

論文 ラグランジュ緩和法を用いた 駅構内における歩行者の分布交通量推計に関する研究

柴田 宗典¹・石突 光隆²・対馬 銀河²

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 建築研究室
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail:shibata.munenori.51@rtri.or.jp

²非会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 建築研究室

安全性や快適性の更なる向上を目指して既存の鉄道駅の改良工事が数多く行われているが、駅改良計画や設計の妥当性を検証するためには、歩行者の分布交通量（OD 交通量）を正確に捕捉する必要がある。そこで筆者らは、防犯カメラ等から駅構内における断面交通量等の情報を取得し、それらの情報に基づいて分布交通量を推計するシステムの開発を進めている。本研究では、分布交通量推計モデルとして、エントロピー最大化モデルにラグランジュ緩和法を適用し、実在の駅で取得した自動改札機で取得されたデータ等を用いた数値実験を行う。その結果、ラグランジュ緩和法を適用したエントロピー最大化モデルにより、1日にわたって断面交通量から分布交通量を良好な精度で推計できること等が示された。

Key Words: railway station planning, pedestrian OD estimation, mathematical optimization, lagrangian relaxation method, automatic ticket gate

1. はじめに

従来より、既存駅の改良計画や新駅計画の策定において、駅構内旅客流動シミュレーションによる計画の妥当性の検証が行われてきている¹⁾。「東京圏における今後の都市鉄道のあり方について（交通政策審議会答申第198号、2018年4月）」²⁾では、多様な主体が協働して駅空間の質的進化を図る「駅まちマネジメント（駅マネ）」の推進が謳われており、将来的に、駅構内旅客流動シミュレーションは多種多様な主体が協働するためのツールとしても重要性が高まるものと考えられる。

ここで、駅構内における旅客の分布交通量は、駅構内旅客流動シミュレーションにおける基本的な入力データである。例えばマルチエージェントベースのシミュレーションでは、時間帯別の分布交通量から特定時間帯に交通量分のエージェントを発生させ、エージェントには起終点に従って駅構内を歩行させる。

このように重要な役割を果たす分布交通量であるが、一般的には、駅構内でのアンケート調査や OD（起終点）調査等によって個人の OD や歩行経路を捕捉することで、分布交通量のパターンを得る。このパターンを、特定の断面において計測された断面交通量に整合するように調整することで、分布交通量を推計する。しかしながら、駅構内でのアンケート調査等には多くの手間や費用がかかるため、年に1回程度あるいは駅改良プロジェクトの

事前検討等の必要に応じて、ある1日に実施する等の小頻度・短期間で実施されることが多く、実際の旅客数に対するサンプリング率は数%にも満たない。小規模かつ特定時期に限定されるサンプリング調査に依存する従来手法では、日変動・時間変動が大きなことで知られる駅構内の旅客流動について、適切に分布交通量が推計できていないケースもあると考えられる。一方、道路交通分野では、道路に設置されたトラフィックカウンタ等により特定の箇所でも自動的に計測された断面交通量データ等から分布交通量を推計する手法の研究が蓄積されている。

そこで筆者らは、道路交通分野等における既往研究³⁾⁶⁾を参考にしつつ、駅構内において既設の防犯カメラ、仮設したビデオカメラの動画解析等により断面交通量等の情報を自動的に取得し、数理最適化モデル等を用いて分布交通量を推計するシステムの構築を進めている（図-1）。本研究は、本システムの主要な構成要素である分

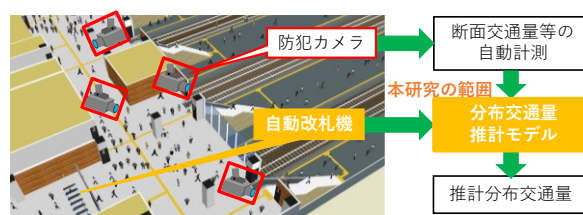


図-1 駅構内の分布交通量自動推計システムの概念図と
本研究の範囲

布交通量推計モデルを対象とする。筆者らの先行研究⁷⁾において優位性が示唆されたエントロピー最大化モデル⁸⁾にラグランジュ緩和法を適用し、実在の駅の自動改札機で取得したデータ（以下、「自動改札データ」と呼ぶ）等を用いた数値実験により、分布交通量の推計精度等を検証することを目的とする。

