

鉄道駅構内における歩行者流動に関する 実務的研究課題

山下 良久¹

¹正会員 社会システム株式会社 都市・地域交通グループ (〒153-0013 東京都渋谷区恵比寿1-20-22)

E-mail:yamashita@crp.co.jp

近年、東京都心部における鉄道駅では、駅周辺における大規模な都市開発等により、短期間に乗降客数が急増し、ホーム上や改札等において混雑が激化するという問題が生じている。ホーム上における混雑は、安全性の低下を招くだけでなく、駅構内での快適性の低下、列車遅延の慢性化といった問題にまで影響が波及する。

このような問題に対し、駅容量の拡大による抜本的改善が考えられるが、東京都心部の地下鉄駅等においては、空間確保が難しい。そのため、階段、エスカレータ、改札機等の施設配置や出入口の位置・幅員拡幅等の小規模改良により、歩行者流動の効率性を高めることが重要となる。本稿では、このような検討を行う上で必要となる歩行者流動分析における実務的な研究課題について考察する。

Key Words : *Urban Railway Station, Pedestrian Behavior Analysis*

1. はじめに

東京都心部における鉄道駅周辺では、大規模なオフィスビル建設が続いている。国家戦略特区への指定等により容積率緩和が図られ、従前よりも大規模なビルが建設される例が増えている。2020年頃までのオフィス供給量は、東京23区で平均119万㎡/年、都心3区で平均85万㎡/年となっており、いずれもこれまでの平均を上回るペースでオフィス床が供給される¹⁾。一方、オフィスビルの空室率は、2014年末現在、東京23区で4.3%、都心3区で3.5%であり、オフィス床に対する需要は大きく、この傾向は安定的に続くものと考えられる²⁾。

このようなオフィスビルの供給および堅調な需要により、東京都心部における従業人口は、今後も増加すると予測されている³⁾。そのため、豊洲駅や勝どき駅のように、駅周辺の従業人口等が急増し、駅構内の混雑が激化したことで、後追的に駅施設の改良を行うような事例が、新たに生じることが危惧される。このような問題が生じないよう都市開発の計画段階から関係者間の情報共有を図ることの重要性が指摘されているところでもある⁴⁾。

駅構内の混雑は、安全性の低下を招くだけでなく、駅構内での快適性の低下、列車遅延の慢性化といった問題にまで波及する。また、鉄道利用者にとって乗換に対する抵抗感は乗車時間の2倍ほど大きいとの分析結果もある⁵⁾。このような問題を踏まえると、駅構内の混雑緩和は鉄道全体の利便性、安全性を高めるうえで極めて重要な課題であるといっても過言

ではない。しかしながら、東京都心部の地下鉄駅等においては、空間的な制約等から、抜本的な対策により駅容量の増大を図るのは難しい状況である。そのため、階段、エスカレータ、改札機等の施設配置や出入口の位置・幅員拡幅等の小規模改良により、歩行者流動の効率性を高めることが重要である。

本稿は、このような検討を行う上で必要となる歩行者流動分析について、筆者がこれまでに携わった調査・研究等をもとに、実務的な研究課題を考察するものである。

2. 駅構内混雑を分析する際に対象とすべき歩行者行動とそれらに関する既往研究

(1) 駅構内混雑を分析する際に対象とすべき歩行者行動

駅構内混雑の分析に当たり、階段や通路等の駅構内各所における通過交通量の正確な予測と、駅構内各所の施設容量に影響する個々の歩行者挙動の再現が重要である。

階段や通路等の駅構内各所における通過交通量の正確な予測を行うためには、鉄道利用者の「乗車位置選択行動」、「駅構内での経路選択行動」に対する理解が必要である。一方、歩行者挙動の再現に当たっては、他の歩行者や障害物を認識した上で進行方向と速度をどのように決定するかに関する理解が必要となる。なお、追い越しや回避等は局所的な経路選択行動であるが、本稿では、降車してから目的とするゾーンに至る経路等、大局的な経路を選択す

る行動を「経路選択行動」，決定した経路の中で，他の歩行者を追い越したり，回避したりする局所的な行動を「歩行者挙動」と分けて定義し，以下において関連する既往研究の整理を行う。

