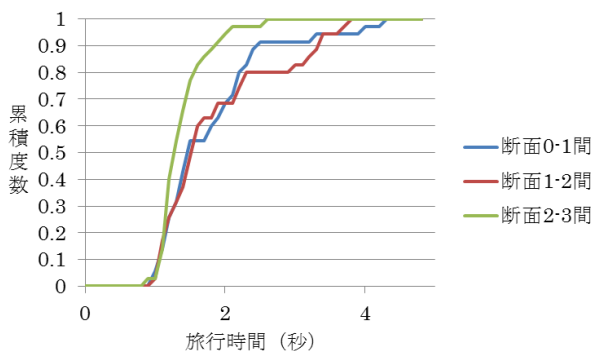


図-12 45度・需要パターン I のシミュレーション有効交差時間内での各歩行者の区間ごとの旅行時間の累積分布

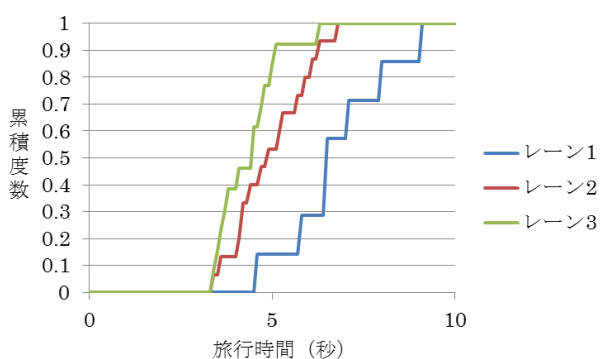


図-13 45度交差・需要パターン I のシミュレーション有効交差時間内でのレーン別各歩行者の旅行時間の累積分布

で需要パターンIのケースについて、図-7や図-8と同様に区間ごとの旅行時間の累積分布やレーンごとの旅行時間の累積分布を表したものが図-12及び図-13である。図-7では断面0-1間、1-2間、2-3間の順に旅行時間が短くなる傾向が見られたが、図-12では似たような傾向を示しつつも断面0-1間と断面1-2間の分布の大小が一部入れかわっており、関係性が必ずしも図-7のものと同じでない。図-13では図-8と似たような傾向が見られている。

実際の歩行者は状況に応じて周囲の歩行者との距離を取るのに対し、シミュレーションにおいて歩行者はできる限り先へ進もうとするため、交差角度135度の事例で見られたような交通流の詰りが生じてしまうと考えられる。また詰まることなく交差部分を通り抜けているケースの様子を見ると、実際の歩行者は前を進む歩行者が交差交通を押しつけて通った空間をたどるようにして別方向の歩行者の間を通り抜けて行く様子が見られるのに対し、シミュレーションではそのように同方向の歩行者と協調して進む様子はあまり見られず、自分の前方の空いているスペースに入り込んで進んでいくようであった。これは、歩行者がランダムに優先順位を決められて

その順番に行動を選択するというモデルの仕様によるものであると思われる。これにより、交差空間内で歩行者の進路の衝突が、実際の実験では歩行者流の流入口近くで多く生じ、シミュレーションではそれよりも散らばって生じることとなり、図-7と図-12で見られたような違いにつながったのではないかと考えられる。

(3) シミュレーションモデルの改善のための提案

シミュレーションでは前述のように実際の実験とは異なる様子が見られた。これを改善するために必要なこととして、以下のことが考えられる。

まず、歩行者同士が適当な距離を取れるようにすることが挙げられる。シミュレーションモデルではパーソナルスペースの概念が組み込まれておらず、人体円がそのまま歩行者の大きさとなっており、またできる限り前へ進もうとするため他の歩行者との接触がよく起こる。しかし実際の歩行者は他者との距離を取るよう動いており、その距離も状況に応じて可変で必ずしも真円形ではない。(例えば空いている時は他者との距離に余裕を持たせていても、混雑時にはほとんど密着するようなこともある) このようにシミュレーションモデル内の歩行者も、周囲の混雑状況等に応じて他者との距離を保てるようにすると良いと考えられる。また、状況によってはできる限り進むのではなく後の動きやすさのためにあえて速度を遅くしたり遠回りしたりする行動を選択できると良い。

その他、歩行者の行動を完全にランダムに決めていくのではなく、進路を確保しやすくなるよう同一方向の歩行者と協調するように行動を選択するようにすると良いだろう。

6. まとめと今後の展望

本研究では二方向の歩行者交差交通について、交差角度や需要と交通特性との関係を実験データを用いて解析し、その交通特性が現状のシミュレーションで再現可能かの検証を行った。実験データの解析では、需要パターンIの場合交差角度が90度、45度、135度の順に平均旅行時間が長くなる、交差の上流ほど進みにくく、横方向の位置が相手方向の上流に近いほど進みにくい、平均流率は交差角度による違いがあまり大きくならないといった知見が得られた。シミュレーションを用いた再現可能性の検証では、シミュレーションではまだ表現しきれない部分があることがわかり、その改善のためには歩行者が周囲と適切な距離を取ること、同方向の歩行者同士で協調するような動きを取り入れること、状況に応じて時には減速や遠回りといった行動を選択できるようにする

ことが必要であると指摘した。

今回の分析に用いた実験データは、非常に限られた条件のものでデータ量も多くなく、現象を正確にとらえるには不十分であるといえる。そのため、新たな実験や観測によってデータを集めて解析し、より正確な現象把握に役立てたい。特に、今回用いたデータはほぼ交差空間部分のみの軌跡データしかなく、交差空間で生じた渋滞によって上流の歩行者が待機している時間を考慮することができておらず、歩行者流の交差による後方への渋滞延伸の影響を分析することができなかったため、今後は交差空間だけでなく上流のデータにも着目したい。また、今回の実験は壁に囲まれた中を歩行者が歩くというものであったが、実際には壁のない状態で歩行者流が交錯する状況が多い。そのため、壁が無いケースでは歩行者流の交差が交通特性にどのような影響を及ぼすかという点についても解析を行う必要がある。

そしてこれらの解析によって得られた知見を元に交通シミュレーションの改良を行い、より正確に歩行者交通を再現できるようにすることを目指す。

参考文献

- 1) Daamen, W., and Hoogendoorn, S. P. : Experimental Research of Pedestrian Walking Behavior, *Transportation Research Record*, Vol.1828, 2003
- 2) Asano, M., Kuwahara, M., and Tanaka, S. : Multi-Directional Pedestrian Flow Model Based on Empirical Data, *11th World Conference on Transport Research*, 2007.
- 3) Asano, M., Iryo, T., and Kuwahara, M. : A Pedestrian Model Considering Anticipatory Behaviour for Capacity Evaluation, *Transportation and Traffic Theory 2009*, 2009
- 4) Helbing, D., Farkas, I., and Vicsek, T. : Simulating dynamical features of escape panic, *Nature*, Vol.407, 2000
- 5) Johansson, A., Helbing, D., and Shukla, P. K. : Specification of the Social Force Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data, *Advances in Complex Systems*, Vol.10, No.2, 2007

(2014. 8. 1 受付)

BASIC ANALYSIS OF PEDESTRIAN FLOW CHARACTERISTICS IN BIDIRECTIONAL CROSSING FLOW

Ai NAGASHIMA, Miho IRYO-ASANO, Takashi OGUCHI