2. 経路交通量型エントロピー最大化モデル

(1) モデルの定式化

個々の交通主体（自動車一台や歩行者一人など）が移動する時に、ある OD が発生する確率を、全ての交通主体について乗じた同時発生確率は、OD 表の発生確率と捉えられる。エントロピー最大化モデルは、実際に計測される分布交通量は、この同時発生確率が最大となる時のものであるとの考え方に基づいた数理最適化モデルである⁹⁾。ここで i は出発ノード番号、 j は到着ノード番号、 c はリンク番号、 O_i はノード i の発生交通量、 D_j はノード j の集中交通量、 T_{ij} はノード ij 間の分布交通量、 V_c はリンク c の断面交通量、 M_{ij}^c はノード ij 間の交通がリンク c を通過する場合に 1、通過しない場合に 0 をとる変数とする。エントロピー最大化モデルは、式(1)～(4)の数理最適化問題として定式化される⁹⁾。

$$\min_{T_{ij}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T_{ij} \ln T_{ij} - T_{ij}) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } O_i = \sum_{j=1}^m T_{ij} \quad (2)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^n T_{ij} \quad (3)$$

$$V_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} M_{ij}^c \quad (4)$$

ここで、大規模な駅等においては、1 つの OD 間に複数の経路が存在するケースもある。また、駅構内の商業化等が進展しているため、旅客は必ずしも最短経路を移動するとは限らず、経路の距離等に基づいて経路交通量を推計することは難しいと考えられる。そこで本研究では、エントロピー最大化モデルを拡張し、計測される断面交通量の大小関係に基づいて経路交通量を推計する「経路交通量型エントロピー最大化モデル」を検討する。

ここで i は出発ノード番号、 j は到着ノード番号、 c はリンク番号、 k は経路番号、 O_i はノード i の発生交通量、 D_j はノード j の集中交通量、 T_{ij} はノード ij 間の分布交通量、 f_{ij}^k はノード ij 間の経路 k の経路交通量とする。分布交通量と経路交通量との間には式(5)の関係が成り立つ。

$$T_{ij} = \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \quad (5)$$

OD 表の整合性を満たすための制約条件は $O_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k$ ($j=1, \dots, m, k=1, \dots, r$)、 $D_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ij}^k$ ($i=1, \dots, n, k=1, \dots, r$) である。ここで式(5)を式(1)～(3)に代入し、次の最適化問題を定義する。

$$\min_{f_{ij}^k} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r (f_{ij}^k \ln f_{ij}^k - f_{ij}^k) \quad (6)$$

$$\text{Subject to } O_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \quad (7)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \quad (8)$$

ここで、変数 M_{ijk}^c を、ノード ij 間の経路 k を通る交通がリンク c を通過する場合は $M_{ijk}^c = 1$ 、それ以外は $M_{ijk}^c = 0$ と定義すると、 V_c は式(9)となる。

$$V_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k M_{ijk}^c \quad (9)$$

式(9)を制約条件に加えると、本問題は次の最適化問題として定義できる。

$$\min_{f_{ij}^k} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r (f_{ij}^k \ln f_{ij}^k - f_{ij}^k) \quad (10)$$

$$\text{Subject to } O_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \quad (11)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \quad (12)$$

$$V_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k M_{ijk}^c \quad (13)$$

最適化問題における決定変数は経路交通量そのものである。なお、1OD に 1 経路のみが存在する場合は、式(10)～(13)において $k \in \{k = 1\}$ とすることと等価である。式(10)～(13)から、ラグランジュ関数 L を定義する(式(14))。

$$\begin{aligned} L = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r (f_{ij}^k \ln f_{ij}^k - f_{ij}^k) \\ & + \sum_{i=1}^n \lambda_i \left(O_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \right) \\ & + \sum_{j=1}^m \gamma_j \left(D_j - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \right) \\ & + \sum_{c=1}^p \beta_c \left(V_c - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k M_{ijk}^c \right) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 $\lambda_i, \gamma_j, \beta_c$ はラグランジュ乗数である。

次に、ラグランジュ関数 L を決定変数 f_{ij}^k で偏微分したものが 0 になる時に最適解を得ることができる。

$$\frac{\partial L}{\partial f_{ij}^k} = \ln f_{ij}^k - \lambda_i - \gamma_j - \sum_{c=1}^p \beta_c M_{ijk}^c = 0 \quad (15)$$

よって、

$$f_{ij}^k = \exp \left(\lambda_i + \gamma_j + \sum_{c=1}^p \beta_c M_{ijk}^c \right) \quad (16)$$

(2) 最適化アルゴリズム

ここで、式(10)～(13)を元問題と言う。目的関数にラグランジュ乗数を乗じた制約条件を取り込むと、ラグランジュ緩和問題となる（式(17)）。

$$\begin{aligned} \min_{\lambda_i, \gamma_j, \beta_c} & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r (f_{ij}^k \ln f_{ij}^k - f_{ij}^k) \\ & + \sum_{i=1}^n \lambda_i \left(O_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \right) \\ & + \sum_{j=1}^m \gamma_j \left(D_j - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \right) \\ & + \sum_{c=1}^p \beta_c \left(V_c - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k M_{ijk}^c \right) \end{aligned} \quad (17)$$

制約条件を満たす観点からは、ラグランジュ緩和問題の目的関数の第2項～第4項は制約条件を満たす場合はすべて0になり、元問題とラグランジュ緩和問題の最適値は同じになる。一方、制約条件を満たしていない状態では、ラグランジュ乗数を乗じた値をペナルティとして加えることと解釈できる。本研究では、第2項～第4項が全て極めて0に近い値となるラグランジュ乗数を探索していく解法である「劣勾配法⁹⁾」を適用する。本研究におけるラグランジュ緩和問題の場合、以下のアルゴリズムとなる。

