

駅構内歩行者の流れに関する研究取り組み

山下良久*

近年鉄道駅において、ホームからの転落事故や列車との接触事故等が多発しており、ホームドア等の整備による安全確保が喫緊の課題になっている。このような駅構内の施設改良に対し、それを実施することによる駅構内旅客流動の変化を適切に評価し、安全対策に役立てていくことが重要である。本稿では、筆者がこれまで携わった調査・研究を基に、駅構内歩行者流動分析に関する実務的課題について考察する。

Current Status of Studies on Passenger Flow in Crowded Urban Railway Station for Safety Enhancement

Yoshihisa YAMASHITA*

Recently, there are many accidents involving passengers in crowded railway stations. The momentum of safety enhancement in railway station is increasing. The analysis of passenger flow plays an important role in improvement of railway station for safety enhancement. The paper reports current status of studies on passenger flow in crowded urban railway station based on experience of the author.

1. はじめに

わが国の大都市圏における鉄道駅では、朝夕のラッシュ時間帯において、多くの乗降客によりホーム、昇降施設、コンコース、改札口等の各所で激しい混雑が生じている。東京都心部における鉄道駅では、国家戦略特区への指定等とも相まって大規模なオフィスピルの建設が続いており、既存施設では駅構内の混雑がさらに激しくなる可能性が指摘されている^{1), 2)}。一方、ホームからの転落事故や旅客と列車との接触事故等、鉄道駅における人身事故が年々増加している。また、これらに起因する列車の遅延が社会的な問題として指摘され、平成28(2016)年4月に答申された「東京圏における今後の都市鉄道のあり方について」³⁾においても、対応の必要性が増大している事柄として取り上げられている。駅

構内における混雑が事故や遅延を引き起こす一因になっている。

都市鉄道においては、四つの混雑が存在する。車両内の混雑、駅構内の混雑、線路上の混雑(列車の遅延)、踏切での混雑である。これら四つの混雑は相互に関連していることが指摘されている⁴⁾。すなわち、ホーム上の混雑により列車の停車時間が増加する。運行間隔が疎である時間帯は、駅での停車時間の増加分を走行時間により吸収することが可能であるが、運行間隔が密になってくると走行時間で吸収することが難しくなり、列車の遅延が生じる。列車の到着が遅れることにより、隣駅のホームが大量の旅客で混雑することになり、それが列車の遅延をさらに増大させるとともに、車両内混雑も激化していくという負のスパイラルが生じることになる⁵⁾。そのため、駅構内における混雑を緩和するための対策は、鉄道の安全性・信頼性・利便性を高める上で重要な施策であり、それを支援する駅構内歩行者流動分析の担う役割は極めて大きいと言っても過言ではない。

本稿では、筆者がこれまでに携わった駅構内歩行

* 社会システム株式会社都市・地域交通グループ次長
Assistant Chief, Group of Urban and Rural Transport
Planning, Creative Research and Planning Co., Ltd
原稿受付日 2016年9月30日
掲載決定日 2016年11月2日

者流動に関する調査・研究を基に、実務的な研究課題について考察する。

2. 混雑を誘発する旅客の選択行動

2-1 混雑と旅客の選択行動の関係

都市鉄道における混雑は、当然ながら需要量と供給量のバランスから生じるものであるが、鉄道利用者の選択行動から需要の時間的・空間的な偏在が生じ、それが局所的な激しい混雑を招いていると考えられる。

Table 1は、先述の都市鉄道における四つの混雑のうち、鉄道利用者の何らかの選択行動が直接的原因となり発生している、車両内の混雑、駅構内の混雑、線路上の混雑に焦点を当て、混雑と旅客の選択行動との関係について整理したものである。鉄道利用者は、鉄道を利用する際、いつ出発するか（出発時刻選択）、どのような経路で移動するか（鉄道経路選択）を検討し、鉄道駅では、どの改札・階段を利用するか（歩行経路選択）、どの車両に乗車するか（乗車位置選択）を考える。また、駅構内を歩行している際には、前方の歩行者を追い越したり・回避したりする等、進行方向や速度の選択を行っている。Table 1では、各混雑を誘発している主な選択行動を整理しているが、いずれにおいても旅客の乗降位置選択行動が影響していることが見て取れる。

