

立ち寄り行動を考慮した大規模地下街における歩行者OD交通量の推定

矢田部航成*・大佛俊泰**・岸本まき**

Estimating Pedestrians' Origin-Destination Matrix in Massive Underground Space Considering Stopover Behavior

Kosei YATABE*, Toshihiro OSARAGI** and Maki KISHIMOTO**

Abstract: Detailed information of pedestrian traffic flow is important for discussing the effects of urban redevelopment projects. Although many approaches have been proposed for estimating Origin-Destination (OD) pedestrian flow using the pedestrian cross-sectional flow survey, only a few studies have focused on pedestrians' stopover behavior. In this research, we construct a method for estimating pedestrian OD traffic flow, which includes a route choice model that takes into consideration pedestrians' stopover behavior.

Keywords:立ち寄り行動 (stopover behavior), 地下空間 (underground space), 歩行者交通量調査 (pedestrian flow survey), OD 推定 (Origin-Destination matrix estimation), エントロピー最大化法 (entropy maximization method)

1. はじめに

複数の鉄道駅に接続する大規模な地下街は、乗換や周辺施設を繋ぐ通路空間としてだけでなく、食事や買い物を目的とする人々の滞留空間として機能している。このような地下街における精緻な歩行者交通量の把握は、歩行者流動の制御や避難計画の策定に限らず、都市再開発の効果検証においても重要である。例えば、Gu・Osaragi (2016) は、地下街ネットワークと歩行者断面交通量調査のデータを用いて OD 交通量を推計する方法を提案している。しかし、歩行者の滞留行動に着目した分析は十分ではない。本稿では、歩行者の立ち寄り行動を考慮した OD 交通量の推定方法を提案する。具体的には、まず、歩行者の移動を通過交通と立ち寄り行動を含む交通に区別した上で、地点 $i-j$ 間の移動コスト C_{ij} を計算する。次に、エントロピー最大化法を用いて OD 交通量 T_{ij} を推定する。その上で、リンク l の交通量 p_l を計算し歩行者断面交通量調査で得られたリンク交通量との誤差を評価することで、その精度を検証する。

2. 分析対象データの概要

交通量調査の概要を図 1 に示してある。本稿では、福岡市が平成 29 年 3 月 26 日(日)および 28 日(火)に実施した天神地下街における歩行者断面交通量調査を分析対象とする。本調査は、86ヶ所の観測点における 1 時間あたりの移動方向別交通量(上り, 下り)を 7 時から 22 時まで計測したものである。階段・エスカレーターなどの出入口では、全地点につ

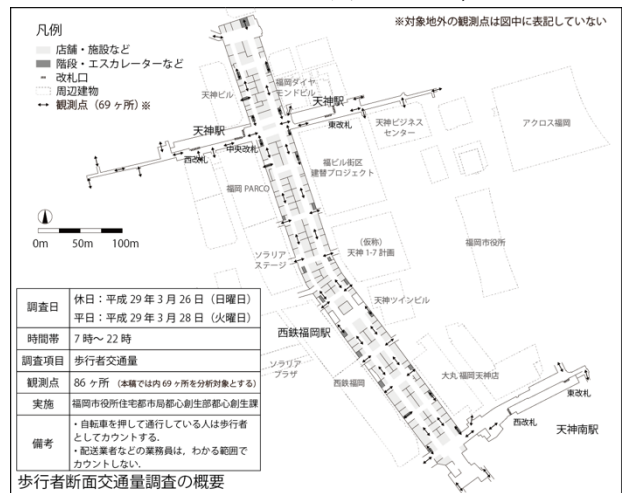


図 1 歩行者断面交通量調査の概要および天神地下街地図

* 学生会員 東京工業大学環境・社会理工学院 (Tokyo Institute of Technology)

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 E-mail : yatabe.k.aa@m.titech.ac.jp