• Step1

$\lambda_i, \gamma_j, \beta_c$ に初期値0を代入する。 $ita=1$ とする。探索ステップ長のパラメータ z （正の整数値）を定める。

• Step2

$\lambda_i, \gamma_j, \beta_c$ から $f_{ij}^k = \exp(\lambda_i + \gamma_j + \sum_{c=1}^p \beta_c M_{ijk}^c)$ で f_{ij}^k を算定し、劣勾配を以下とする。

$$\begin{aligned} \partial g(\lambda_i) &= O_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \\ \partial g(\gamma_j) &= D_j - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r f_{ij}^k \\ \partial g(\beta_c) &= V_c - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r f_{ij}^k M_{ijk}^c \end{aligned}$$

• Step3

探索ステップ長を以下の通り定める。

$$\begin{aligned} \text{step}(\lambda_i) &= \frac{\partial g(\lambda_i)}{z + ita} \\ \text{step}(\gamma_j) &= \frac{\partial g(\gamma_j)}{z + ita} \\ \text{step}(\beta_c) &= \frac{\partial g(\beta_c)}{z + ita} \end{aligned}$$

• Step4

ε は予め設定した微小数値とする。全てのラグランジ

ュ乗数について $|\text{step}(\lambda_i)| < \varepsilon$, $|\text{step}(\gamma_j)| < \varepsilon$, $|\text{step}(\beta_c)| < \varepsilon$ となったら、もしくは、 ita が予め設定した最大計算回数に達したら計算を終了し、結果を出力する。

• Step5

そうでないならば、ラグランジュ乗数を以下のように更新する。

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \lambda_i + \text{step}(\lambda_i) \\ \gamma_j &= \gamma_j + \text{step}(\gamma_j) \\ \beta_c &= \beta_c + \text{step}(\beta_c) \end{aligned}$$

• Step6

ita に $ita+1$ を代入して、step2に戻る。

3. 数値実験による推計精度の検証

ここでは、1つのODに複数経路が存在する例として、2つの出入口（北口、南口）、2つの改札口、2つのホームを有する駅を想定した仮想の駅構内の歩行者ネットワーク（図-2）を対象とした数値実験により、経路交通量型エントロピー最大化モデルの推計性能を検証する。検証方法のフローを図-3に示す。

各出発ノード・到着ノードにおいて、発生交通量と集中交通量が防犯カメラ等により計測され、リンク①、②、③、④では自動改札機により、リンク⑤、⑥、⑦、⑧では防犯カメラ等により断面交通量が計測されていると想定する。また、複数の経路が想定されるODでは、最大2経路を設定する。例えば、ノード1発→ノード4着のODでは経路1：1→A→C→D→4と経路2：1→A→B→D→4の2経路を設定する。このネットワークで設定する経路は20経路である。

その後、設定した歩行者ネットワークに基づき、出発ノード、到着ノード間の経路交通量を乱数により作成して、これを正解経路交通量とする。この経路交通量の正解値を積算することで、各ノードの発生交通量と集中交通量、各リンクの断面交通量が求められる。これらを計測値と見做して、経路交通量型エントロピー最大化モデルへ入力し、経路交通量を推計する。モデルから出力された経路交通量の推計値と正解値とを比較し、モデルの推計精度を検証する。本研究では、推計値と正解値の相関係数とRMSE（Root Mean Squared Error、二乗平均平方根誤差）で評価する。

ここで、実駅での経路交通量はラッシュ方向のホームへの到着が極端に多くなったり、上りホームから下りホーム（あるいはその逆）への移動は極端に少ない等、交

通量が偏るという特徴を持つ。そこで、正解経路交通量の作成に当たっては極小～極大の5段階の交通量レベルに分類し（表-1），各経路に交通量レベルを設定する（表-2）。各経路に設定した交通量レベルに対応する最小値，最大値の範囲で整数の乱数を発生させ、正解経路交通量とする。予め定めた試行回数 N 回分の正解経路交通量を作成し、 N 回の数値実験を行う。本研究では、試行回数 $N=10$ として検証を進める。

検証結果を表-3に示す。また、試行 No.1 における正解値と推計値の関係を図-4に例示する。相関係数の平均値は0.94で、全ての試行において0.90以上の相関係数となっており、概ね良好な精度で経路交通量が推計されていることが確認できる。

