断面交通量調査に基づく乗客流動推定モデルへの昇降施設における混雑度の組み込み

福富洋太*・大佛俊泰・村木正幸***・坂本千洋*****

Incorporating Pedestrian Density at Vertical Transport Facilities into Passenger Flow Estimation Model Based on Detailed Cross-Sectional Traffic Volume Surveys

Yota FUKUTOMI*, Toshihiro OSARAGI**, Masayuki MURAKI***, Chihiro SAKAMOTO***

Abstract: Predicting passenger flow is crucial for mitigating congestion and improving safety when planning railway station upgrades. However, essential data such as origin-destination flows and sectional volumes are typically unavailable during the planning stage. To address this limitation, we developed a passenger flow model calibrated using detailed cross-sectional traffic volume data observed at a railway station in the previous paper. While the model effectively captured macroscopic route choices, it exhibited limited accuracy in estimating microscopic route behaviors. This study enhances the model by incorporating pedestrian density at vertical transport facilities such as stairs, escalators, and elevators, which dynamically affects passenger movement and significantly improves the accuracy of microscopic route choice estimations.

Keywords: 断面交通量調査（cross-sectional traffic volume survey），大規模鉄道駅（large railway station），乗客流動（passenger flow），乗客流動モデル（passenger flow model），改修計画（renovation plan）

１．はじめに

近年，鉄道会社による新線・延伸計画に伴い，大規模な鉄道駅の改修工事が数多く計画されている．鉄道駅の改修計画を策定する際には，混雑緩和や安全性向上の観点から，改修後の乗客流動を事前に予測し，改修案を定量的に評価する技術が不可欠である．しかし，計画段階では，評価に不可欠な改修後の OD 交通量（出発地－目的地間交通量）や断面交通量などのデータが未知であるという根本的な課題が存在する．

筆者らはこれまで，乗客の乗車位置は降車駅の構内プランに強く依存する傾向があることに着目し，各車両扉における乗車人数は改修後も変化しないと仮定することで，各車両扉における降車人数を逆推定する手法を提案した（福富ほか，2024）．この乗車量制約型モデルによれば，駅構内における乗客のマクロな経路選択（ホーム間を結ぶ地下通路と跨線橋の選択など）については高い精度で記述できることが確認された．しかし，ミクロな経路選択（隣接する階段とエスカレータの選択など）については，その予測精度は不十分であった．

本モデルの課題は，昇降施設周辺における混雑状況を考慮していないことにある．加瀬ら(2021)は，階段やエスカレータの混雑度をモデルに組み込むことで，乗客の経路選択行動をより高精度に再現している．このモデルは OD 交通量を制約条件としていることから，筆者らのモデルの制約条件とは大きく異なるもののモデル改良の参考となる．

本研究では，乗車量制約型モデルに昇降施設における歩行者密度を組み込み，ミクロな経路選択の推定精度の向上を図り，その改善の程度を定量的に検証する．

２．分析対象駅と断面交通量調査データの概要

本研究では，都心と郊外を結び，3 路線が乗り入れ，改札内乗り換えが頻繁に行われている，4 面 6 線の A 駅を分析対象とする．A 駅の略図を図 1 に示してある．

A 駅では，図 2 に示す通り，断面交通量調査により，主要な地点（改札機・通路・階段・エスカレータ・エレベータなど）における 1 分単位の方向別の交通量，ならびに全ての車両扉における 1 分単位の乗車人数・降車人