Fig. 1は、ある都心の地下鉄駅において、朝ピーク時間帯に到着する列車から降車する旅客の扉別人数を計測し、それを割合で示したものである²⁾。これを見ると、特定の車両・扉に旅客が集中していることが見て取れる。特定の車両・扉への旅客集中により、ホーム上において局所的に激しい混雑が生じるとともに、特定の車両が極めて高い混雑率になる。さらに、列車の駅における停車時間は、最も乗降が多い扉における乗降時間に左右される。このような事象の関連から、乗降位置選択行動がいずれの混雑にも影響を及ぼすと推察されるのである。車両内・駅構内・線路上の混雑緩和策を検討する上で、旅客の乗降位置選択行動の要因に働き掛ける施策が重要であることが読み取れる。

2-2 乗降位置選択行動に影響を及ぼす要因

では、旅客の乗降位置選択行動はどのような要因により決定されるのであろうか。Fig. 1では、昇降施設最寄り扉の降車割合が高くなっているのが見て取れる。また、既往研究^{6)~10)}においても、乗降駅における階段・エスカレーターの位置、車内の混雑

Table 1 混雑を誘発する旅客の選択行動

混雑	混雑を誘発する旅客の選択行動
車両内の混雑	<ul style="list-style-type: none"> ・出発時刻選択行動：いつ出発するか？ ・鉄道経路選択行動：どの駅から乗車し、どこで乗り換え、どの駅で降車するか？ ・乗降位置選択行動：どの車両（扉）に乗降車するか？
駅構内の混雑	<ul style="list-style-type: none"> ・乗降位置選択行動 ・歩行経路選択行動：どの昇降施設、改札、出入り口を利用するか？ ・歩行挙動：駅構内を歩行する際の追い越し、回避等の進行方向・速度の選択
線路上の混雑	<ul style="list-style-type: none"> ・乗降位置選択行動 ※旅客以外の要因（ダイヤ、列車の加減速）

降車割合

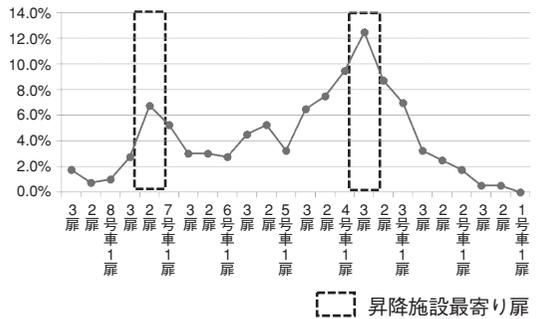


Fig. 1 朝ピーク時間帯の扉別降車客割合²⁾ (都心地下鉄駅)

状況が要因として挙げられている。駅構内における施設配置の変更は、当然ながら歩行者が利用する昇降施設や改札・出入り口等の歩行経路選択行動および乗降位置選択行動に影響をもたらすことになる。Table 2は、渋谷駅における乗換旅客を、朝のピーク時間帯に出場改札から入場改札まで追跡し移動経路データを取得した上で、非集計ロジックモデルにより歩行経路選択モデルを推定した結果である¹¹⁾。推定されたパラメーターの符号から、所要時間（水平移動時間、上下移動時間）が長い経路や多方向から歩行者流が合流する地点（経路分岐点数）を通過する経路を避ける傾向があることが見て取れる。多方向から歩行者流が合流する地点は、非常に混雑する箇所であり、歩行者は速度や進行方向の調整を行いながら歩行を行うことになる。歩行経路上での速度や進行方向の調整行動の有無もしくはそのしやすさが歩行経路選択・乗降位置選択行動に影響をもたらしている。以上のように見てくると、駅構内の施設配置が乗降位置選択行動、歩行経路選択行動に影響すること、