(2) 既往研究のレビュー

乗車位置選択行動^{9)~10)}に関する既往研究では，乗降駅における階段・エスカレータの位置，車内の混雑状況等が乗車位置選択に影響を及ぼす要因として挙げられている。

歩行者の大局的な経路選択行動に関する既往研究については，これまで街路や地下街，交通ターミナル地区等を対象とした研究が数多く行われてきているが，鉄道駅構内を対象としたものはそれほど多くない。街路における歩行者の経路選択要因としては，経路の距離差，街路環境，歩行者の空間定位，歩行者属性が指摘されている^{11)~14)}。また，地下街や交通ターミナル地区のように経路上に上下移動が伴うような場合は，昇降施設の種類の種類が経路選択に影響することが指摘されている^{15)~16)}。一方，筆者らは鉄道駅構内の乗換旅客を対象に乗換経路を取得した結果，同じ改札間で乗換る旅客であっても，利用する階段や通路が異なる場合があり，これらの施設での混雑が経路選択に影響を与えている可能性を示唆している¹⁷⁾。また，ここで得られたサンプルデータを用いて非集計ロジットモデルにより乗換経路選択モデルの構築を行っている¹⁸⁾。

歩行者挙動に関する研究は，群集流動の解析や歩行者シミュレーションの開発等において取り組まれている。歩行者挙動における代表的なモデルとして Helbing らの SF (Social Force) モデル¹⁹⁾がある。これは，障害物や他の歩行者と自分との間に斥力，自分が目指す方向に対し引力が働くと仮定し，斥力と引力の合力により，次の時刻の進行方向と加速度を決定するというモデルである。これに対し，浅野ら²⁰⁾は実際の歩行者は他者の行動を先読みした上で，次の時刻の進行方向と速度を決定するという特性を考慮したモデルを構築し，混雑状況下における歩行者流動の再現が SF モデルよりも高いことを示している。さらに先読み選択肢集合ネットワークを時空間で表現し，先のモデルでは混雑状況下において身動きが取れなくなる歩行者が発生するといった不自然な現象が生じていた課題が改善されるとの報告もなされている²¹⁾。SF モデルおよび浅野らのモデルは，いずれも歩行者挙動を決定するパラメータをキャリブレーションにより設定するモデルとなっている。これに対し，Antonini ら²²⁾の研究では，ビデオ映像より歩行者の軌跡データを取得し，次の時刻の進行方向と加速度に関する選択行動を表現する離散選択モデルを推定している。また，筆者ら²³⁾もビデオ映像から得られる軌跡データから，2方向の歩行者流内で見られる交差現象を，歩行者の横断挙動選択行動として非集計ロジットモデルで表現することを試みている。

このように，これまでこれら3つの行動は，それ

ぞれ個別に研究がなされてきており，これらに関連づけて駅構内の歩行者流動を表現しようとする研究はなされていない。しかしながら，先述のように，今後東京都心部の鉄道駅においては，駅構内の混雑緩和を比較的小規模な改良等により行っていくことが求められる。その際，駅施設の改良により各車両から降車する旅客数が変化し，階段やエスカレータ，改札，出入口の利用人数が変化する。このような変化を適切に分析できることが今後は非常に重要になると考えられる。

3. 実務における研究課題

鉄道駅構内における歩行者流動分析に関する実務的課題として，主として以下の3つがあると考えられる。

(1) 3つの行動を関連づけた分析フレームの構築

先述のように，「乗車位置選択行動」，「駅構内での経路選択行動」，「追い越し，回避等の歩行者挙動」を関連づ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。

しかしながら，近年，新たな改札口の設置やエスカレータの設置等駅構内の改良等に関する歩行者流動分析に対する実務的要請が増えつつあることから，筆者らは，先述した乗換経路選択モデル¹⁸⁾と歩行移動時間増加量推定モデルを図-1のように組合せ，駅構内施設の改良により列車から降車する旅客の降車分布がどのように変化するを推計する分析を試みている。本来，乗換経路選択モデルは，降車扉から乗換先の乗車扉までを追跡し取得したデータから推定すべきであるが，調査の煩雑性から改札間の移動について追跡し取得したデータから推定を行っている。