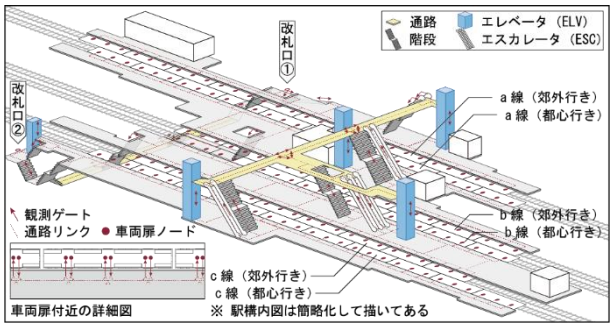


図 1　分析対象とする A 駅の平面概略図

*　学生会員　東京科学大学　環境・社会理工学院　建築学系（Institute of Science Tokyo）
〒152-8550　東京都目黒区大岡山 2-12-1　E-mail：fukutomi.y.786f@m.isct.ac.jp
**　正会員　東京科学大学　環境・社会理工学院　建築学系（Institute of Science Tokyo）
***　非会員　株式会社日建設計　都市社会基盤部門　シビルグループ（Nikken Sekkei L.T.D）

調査日	2022 年 10 月 24 ～ 28 日 ※本稿では 27 日（木）を分析	調査項目 （観測点）	①車両扉の乗降客数　（30×6 箇所） ②昇降設備の断面交通量　（19 箇所） ③通路の断面交通量　（12 箇所） ④改札の断面交通量　（2 箇所） 計 213 箇所
時間帯	7:00 ～ 9:00, 17:30 ～ 18:30（1 分毎）		
調査方法	カメラで録画した映像を後日確認し，目視および数取器を用いた手作業で，各観測点における断面交通量をカウントした	カメラ台数	計 113 台

図 2　断面交通量調査の概要

数が観測データとして得られている．また，すべての観測地点を含む駅構内の移動経路を有向ネットワークで表現し，空間データを構成している．本稿では，これらを原データとした．

3．既存の乗客流動推定モデルの概要

これまでに開発した乗客流動推定モデルは，断面交通量調査データに基づき，車両扉や改札などの出発地－目的地間における移動経路ごとの乗客流動量を推定するモデルである（図 3）．本モデルは主に以下のステップから構成されている．

まず，出発地－目的地間の移動で想定されるすべての移動経路を抽出する．次に，通過するリンクの空間特性に応じて設定した歩行抵抗をリンク長に乗じ，移動経路全体で合計することで移動コストを算出する（図 3(b)）．この時，出発地点が車両扉である場合は，車両内の混雑の影響も考慮する．具体的には，降車人数が一定の閾値を超える場合には，その超過量に比例して移動コストを増加させることで混雑回避行動を疑似的にモデルに組み込んだ．

次に，乗客の経路選択行動を，移動コストを負の効用とみなした多項ロジットモデルで表現する．これにより，各目的地点（改札・車両扉）への移動者の経路選択確率を算出する（図 3(c)）．この経路選択確率を吸収量（目的地点への移動人数）に乗じることで，経路ごとの移動者数を確率的に推定する（図 3(d)）．

最後に，推定した経路ごとの移動者数を集計することで，各出発地点の発生量（出発地点からの移動人数）および各リンクの交通量を推定する（図 3(e)）．

なお，図 3(a)に示す各パラメータは，断面交通量調査から得られた，断面交通量や各出発地点の発生量を正解データとして，誤差関数が最小となるように勾配法を用いて推定する（図 3(f)）．