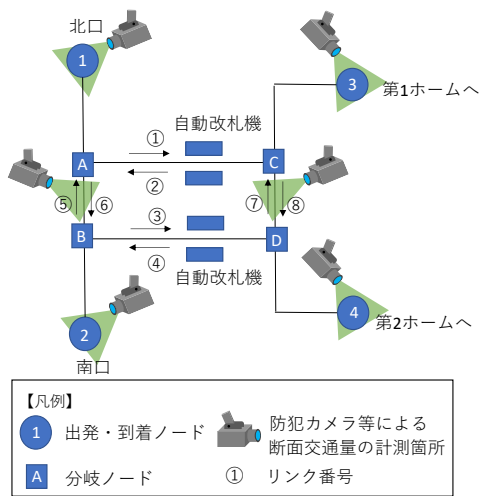


図-2 検証対象の歩行者ネットワーク

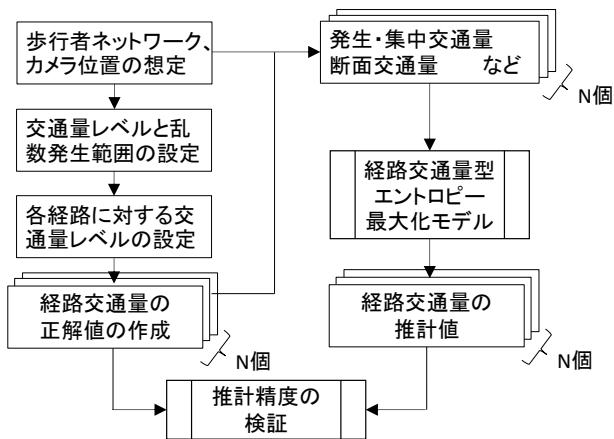


図-3 検証方法のフロー

表-1 交通量レベルと乱数発生範囲の設定

単位:人	最小	最大
極大	501	1,000
大	101	500
中	51	100
小	11	50
極小	1	10

表-2 各経路に対する交通量レベルの設定

発 ノード	着 ノード	経路 番号k	経路	交通量 レベル
1	2	1	1→A→B→2	小
1	3	1	1→A→C→3	極大
1	3	2	1→A→B→D→C→3	中
1	4	1	1→A→C→D→4	大
1	4	2	1→A→B→D→4	大
2	1	1	2→B→A→1	小
2	3	1	2→B→A→C→3	極大
2	3	2	2→B→D→C→3	大
2	4	1	2→B→D→4	中
2	4	2	2→B→A→C→D→4	小
3	1	1	3→C→A→1	小
3	1	2	3→C→D→B→A→1	大
3	2	1	3→C→A→B→2	中
3	2	2	3→C→D→B→2	小
3	4	1	4→D→C→3	極小
4	1	1	4→D→B→A→1	中
4	1	2	4→D→C→A→1	中
4	2	1	4→D→B→2	大
4	2	2	4→D→C→A→B→2	中
4	3	1	4→D→C→3	極小

表-3 検証結果

試行No.	相関係数	RMSE
1	0.968	58.723
2	0.916	95.404
3	0.956	77.359
4	0.958	72.990
5	0.943	90.546
6	0.929	99.090
7	0.916	104.877
8	0.914	79.995
9	0.910	90.678
10	0.957	67.268
平均	0.937	83.693
標準偏差σ	0.022	14.834