図-5に，降車分布の実績値とモデルによる推計値の比較結果を示す。実績に類似した降車分布を概ね推計できているものの，再現性に課題が残る。精度向上のためには，乗車位置選択行動要因と駅構内の経路選択要因を取り入れ，降車扉から目的とするゾーン・乗換先列車扉までを経路とする経路選択モデルの構築が必要である。

なお，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着するまでの時間が，非混雑時よりもどの程度増加するかを推定するモデルであり，ボトルネック箇所の混雑度が説明変数となっている。ボトルネック箇所の混雑度は，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わし，最大捌け人数は，巻末付録に示す実地調査から推定したものである。図-3,4に示すモデル推定結果を見る限り，混雑状況下での移動時間増加量を一定の精度で推定できているが，現状と異なる混雑状況になった場合に，どの程度精度が担保できるかについては課題が残る。そのため，歩行者挙動を再現できる歩行者挙動モデルを用いて，歩行者一人一人の挙動を再現し，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である。

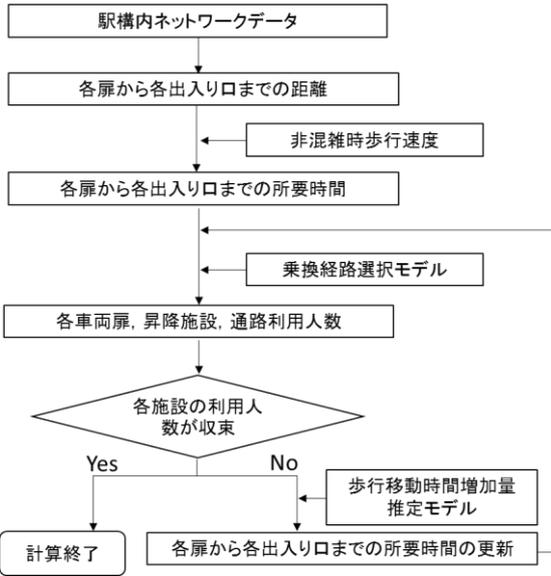


図-1 経路選択と歩行速度を関連づけた分析フロー

<乗換経路選択モデル>

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

$$V_i = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \dots$$

P_i : 経路*i*の選択確率

V_i : 経路*i*の効用

X_i : 説明変数

α_i : パラメータ

表-1 乗換経路選択モデル

	パラメータ	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	

<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

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

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(巻末参考)

B : 施設規模 (階段幅員, 改札機台数)

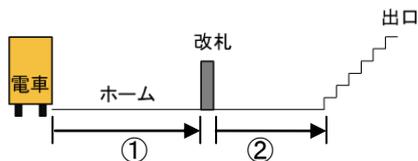


図-2 歩行移動時間増加量推定における区分

移動時間増加量 (秒)

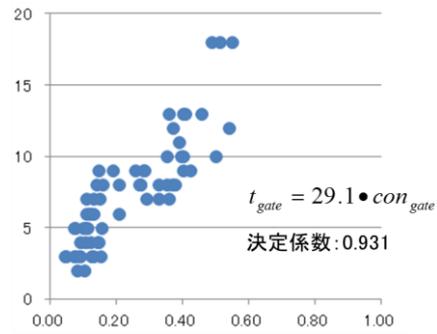


図-3 改札通過までの移動時間増加量 (図-2①)

移動時間増加量 (秒)

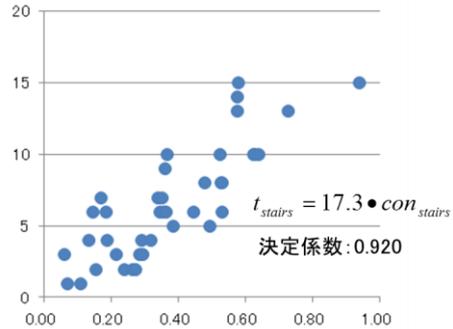
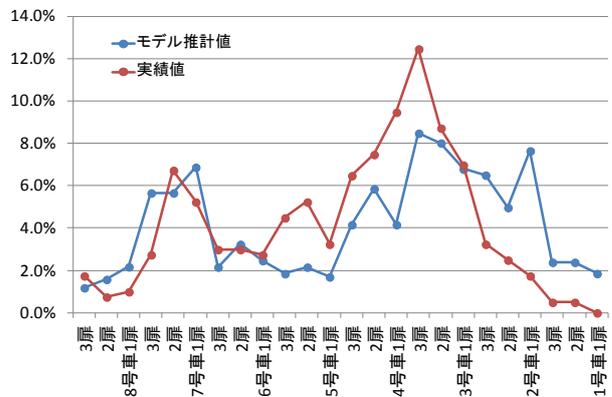