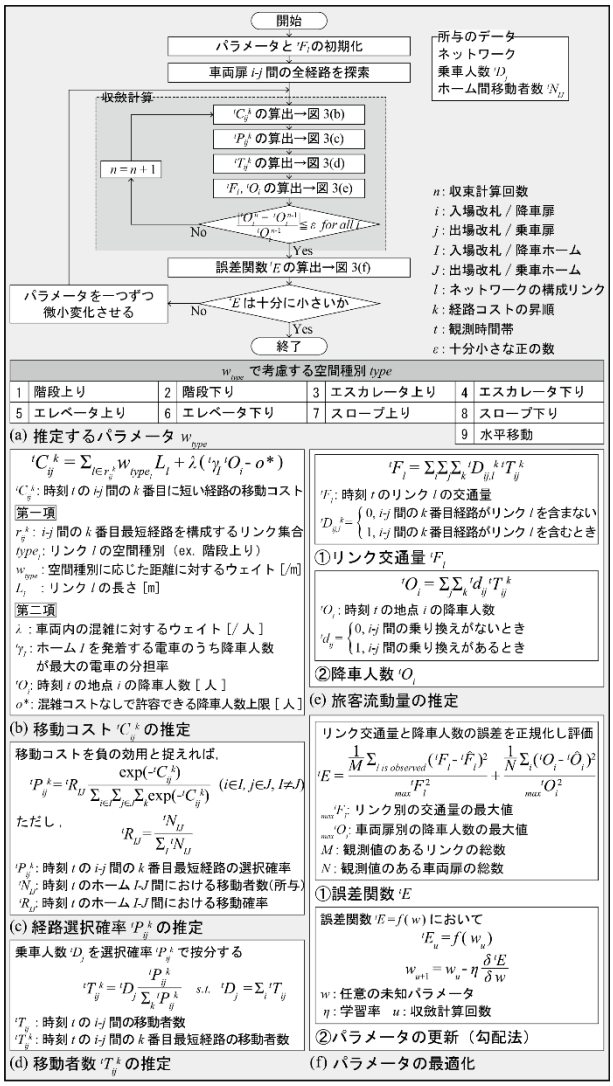


図 3　既存の乗客流動推定モデルの概要

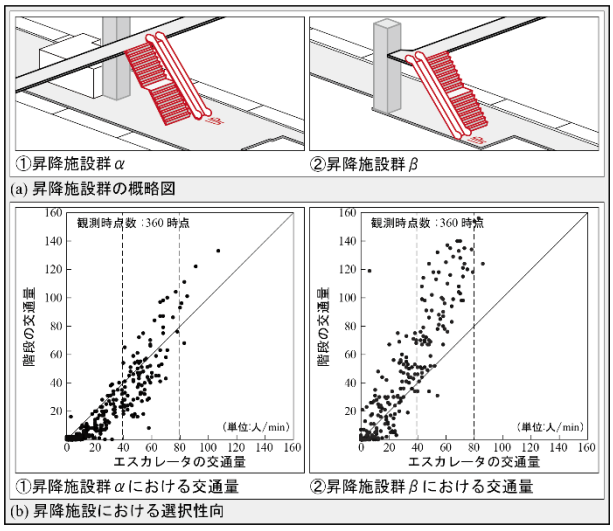


図 4　昇降施設周辺における乗客流動特性

4．昇降施設周辺における乗客流動特性

本章では，A 駅における昇降施設周辺の断面交通量調査データに基づき，ミクロな経路選択の行動特性を明らかにする．図 4 に，A 駅構内において，階段とエスカレータが隣接している 2 箇所（昇降施設群 α, β）の略図と，それぞれの単位時間あたりの断面交通量の観測結果を示してある．

図 4(b)①の昇降施設群 α を見ると，エスカレータの交通量が 40[人/min]以下の時点では，エスカレータが優先的に選択されていることが分かる．一方，エスカレータの交通量が増加するにつれてその選択割合は減少し，80[人/min]以上では階段を選択する割合が増加する傾向が見られる．これらの値は，それぞれエスカレータの片側または両側がほぼ満員となる状態に相当する．すなわ

ち，エスカレータの利用人数が最大輸送人数を超えると，乗客の選択傾向が変化することを示唆している．

一方，図 4(b)②の昇降施設群 β では，エスカレータの交通量に限らず，階段が優先的に選択されている．これは，階段とエスカレータの配置や周辺の動線といった物理的なレイアウトの違いが，混雑に対する乗客の選択性向に影響を与えている可能性を示唆している．

これらの現象は，乗客のミクロな経路選択が，距離や配置といった静的な因子だけでなく，刻々と動的に変化する混雑状況に大きく依存していることを示している．さらに，混雑状況下での選択性向は昇降施設のレイアウトによっても異なる可能性が示唆されたため，移動距離に基づく静的なパラメータのみでは，動的に変化する選択行動を十分に表現することは困難であると考えられる．そこで，本稿では，昇降施設周辺における歩行者密度の影響を乗車量制約型モデルに組み込み，ミクロな経路選択の記述精度の向上を試みる．