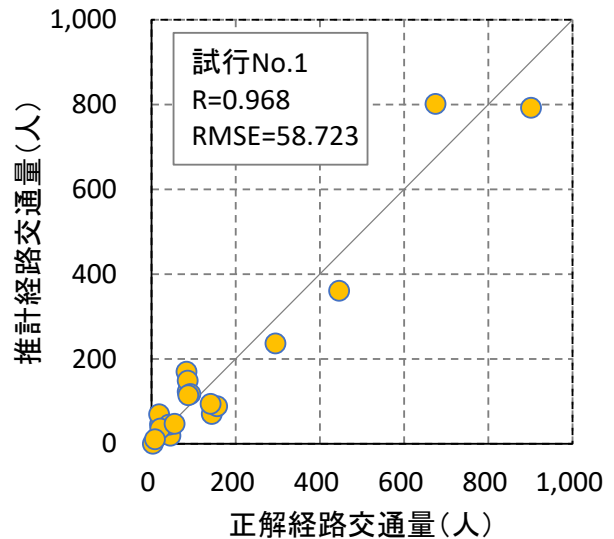


図-4 正解経路交通量と推計経路交通量の関係（試行No.1）

4. 自動改札データを用いた推計精度の検証

ここでは、都市圏に実在する2駅を対象として、当該駅の自動改札データ等に基づいて、実駅への適用性を検

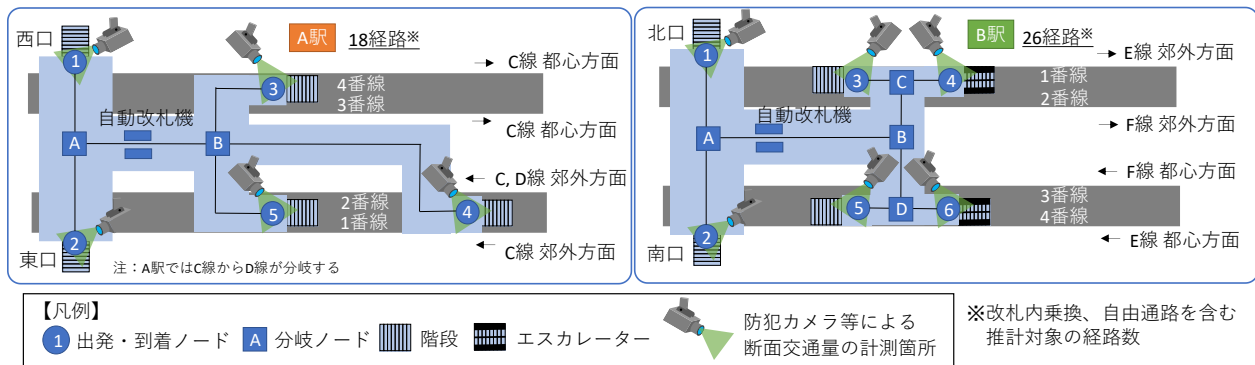


図-5 検証対象駅において想定した歩行者ネットワーク（駅舎等は概略図）

証する。

(1) 検証対象

2面4線のホームを有する、都市圏のA駅（乗降旅客数：約18,000人／日）、B駅（乗降旅客数：約34,000人／日）を検証対象とする（図-5）。両駅には自社の2路線が乗り入れるため改札内コンコースを通過する乗換旅客が存在する。また、橋上駅舎であるため、自由通路を通過する通行者も存在する。これらは自動改札データでは観測することはできない。各駅では、出入口、昇降口において防犯カメラとして設置されているビデオカメラ、もしくは仮設したビデオカメラの動画解析により断面交通量を計測する⁹⁾ことを想定する。なお、ビデオカメラの動画解析による断面交通量の計測には計測誤差が発生するが、本研究の分析では、自動改札データの利用の有無が推計精度に与える影響を切り分けるため、断面交通量の計測では計測誤差が発生しないと仮定する。

本章では、経路交通量型エントロピー最大化モデルの目的関数（式(17)）に入力される情報量が推計精度に与える影響を定量的に考察する。ここでは検証例として、目的関数（式(17)）の第4項に関する情報を取り上げる。第4項に関する情報がある場合は、自動改札機で方向別の断面交通量が計測されている状況、第4項に関する情報がない場合は自動改札機で方向別の断面交通量が計測されていない状況と同義である。以降では、前者を「自動改札データあり」ケース、後者を「自動改札データなし」ケースと呼ぶ。

(2) 検証方法

以下の手順で検証を行う。

- ① 経路交通量 f_{ij} を自動改札データ（方向別通過人員データ）により作成し、検証用の正解分布交通量データとする。
- ② 正解分布交通量データから各ノードの発生交通

量、集中交通量、リンクの断面交通量を算定する。実際には、これらは防犯カメラ等の動画解析や自動改札機等により計測されるデータである。

- ③ 「自動改札データあり」ケースでは、自動改札機において、ほぼ正確な断面交通量が計測されていると想定し、②で算定した断面交通量そのものを計測値として用いる。
- ④ 上記③で算定した計測値を経路交通量型エントロピー最大化モデルに入力し、経路交通量 f_{ij} を推計する。ただし「自動改札データなし」ケースでは、自動改札機における方向別の断面交通量データを入力しない。
- ⑤ 正解分布交通量と推計分布交通量とを突き合せ、相関係数とRMSE（Root Mean Square Error: 平均平方二乗誤差）により推計精度を検証する。

ここで検証手順①では、A駅、B駅の自動改札機で2020年のある1日（平日）に実際に記録された方向別の通過データをもとに、以下の仮定等に従って時間帯別の正解分布交通量データを作成する。

- ・ 駅勢圏の状況から出入口の利用率を仮定する。A駅では出入口の利用率を西口：東口＝0.3：0.7、B駅では北口：南口＝0.7：0.3とする。
- ・ 1日の時間帯を朝時間帯（時間帯No.①～⑪、4:00～8:44）、夜時間帯（時間帯No.⑫～⑬、17:00～1:59）、その他時間帯に区分し、入場者・出場者別に方面別の利用比率を仮定する（表-4）。
- ・ A駅の1、2番線ホームの2つの昇降設備であるノード4、ノード5の階段の利用率は、改札口からの距離を勘案しノード4：ノード5＝0.3：0.7と仮定する。
- ・ B駅の各ホームの階段とエスカレーターの利用率は階段：エスカレーター＝0.4：0.6と仮定する。

- ・ 同一ホームの昇降設備間の移動はないものとする。
(A 駅のノード 4・ノード 5 間など)

以上の仮定から、自動改札データ（方向別通過人員データ）を按分して分布交通量データを作成し、これを正解分布交通量とする。なお、自動改札データでは捕捉できない自由通路の通行者数と改札内の乗換旅客数は、以下のように設定する。

- ・ 自由通路の通り抜け者数は、入場者の分布交通量の平均値を最大とする乱数を発生させ、方向別の通り抜け者数とする。
- ・ 線区間の改札内の乗換旅客数は、出場者の分布交通量の平均値を最大とする乱数を発生させ、方向別の乗換旅客数とする。