また、同じ路線間でも複数の乗換経路が考えられるような駅においては、歩行空間内での進行方向や速度の調整行動のしやすさが、先の二つの行動に影響することが分かる。そのため、駅構内の歩行者流動を表現するためには、乗降位置選択行動、歩行経路選択行動、歩行挙動（進行方向、速度の調整行動）

Table 2 歩行経路選択モデル¹⁾

	パラメーター	t値
水平移動時間 (分)	-1.806	-12.9
上下移動時間 (分)	-2.204	-2.18
経路分岐点数 (箇所)	-0.281	-7.27
尤度比	0.402	
的中率	74.5%	
サンプル数	650	

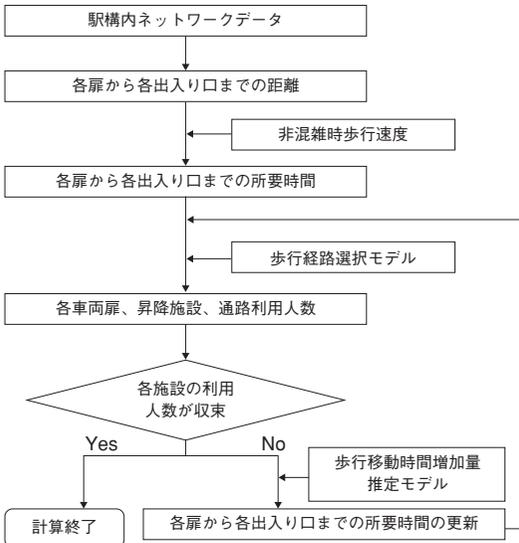


Fig. 2 三つの行動を組み合わせた分析フロー²⁾

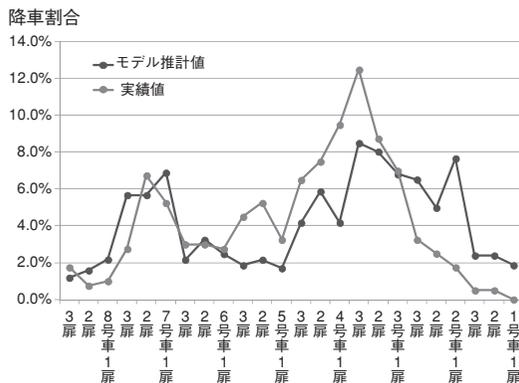


Fig. 3 降車分布の実測値とモデル推計値の比較²⁾

を関連付けた分析が必要である。しかしながら、①これら三つの選択行動は、それぞれ個別に研究がなされており、これらを関連付けようとする研究はなされていない。また、②各選択行動を扱った研究^{6)~10)、12)~23)}においても、特定の施設や空間において検討されており、その汎用性まで検証・言及したものは筆者の知る限りない。これら二つが駅構内の歩行者流動分析における大きな研究課題といえよう。

3. 研究課題に対する実務的な取り組み

3-1 三つの行動を関連付けた分析の試み

先述のように、「乗降位置選択行動」「駅構内での歩行経路選択行動」「追い越し、回避等の歩行者挙動」を関連付けて駅構内の歩行者流動を分析しようとする研究はこれまで行われていないが、ここでは、筆者が携わった調査²⁾において三つの行動を関連付けようと試みた分析例を紹介する。

本分析では、先述した歩行経路選択モデル¹⁾と歩行移動時間増加量推定モデルをFig. 2のように組み合わせ、実測された降車分布がどの程度再現できるかを試みている。なお、本分析では、降車する扉の選択(乗降位置選択)についても歩行経路選択モデルで推計することとしている。

Fig. 3にFig. 1の降車分布を本分析フレームで再現した結果を示す。実測値に類似した分布形をおおむね推計できているものの、再現性に課題が残る。

<歩行経路選択モデル>

$$P_i = \frac{\exp(V_i)}{\sum_j \exp(V_j)}$$

$$V_i = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots$$

P_i : 経路*i*の選択確率

V_i : 経路*i*の効用

X_i : 説明変数

a_i : パラメーター

ここで用いている歩行移動時間増加量推定モデルは、利用者が階段や改札等のボトルネック箇所に到着するまでの時間が、非混雑時に比べてどの程度増加するかを推定するモデルである。モデルではボトルネック箇所の混雑度が説明変数となっているが、これは当該施設が運行間隔の間に最大捌ける人数(最大捌け人数)に対する通過人数の比で表したものであり、最大捌け人数は実地調査から推定している。Fig. 4