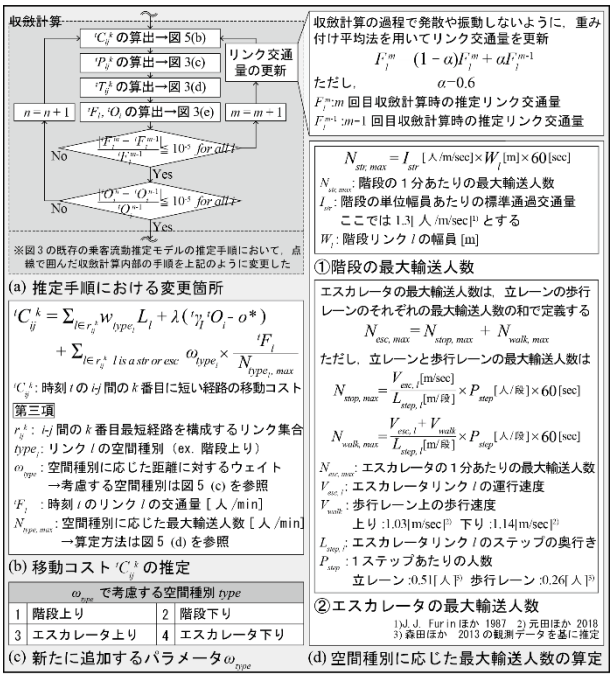


図 5　乗客流動推定モデルの改良の概要

５．乗客流動推定モデルの改良

５.１　改良モデルの概要

鉄道駅を利用する人々は，日常的な移動を通じて得られる総移動距離や総移動時間などの体験に基づき，マクロな経路選択を行っていると考えられる．一方で，「隣接する階段とエスカレータのどちらを選択するか」というミクロな経路選択については，その時々の混雑状況に応じて臨機応変に決定していると考えられる．すなわち，昇降施設周辺における歩行者密度の動的変化を考慮することで，ミクロな経路選択の記述精度を高められる可能性がある．そこで本章では，昇降施設周辺で発生する歩行者密度の動的な変化を移動コストに組み込み，パラメータ値を収斂計算によって推定する方法について検討する．

５.２　歩行者密度を考慮した移動コストの定式化

昇降施設内の歩行者密度の動的変化を考慮したモデルの推定手順を図 5 に示してある．具体的には，移動コストの推定において，既存モデルで用いていた，リンクの空間種ごとの距離に基づく移動コスト（第一項）と車両内の混雑状況に基づくコスト（第二項）に加えて，昇降施設リンクの混雑状況に応じて動的に変化する移動コスト（第三項）を新たに導入する（図 5(b)）．

ここで，混雑度の指標として，リンク交通量を昇降施設の種類に応じた単位時間あたりの最大輸送人数[人/min]で正規化したものを用いる．なお，昇降施設別の最大輸送人数は図 5(d)に示す式で定義される．

本モデルでは，リンク交通量は移動コストに依存して決まるが，図 5(b)に示す式のとおり，移動コストもまたリンク交通量の関数となっている．そのため，あるリンクの交通量が増加し混雑すると移動コストが上昇し，結果としてそのリンクを避けて他の経路が選択されやすくなる仕組みとなっている．

すなわち，リンク交通量と移動コストは相互依存の関係にあるため，推定の際には収斂計算が必要となる．そこで，全てのリンクにおけるリンク交通量の変化量が一定の閾値内（本稿では10^{-5}）に収まるまで収斂計算を行い，平衡状態を与える収束値を求める．さらに，収斂計算プロセスにおける計算値の発散や振動を回避するため，重み付け平均法を用いてリンク交通量を更新する．

５.３　Ａ駅におけるパラメータ最適化と精度評価

図 6(a)に示された発生量の推定結果を見ると，既存モデルと改良モデルのどちらも良好な推定精度を示している．また，表 6(d)の評価指標を見ると，平均二乗誤差は約 21%減少しているものの，他の精度指標は両者の値は大きく異ならない．すなわち，発生量というマクロな乗客流動量を記述する上では，両モデルとも十分な記述能力を有していると言える．