表-4 利用比率の仮定 (A 駅, B 駅共通)

時間帯	入場 (乗車)		出場 (降車)	
	都心方面へ	郊外方面へ	都心方面より	郊外方面より
朝	0.8	0.2	0.5	0.5
夜	0.5	0.5	0.8	0.2
その他	0.5	0.5	0.5	0.5

なお、正解分布交通量における自動改札の通過人数は交通量全体の 79%~94% (A 駅) , 83%~94% (B 駅) である。両駅ともに類似の旅客流動となっており、駅や時間帯によって変化する旅客人数規模が推計精度に与える影響を考察できると考えられる。

以上の仮定等について、階段とエスカレーターの利用率等は、本来、交通量調査等を実施して設定する必要がある。しかしながら本研究での検証は、分布交通量推計システムの実用化への初期段階の検討として、経路交通量型エントロピー最大化モデルの実駅での適用性を見通しを得ることが目的であることから、実駅で取得したデータによる検証は今後の課題としたい。

(3) 検証結果

自動改札の通過人数が 0 人ではない各時間帯 (A 駅では各 33 時間帯, B 駅では各 32 時間帯) の正解分布交通量データを作成し、経路交通量型エントロピー最大化モデルにより分布交通量を推計して、正解分布交通量と推計分布交通量の相関係数, RMSE を算出した結果を、それぞれ図-6, 図-7 (A 駅) 図-8, 図-9 (B 駅) に示す。ここで、グラフ中の青線は「自動改札データなし」ケースである。一方、オレンジ線は「自動改札データあり

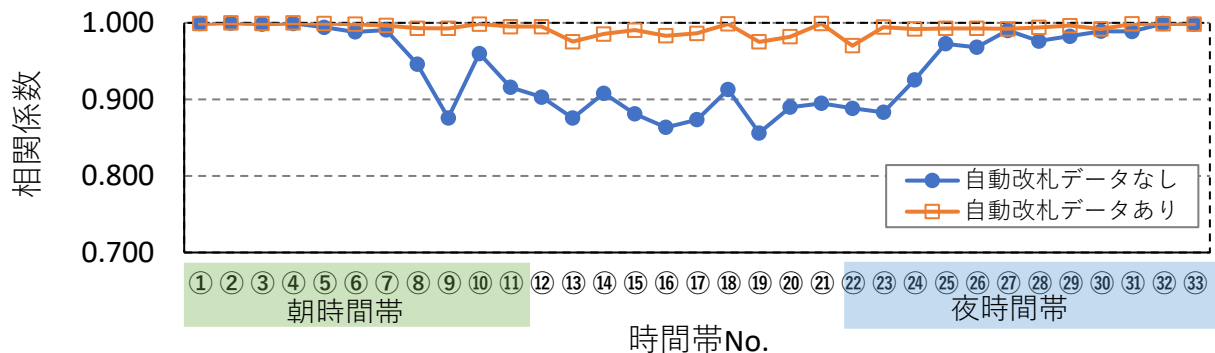


図-6 各時間帯における正解分布交通量と推計分布交通量の相関係数 (A 駅)

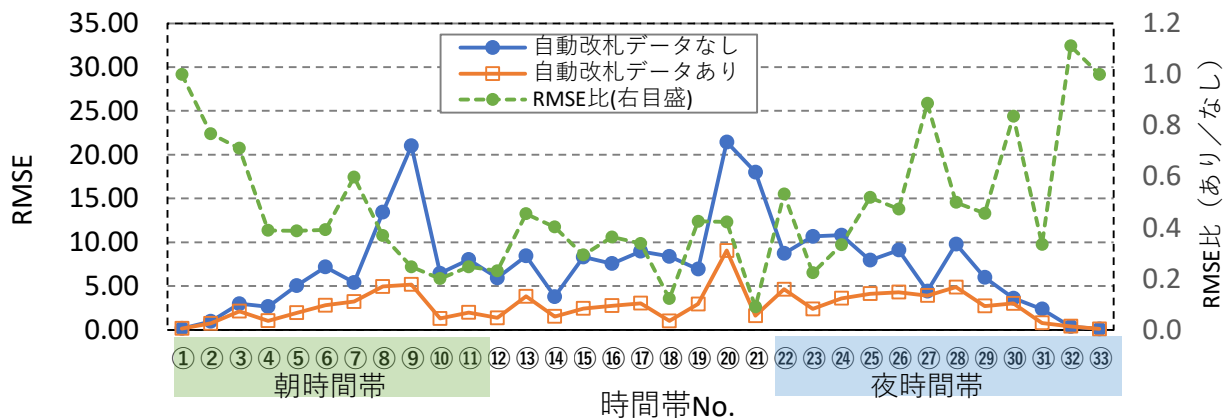


図-7 各時間帯における正解分布交通量と推計分布交通量の RMSE (A 駅)