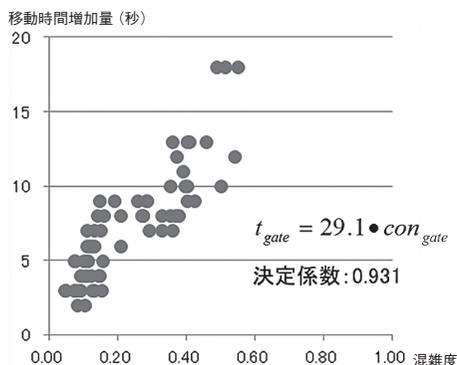


Fig. 4 ホームから改札通過までの移動時間増加量²⁾

にモデル推定結果の一例を示すが、混雑状況下での平均的な移動時間増加量を一定の精度で推定できているが、実測値においては同じ混雑度であっても移動時間増加量にはかなりの幅が見られる。混雑した空間内で生じている歩行者一人一人の挙動の違いによりその差が生じていると考えられることから、乗降分布および経路別交通量のよりいっそうの精度向上を図るためには、歩行者一人一人の挙動を表現する歩行者挙動モデルを用いて、そこから各経路の所要時間を求める分析フレームが必要と考えられる。

<歩行移動時間増加量推定モデル>

$$t = \alpha \times Con$$

t : 移動時間増加量 (混雑時-非混雑時)

Con : ボトルネック箇所 (改札、階段) の混雑度

α : パラメーター

$$Con = A / (A_{max} \times B)$$

A : ボトルネック箇所 (改札、階段) 通過人数

A_{max} : ボトルネック箇所最大捌け人数
(単位施設規模あたり)

B : 施設規模 (階段幅員、改札機台数)

3-2 汎用的な歩行者挙動モデルの必要性

次に、歩行者挙動モデルにおける汎用性が極めて重要であることを示す分析例を紹介する。

本分析は、Social Forceモデル (以下、「SFモデル」とする) をベースとするシミュレーションソフトVISSIMを用いて、ある鉄道駅において、朝ピーク時間帯に降り方向で運用していたエスカレーターを昇り方向運用に変えた場合にホーム上の混雑がどのように変化するかについて分析し、さらに運用変更後にシミュレーション結果の妥当性を検証したもの

Table 3 降車客、乗車客が利用可能な昇降施設²⁴⁾

	運用変更前		運用変更後	
	階段	エスカレーター	階段	エスカレーター
降車客	○	○	○	×
乗車客	○	×	○	○

Table 4 捌け時間の比較 (エスカレーター運用変更後)²⁴⁾

	現地調査	シミュレーション
降車客 (61人) の捌け時間	56秒	36秒

である²⁴⁾。運用変更前後で乗降客が利用できる昇降施設をTable 3に示す。

事前調査では、現地において各列車の扉別乗降客数と降車客が全てホーム上から捌け切るまでの時間 (以下、「捌け時間」とする) を調査している。シミュレーションでは、扉別乗降客数を現地調査時の人数と合わせた上で、捌け時間が実測値と整合するよう、SFモデルにおける四つの力 (目的地から受ける引力、障害物から受ける斥力、他の歩行者から受ける斥力・引力) に関するパラメーターの調整を行っている。さらに、再現時のパラメーターを用いて、エスカレーター運用変更後のシミュレーションを実施し捌け時間の変化を推計している。

事後調査においても、現地調査を行い、事前調査と同様のデータ取得を行っている。事前調査に設定したパラメーターの妥当性を検証するため、事後調査で計測した扉別乗降客数をシミュレーションにインプットし捌け時間の推計を行った。その結果をTable 4に示す。現況再現時に用いたパラメーターでは、現地での実測値に比べ非常に早く降車客が捌けてしまう結果となっている。この理由として以下の二つを考察している。