一方で，図 6(b)のリンク交通量では推定結果に改善が見られる．従来モデルのグラフでは過大・過小推計が散見されるが，改良モデルでは全体的にばらつきが小さくなっている．また，図 6(d)の評価指標を見ると，平均二乗誤差は約 34%，平均絶対誤差は約 16%減少しており，補正済み決定係数も 0.031 向上している．さらに，図 6(c)の推定誤差の分布を見ると，階段とエスカレータが隣接している地点における推定誤差は概ね解消されていることが分かる．これらの結果は，昇降施設における歩行者密度という乗客のミクロな経路選択に影響を与える因子を考慮したことで，個々の昇降施設のリンク交通量をより正確に推定できるようになったことを示している．

図 6(e)には，朝のピーク時間帯（7:40～8:40）におけるパラメータの推定値を示してある．階段とエスカレータにおける混雑に対するパラメータ値を比較すると，上りも下りも共通してエスカレータの方が大きい．すなわち，階段とエスカレータが併設されている場合，混雑が激しくなるにつれてエスカレータの移動コストの増加幅が階段のそれよりも大きくなり，その結果，選択性向はエスカレータから階段に推移することを示している．これは，エスカレータの最大輸送人数が階段のそれよりも小さいため，混雑時には利用までの長い待ち時間を避けて階段を選択しようとする人が増えることを意味している．

また，両パラメータの値の「差」を上りと下りで比較すると，「下りの差」の方が「上りの差」よりも大きいことがわかる．すなわち，歩行者密度が増加するにつれて，エスカレータから階段に推移する選択性向は，下りの方が一層顕著に現れることを示している．上り階段よりも下り階段の方が労力的な負荷が小さいため，エスカレータからの遷移が多くなるものと推察される．

６．おわりに

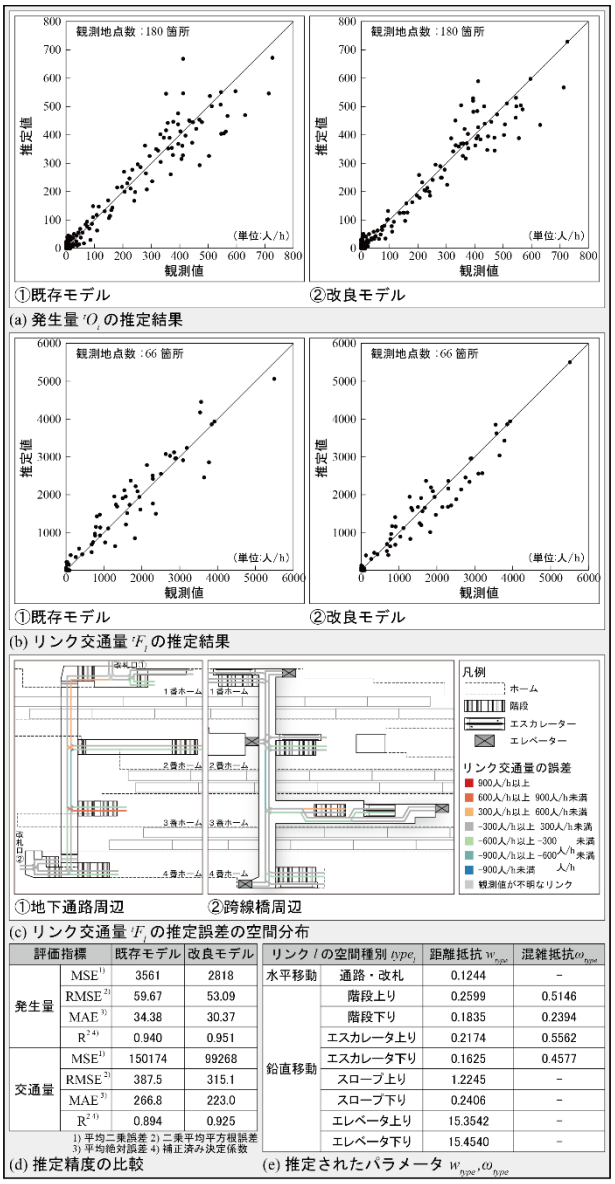
本稿では，これまでに構築した乗車量制約型モデルを改良し，推定精度の向上を定量的に確認した．