図-4 階段通過までの移動時間増加量 (図-2②)

扉別降車割合



昇降施設は7号車2扉付近, 3号車3扉付近に設置

図-5 扉別降車割合の実績値とモデル推計値の比較

(2) 混雑状況や施設に対応した歩行者挙動モデルの蓄積

先述のように歩行者挙動に関するモデルにおいては、歩行者挙動を決定するパラメータがキャリブレーションや、実行動データからの推定により設定されているが、いずれも局所的なエリアで見られる現象をもとに設定・推定される場合が多い。設定したパラメータが駅構内の他の箇所や異なる混雑状況においても歩行者挙動を適切に表現できるかに関する検証は十分になされていないと言えよう。

筆者らは、SFモデル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関する調査を行っている²⁴⁾。また、当調査では、エスカレータ運用変更後に再度現地調査を実施し、旅客流動の状況を調べ、事前に実施したシミュレーションの検証を行っている。

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きるまでの時間（以下、捌け時間）を調査した。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あわせて上で、捌け時間が実測値と整合するよう、SFモデルにおける4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の調整を行い、再現時のパラメータを用いて、エスカレータ運用変更後のシミュレーションを実施している。

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た。事前調査に設定したパラメータの正確性を検証するため、事後調査で計測した扉別乗降人員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、表-3に示すように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た。この理由として以下の2つを考察している。

a) 昇降施設の利用に関する挙動の差異

事前シミュレーションでは、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の調整を行っている。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もとに、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、事前シミュレーションで設定されたパラメータは、他の歩行者との間隔を詰めるように設定されていたため、事後シミュレーションでの捌け時間が早くなったものと推察される。

b) 混雑状況の違いによる挙動の差異

降車客が昇降施設に到達するまでに、ホーム上の他者との交錯が発生する。現況再現ではパラメータを調整することにより、他者との交錯の様子を再現している。エスカレータの運用変更に伴いホーム上の床が増床されたことから、事後シミュレーションでは、ホーム上の混雑が緩和したため現況で設定していたパラメータが強く働き、捌け時間が早くなったことが考えられる。

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、現況再現に使用していたパラメータ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。そのため、多くの分析を積み重ね、施設の種類や混雑状況に応じた歩行者挙動が再現できるパラメータや、歩行者挙動モデルそのものの蓄積が必要と考えられる。

表-2 降車客、乗車客が利用可能な昇降施設

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

表-3 捌け時間の比較（エスカレータ運用変更後）

	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

(3) 歩行者軌跡データおよび駅空間データの整備

上述の2つの課題に取り組んでいく上で大きな制約になるのがデータである。駅構内の経路選択行動の分析に当たっては、各利用者がどの扉から降車し、どの階段、改札、出口から出ていくかといった一連の経路情報が必要になる。また、歩行者挙動分析に当たっては、一人一人の歩行者の回避や追い越しといった挙動が把握できる時間と位置座標をもった軌跡データが必要になる。これらのデータ取得に当たっては、ビデオカメラを活用した研究等が行われているが、WiFi等の無線電波を活用した取得等についても検討が必要である。

また、駅構内の空間データは各鉄道事業者が図面やCADデータとして保持しているのが現状であるが、これらのデータのオープン化を図り、誰でも駅構内空間データを活用できるような仕組みづくりを進めていくことも重要な課題と考えられる。