1) 昇降施設の利用に関する挙動の差異

運用変更前は、降車客は階段、エスカレーターの両方を利用可能であるが、エスカレーターを利用する旅客がほとんどであった。そのため、事前調査で行った現況再現では、エスカレーターを利用する降車客の捌け時間が再現できるようパラメーターの調整を行い、そのパラメーターを用いて運用変更後のシミュレーションを行っている。一方、事後調査では降車客は全て階段を利用している。事前・事後のビデオ映像を基に、降車客のエスカレーターおよび階段での前方旅客との間隔の取り方を見ると、エスカレーター利用時の方が、間隔を詰めて乗り込んでいる。このことから、事前調査で設定されたパラメーターは、前方の歩行者との間隔を詰めやすい設定に

なっており、それを用いた事後シミュレーションでは捌け時間が短く推計されたものと推察される。

2) 混雑状況の違いによる挙動の差異

運用変更前は、ホーム上においてエスカレーターに向かおうとする降車客と、ホームに上がってきた乗車客との間での交錯が見られたが、旅客同士で体を斜めにする等して、他者との間隔が狭い間をすり抜けていくような状況であった。この現象をSFモデルで表現するため、他者から受ける斥力の影響が小さいと解釈し、パラメーターの調整を行い、現況再現を行っている。

運用変更に伴いホーム上の床が増床されたことから、ホーム上の混雑は運用変更前に比べ緩和した。混雑が低い状況下では、歩行者はパーソナルスペースを確保しようと他者との間隔を空けて歩くようになるが、実際にホーム上の流動でもそのような現象が確認された。SFモデルの枠組みで解釈すると、運用変更前よりも斥力の影響が大きくなったことになる。このように事前、事後におけるホーム上の混雑状況の差異により歩行者挙動が変化するが、それを考慮できていなかったことも、捌け時間が短く推計された一因と考えられる。

このように、現況の施設や混雑状況下における歩行者流動が再現できても、施設の種類や混雑状況が異なると、現況再現に使用したパラメーターで状況変化に応じた歩行者挙動が再現できる保証はない。シミュレーション分析の汎用性を高めるためには、混雑状況や施設の種類に応じたパラメーターの蓄積や、汎用性の高い歩行者挙動モデルの開発が必要と考えられる。

4. おわりに

本稿では、これまでに筆者が携わった調査・研究を基に、筆者が考える実務的な研究課題を提示した。

鉄道駅における安全性を高める上で、駅構内の混雑緩和は極めて重要な課題であり、そのための施策検討を支援する歩行者流動分析の果たす役割は大きいと考える。本稿で提示した研究課題が多くの関係者の間で共有され、分析に必要なデータの取得や活用が進めば幸甚である。

なお、実務で実施した調査は、多くの先生方や行政、鉄道事業者の方々にご助言を頂きながら検討が進められたものである。ここで紹介した内容については、調査を通じた筆者なりの解釈が多分に含まれており、本稿の責は当然ながら筆者にある。