まず，昇降施設周辺の断面交通量調査データを分析することで，エスカレータの交通量が増加するにつれて，階段の利用割合が増加するという乗客のミクロな経路選択行動が，その時々の混雑状況に大きく影響されていることを示した．すなわち，移動距離といった静的なパラメータのみでは，動的に変化する選択行動を表現することが困難であることが判明した．

この課題を解決するため，昇降施設周辺の混雑度を移動コストに動的に組み込むことでモデルを改良し，A 駅の断面交通量調査データを用いてパラメータを再推定した．その結果，改良モデルは従来モデルよりも高い決定係数を示し，モデルの推定精度が向上したことが確認された．また，改良モデルによって得られたパラメータから，上り・下りいずれの方向についても，混雑度が増すにつれてエスカレータから階段に利用者が推移する傾向が強く現れることが判明した．

以上より，本研究で提案した改良モデルによれば，駅構内の混雑状況を考慮することが可能となり，個々の昇降施設のリンク交通量を従来よりも正確に推定できることが示された．

ただし，図 4(b)①②を見て分かるとおり，階段とエレベータの位置関係によっても選択性向が異なる可能性がある．今後は，この点に関しても改良を加え，改良したモデルが，構内の空間構造や乗り換え特性の異なる他の鉄道駅においても有効に機能するか否かについて検証する予定である．



評価指標		既存モデル	改良モデル
発生量	MSE[1]	3561	2818
	RMSE[2]	59.67	53.09
	MAE[3]	34.38	30.37
	R^2[4]	0.940	0.951
交通量	MSE[1]	150174	99268
	RMSE[2]	387.5	315.1
	MAE[3]	266.8	223.0
	R^2[4]	0.894	0.925

1) 平均二乗誤差 2) 二乗平均平方根誤差
3) 平均絶対誤差 4) 補正済み決定係数

(d) 推定精度の比較

リンク l の空間種別 $type_l$		距離抵抗 w_{type}	混雑抵抗 ω_{type}
水平移動	通路・改札	0.1244	-
鉛直移動	階段上り	0.2599	0.5146
	階段下り	0.1835	0.2394
	エスカレータ上り	0.2174	0.5562
	エスカレータ下り	0.1625	0.4577
	スロープ上り	1.2245	-
	スロープ下り	0.2406	-
	エレベータ上り	15.3542	-
	エレベータ下り	15.4540	-

(e) 推定されたパラメータ w_{type}, ω_{type}

図 6　A 駅における精度評価

本研究は，東京科学大学研究倫理審査会の承認を受けて実施したものである(承認番号:第 2025116 号).

参考文献

加瀬史朗・佐藤敏彦・坂本圭司 (2021) ホーム上旅客流動の変化を予測できるシミュレーションシステムの開発．「JR EAST Technical Review」，**41**，49-54.

福富洋太・大佛俊泰・岸本まき・村木正幸・坂本千洋 (2024) 断面通行量調査に基づく鉄道駅構内の旅客流動推定モデル．「日本建築学会学術講演梗概集」，**6**，647-648.

元田良孝・宇佐美誠史 (2018) エスカレーター内の歩行に関する基礎研究.「交通工学研究発表会論文集」，**38**，221-225

森田泰智・森地茂・伊東誠 (2013) 駅昇降施設の最大捌け人数に関する研究 －都心駅周辺の急速な都市開発による鉄道駅の激しい混雑への対応に向けて－．「土木学会論文集 D3」，**69**(5)，595-611.

Fruin and John. J. (1987) Pedestrian Planning and Design (rev. ed.). Mobile, Ala.: Elevator World Magazine, Inc.