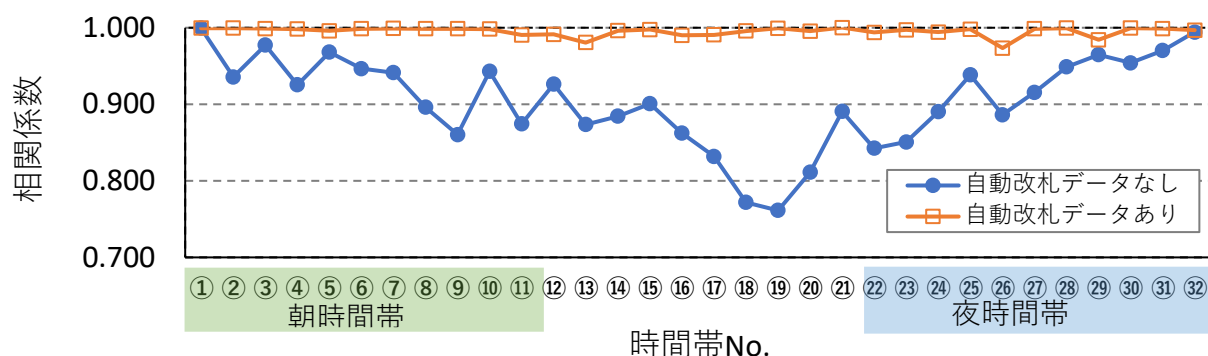


図-8 各時間帯における正解分布交通量と推計分布交通量の相関係数 (B 駅)

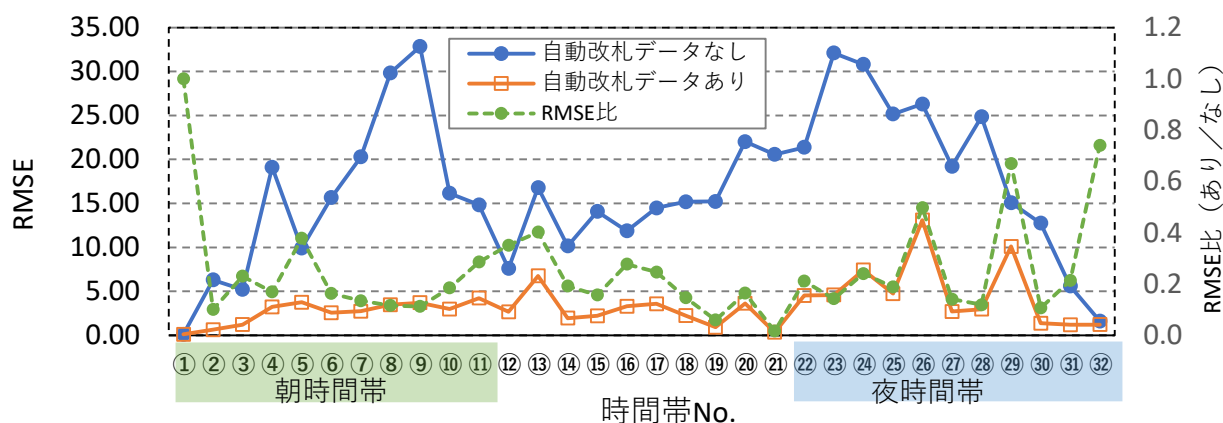


図-9 各時間帯における正解分布交通量と推計分布交通量のRMSE (B 駅)

り」ケースである。また、図-7 と図-9 の RMSE 比は、「自動改札データあり」ケースの RMSE を「自動改札データなし」ケースの RMSE で除したものである。

A 駅、B 駅ともに「自動改札データあり」ケースではほとんどの時間帯で $R=0.98$ 以上の高い相関係数を示しているおり、一日にわたって良好な精度で分布交通量が推計できていることが分かる。一方「自動改札データなし」ケースでは早朝や夜間の時間帯を除く時間帯で、相関係数が低下していることが見て取れる。また、RMSE の比較により誤差の減少率を評価することができる。例えば、A 駅の朝の時間帯⑨～⑪では、RMSE は 30%程度まで減少しており、自動改札データの活用による分布交通量の推計精度の向上効果が示されている。

A 駅と B 駅を比べると、乗降旅客数が A 駅の 2 倍程度である B 駅の方が、自動改札データの利用の有無が推計精度に与える影響は大きく、B 駅では自動改札データの活用によりほぼ一日にわたって RMSE は 20～40%程度まで減少させる効果があると言える。ここで、各駅の時間帯毎の総交通量と RMSE の関係を図-10 に示す。「自動改札データなし」ケースでは総交通量が多い程、RMSE が単調増加する傾向が明らかであるが、「自動改札データあり」ケースでは、バラツキはあるものの、総交通量が多い時間帯でも RMSE の増加は抑制されていることが