参考文献

- 1) 森田泰智、森地茂、伊東誠「都心の都市開発に伴う鉄道駅の混雑に関する研究」『土木計画学研究・講演集』Vol.45、10pages、2012年
- 2) 独立行政法人 都市再生機構「都市開発と鉄道のリニューアルー東京の国際競争力強化に向けてー」2013年3月
- 3) 交通政策審議会「東京圏における今後の都市鉄道のあり方について（答申）」2016年4月
- 4) 岩倉成志「東京圏の大規模事業所立地と通勤問題」『IATSS Review』Vol.25、No.3、pp.17-22、2000年
- 5) 仮屋崎圭司、日比野直彦、森地茂「列車間隔に着目した運行遅延に関するシミュレーション分析」『土木学会論文集D3（土木計画学）』Vol.67、No.5、pp.I_1001-I_1010、2011年
- 6) 美谷邦章、家田仁、畠中秀人「乗車位置選択行動モデルを用いた混雑費用の定量的評価法」『土木計画学研究・論文集』No.5、pp.139-146、1987年
- 7) 尾形直樹、青木俊幸、有山伸司、北井哲夫「鉄道駅における旅客流動の研究 ホーム上の階段、エスカレーターの配置と旅客乗降位置の関係」『日本建築学会大会学術講演梗概集』E-1、pp.859-860、1996年
- 8) 青木俊幸、大戸広道、都築知人、河合邦治、不破徹、古賀和博「鉄道駅における旅客流動に関する研究 その10 降車分布、エスカレーターの配置と旅客乗降位置の関係」『日本建築学会大会学術講演梗概集』E-1、pp.849-850、1999年
- 9) 青木俊幸、大戸広道、山根清香、河合邦治、都築知人、古賀和博「鉄道駅における旅客流動に関する研究 その11 乗降分布の予測、エスカレーターの配置と旅客乗降位置の関係」『日本建築学会大会学術講演梗概集』E-1、pp.1081-1082、2000年
- 10) 大佛俊泰、宮下瞳「鉄道利用客の車両選択行動について」『日本建築学会計画系論文集』Vol.79、No.700、pp.1315-1320、2014年
- 11) 東京都等「渋谷駅旅客流動予測調査 報告書」2008年
- 12) 塚口博司、松田浩一郎「歩行者の経路選択行動分析」『土木学会論文集』No.709/IV-56、pp.117-126、2002年
- 13) 松田浩一郎、塚口博司、竹上直也「歩行環境評

- 価および空間的定位を考慮した歩行者の経路選択行動分析」『土木計画学研究・論文集』Vol.20、No.3、pp.515-522、2003年
- 14) 塚口博司、竹上直也、松田浩一郎「不整形街路網地区における歩行者の経路選択行動に関する研究」『土木学会論文集』No.779/IV-66、pp.45-52、2005年
- 15) 竹上直也、塚口博司「空間的定位に基づいた歩行者の経路選択行動モデルの構築」『土木学会論文集D』Vol.62、No.1、pp.64-73、2006年
- 16) 塚口博司、大橋祐貴「大規模地下街における歩行者の経路選択行動分析」『土木計画学研究・論文集』Vol.25、No.3、pp.615-621、2008年
- 17) 塚口博司、柴田裕基、平田秀樹、安隆浩「大規模交通ターミナル地区における歩行者の3次元経路選択行動分析」『土木学会論文集D3 (土木計画学)』Vol.69、No.2、pp.135-145、2013年
- 18) 吉澤智幸、山下良久、中野泰雅、中嶋建太郎「ターミナル駅における乗換旅客の移動経路の特性分析」『土木学会第63回年次学術講演会』pp.553-554、2008年
- 19) Helbing, D., Molnar, P.: Social force model for pedestrian dynamics, *Physical Review E*, Vol.51 (5), pp.4282-4286, 1995.
- 20) 浅野美帆、桑原雅夫「先読み行動を考慮した歩行者交通流シミュレーション」『生産研究』Vol.59、No.3、pp.38-41、2007年
- 21) 井料美帆、長島愛「歩行者交差交通流の性能評価に関する研究」『生産研究』Vol.67、No.4、pp.67-71、2015年
- 22) Antonini, G., Bierlaire, M., Weber, M.: Simulation of Pedestrian Behaviour using a Discrete Choice Model Calibrated on Actual Motion Data, *Swiss Transport Research Conference Proceedings*, 13pages, 2004.
- 23) 山下良久、関口岳史、内山久雄「鉄道駅構内の歩行者空間における交差現象に関する研究」『土木計画学研究・論文集』Vol.23、No.2、pp.489-495、2006年
- 24) 奥ノ坊直樹、池田直紀、庄志強、花上美津江、山下良久、鶴池康介「歩行者マイクロシミュレーションを用いた駅構内旅客流動分析に関する研究」『土木計画学研究・講演集』No.47、3pages、2013年