4. おわりに

本稿では、これまでに筆者が携わった調査・研究をもとに、筆者が考える実務的な研究課題について提示を行ったが、筆者が対象とした鉄道駅特有の問題である可能性も高い、多方面から様々なご意見をいただき、今後の研究につなげていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 森ビル株式会社：東京 23 区の大規模オフィスビル市場動向調査，2015 年 11 月 4 日。
- 2) 森トラスト株式会社：東京 23 区の大規模オフィスビル供給量調査'16，2016 年 3 月 29 日。
- 3) 東京圏における今後の都市鉄道のあり方に関する小委員会：東京圏における今後の都市鉄道のあり方について（案），平成 28 年 4 月 7 日。
- 4) 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。
- 5) 日比野直彦，山下良久：年齢階層別鉄道経路選択行動の時系列変化に関する研究，土木計画学研究・論文集 Vol.27 No.3，pp.515-522，2010。
- 6) 美谷邦明，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。
- 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.

- 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.
- 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.
- 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, 第 79 巻, 第 700 号, pp.1315-1320, 2014.
- 11) 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.
- 12) 塚口博司, 松田浩一郎, 竹上直也: 歩行環境評価および空間的定位置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.
- 13) 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.
- 14) 竹上直也, 塚口博司: 空間的定位置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, No.807/IV-70, pp.77-86, 2006.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 東京都等: 渋谷駅旅客流動予測調査 報告書, 平成 20 年 3 月.
- 19) D.Helbing and P. Molnar: 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, 59 巻 3 号, pp.38-41, 2007.
- 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, 67 巻 4 号, pp.67-71, 2015.
- 22) Antonini, G., Bierlaire, M. and 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.
- 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: 歩行者ミ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.

付録 各施設における最大捌け人数について

都心の地下鉄駅等では、列車の到着により大量の旅客が列車から降車し、それぞれが目的とするゾーンや乗換先に向かって歩行するが、階段、エスカレータ、改札、通路、出入口等、駅構内には歩行者流動上ボトルネックとなる箇所が数多く存在する。

これらのボトルネック箇所において、次の列車が到着するまでに現在の旅客を全て捌くことができなければ、旅客の滞留が徐々に拡大していくことになる。そのため、運行間隔の間に何人捌くことができるかが、駅の施設容量を考える上で重要となり、これを最大捌け人数と定義している。

図-6 は、ホームに接続する昇降施設を例に、列車到着後に当該昇降施設を通過する人数がどのように推移するかイメージを示したものである。

- ・列車到着後の旅客流の状態は、時間の経過とともに状態 A, B, C と遷移する。状態 B が、旅客流が整流化し通過した状態である。
- ・降車客が多くなると、B の状態が継続する。そのため、運行間隔における階段幅員 1m 当たりの最大捌け人数は、図-6 における S1, S2, S3, S4 の合計となる。

この状態 A, B, C における通過旅客数を現地調査で計測し、表-4 の結果が得られている。この結果をもとに、各施設の最大捌け人数を求め、先述の混雑度を計算している。

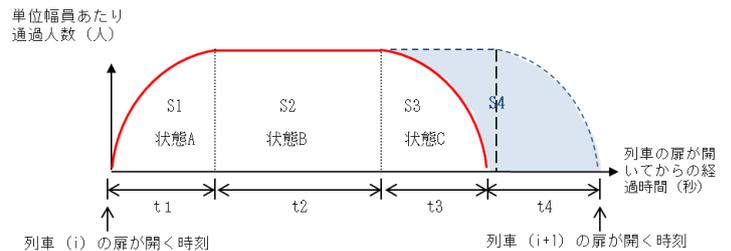


図-6 昇降施設における旅客流動の推移のイメージ

表-4 各状態における通過人数・時間と最大捌け人数

施設	状態 A		状態 B	状態 C		運行間隔 2 分の場合の最大捌け人数
	通過人数	通過時間		通過人数	通過時間	
自動改札機	6 人	10 秒	1.0 人/秒	11 人	23 秒	104 人/台
階段	5 人	8 秒	1.2 人/秒	24 人	33 秒	124 人/m
エスカレータ (2 人用)	6 人	7 秒	1.6 人/秒	14 人	12 秒	182 人/台
エスカレータ (1 人用)	2 人	6 秒	0.8 人/秒	6 人	10 秒	91 人/台

※状態 A~C における値は、自動改札機・エスカレータは 1 台あたり、階段は幅員 1m 当たりの値である。