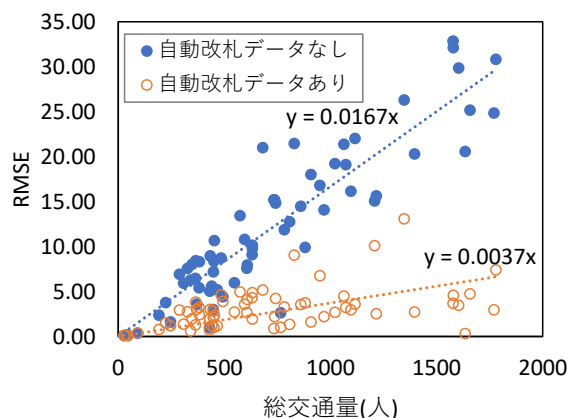


図-10 総交通量と RMSE の関係

分かる。これは、駅改良計画の観点から最も着目すべきである総交通量が多い時間帯（＝ラッシュ時間帯）において、良好な分布交通量の推計精度を得るためには、自動改札データの活用が必要であることを示す結果であると言える。

5. まとめ

本研究では、駅改良計画を検討する際の基礎データとなる駅構内における分布交通量の把握のために筆者らが提案している「駅構内の分布交通量自動推計システム」の主要な構成要素である分布交通量推計モデルについて、エントロピー最大化モデルにラグランジュ緩和法を適用し、自動改札データ等を用いた数値実験により、分布交通量の推計精度等を検証した。得られた成果は以下の通りである。

- ・ ラグランジュ緩和法を用いたエントロピー最大化モデル（経路交通量型エントロピー最大化モデル）により、1ODに複数経路が存在する歩行者ネットワークにおいて良好な精度で経路交通量を推計できることを示した。
- ・ 実駅の自動改札データ等による精度検証を通じて、実駅の歩行者ネットワークにおいて、1日にわたって良好な精度で分布交通量を推計可能であることが確認された。これにより、実駅において開発したモデルが適用できる見通しが得られたと考える。
- ・ 自動改札機で取得される通過人員データは、良好な分布交通量の推計精度を得るための入力データとして重要な役割を持つことが示された。特に分析対象駅の乗降旅客数が多い程、良好な分布交通量の推計精度を得るためには、自動改札データが必要であることが明らかとなった。

今後は、ビデオカメラの動画解析による断面交通量の計測において発生する計測誤差が分布交通量の推計精度に与える影響を検証するとともに、実駅で取得したデータを用いたモデルの改良や推計システムの開発と実駅で

の検証試験等を行い、駅構内の分布交通量自動推計システムの実用化を目指す。

謝辞：本研究の遂行にあたり、草部博輝氏（株式会社ジェイアール総研情報システム）に有益なアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、石突光隆：駅設備の配置検討のための旅客流動シミュレーション技術，運転協会誌，Vol.61，No.9，pp.1-4，2019.
- 2) 国土交通省：東京圏における今後の都市鉄道のあり方について（交通政策審議会第答申198号），2016.
- 3) Henk, J. V. and Luice, G. W.: The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts, Transportation Research, 14B, No.3, pp.281-293, 1980.
- 4) 佐佐木綱：吸収マルコフ過程による交通量配分理論，土木学会論文報告集，第121号，pp.21-32，1965.
- 5) 高山純一，杉山智美：吸収マルコフ連鎖を用いた観測交通量からのOD推計法に関する研究，土木学会論文集，No.569/IV-36，pp.75-98，1997.
- 6) 顧宗超，大佛俊泰：歩行者交通量に基づく地下空間における歩行者の起点・終点の推定，日本建築学会計画系論文集，第81巻，第730号，pp.2625-2634，2016.
- 7) 柴田宗典，石突光隆，対馬銀河：断面交通量に基づくOD交通量推計モデルの比較分析－駅構内におけるOD交通量自動推計の実現に向けて－，鉄道工学シンポジウム論文集，No.24，pp.57-64，2020.
- 8) 宮本裕一郎：数理最適化入門(3) ラグランジュ緩和と劣勾配法（チュートリアル），応用数理，23巻，3号，pp.129-134，2013.
- 9) 対馬銀河，石突光隆，柴田宗典：鉄道駅構内における断面交通量の自動計測に関する基礎検討，土木計画学研究・講演集，vol.62，CD-ROM，2020.

(Received April 2, 2021)

(Accepted June 4, 2021)

A STUDY ON PEDESTRIAN OD FLOW ESTIMATION FOR RAILWAY STATIONS WITH APPLYING LAGRANGIAN RELAXATION METHOD

Munenori SHIBATA, Mitsutaka ISHIZUKI and Ginga TSUSHIMA

This study proposes extended entropy maximization model which can deal with traffic volume on several routes as a pedestrian OD estimation model in railway stations with applying sub-gradient method for Lagrangian relaxation method. Reproducibility of the model is evaluated by correlation between confirmatory OD data and estimated OD data and RMSE. This study demonstrated that proposed model possibly estimates OD flow from section flow volume data with adequate accuracy through a day. Section flow data derived from automatic ticket machines play an important role for estimating OD flow with high accuracy, especially in a station used by the larger number of passengers.