** 正会員 東京工業大学環境・社会理工学院 (Tokyo Institute of Technology)

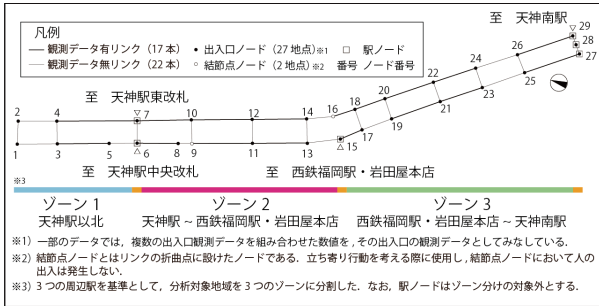


図2 天神地下街における分析用ネットワーク

いて観測データがあるものの、一部の通路リンクでは観測データが存在しない(図2)。また、観測データから直接OD交通量を得ることはできない。

3. エントロピー最大化法モデルを用いたOD交通量推定手法

本稿では、エントロピー最大化法モデルを用いて時刻 t における地点 $i-j$ 間の OD 交通量 $T_{ij}(t)$ を推定する(図3(a))。これにより、観測データとネットワークデータを用いるだけでは一意に定まらない OD 交通量について、尤もらしい値を推定できる。具体的には、歩行者が地点 $i-j$ 間を移動する際に用いる経路を抽出し(4章)、移動コスト C_{ij} (5.1節)と平均移動コスト C^* を与えた上で、図3(b)に示した制約条件を満たす OD 交通量 $T_{ij}(t)$ を推定する。次に、リンク交通量 $p_l(t)$ を推定する(5.2節)。以上の操作の下、観測データとの推定誤差が最小となるパラメータ値を勾配法を用いて推定する。なお、全ての移動が出入口ノードから出発し、出発地点とは異なる出入口ノードに向かうと仮定する。また、ここでは各時刻の OD 交通量を分析対象とし、全ての移動が各時刻内に完了すると仮定する(たとえば、8時30分から9時30分というような、時刻を跨ぐ移動は想定しない)。

4. 歩行者経路の抽出と経路移動コストの算出

4.1. 経路移動コスト $Cost_{ij}[N]$ の算出

OD 交通量の推定においては、地点 $i-j$ 間を結ぶ多様な経路の中から、歩行者が選択しうる経路を抽出する必要がある。具体的には、まず、地点 $i-j$ 間を結ぶ経路の内、同一ノードを複数回通過しない総経路群 $Route_{ij}$ を抽出する。その上で、各経路の移動距離、

最もらしい OD 交通量 $T_{ij}(t)$ を推定することは、下記の制約条件(図3(b))を満たす $T_{ij}(t)$ の組み合わせ N のうち確率 $W(T_{ij}(t))$ が最も大きいものを選ぶことである。

$$W(T_{ij}(t)) = (N!) / \prod_j (T_{ij}(t)!)$$

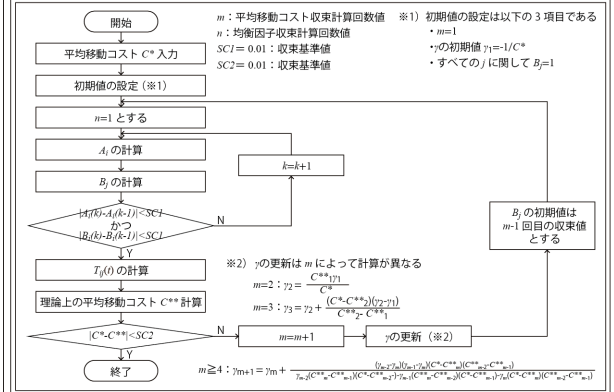
$T_{ij}(t)$ は制約条件と自然対数変換を用いて、下式で求められる。

$$T_{ij}(t) = A_i B_j O_i(t) D_j(t) \exp(-\gamma C_{ij})$$

ただし、

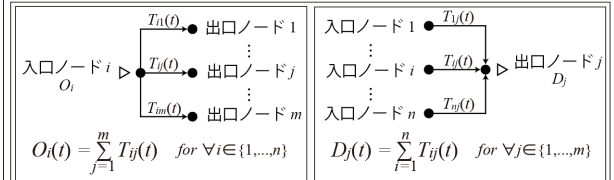
$$A_i = \frac{1}{\sum_j B_j D_j(t) \exp(-\gamma C_{ij})} \quad B_j = \frac{1}{\sum_i A_i O_i(t) \exp(-\gamma C_{ij})} \quad \gamma: \text{距離パラメータ}$$

C_{ij} : 移動コスト行列
 エントロピー最大化法モデルのパラメータ推定にあたっては、収束計算を必要とする。ここでは、非線形最適化問題に適用される2次補間法の一つとして知られている、一般化 Hyman 法を用いた、以下にアルゴリズムを示している。



エントロピー最大化法モデルのパラメータ推定アルゴリズム

(a) エントロピー最大化法モデル



制約条件 1: 入口ノード通過人数
 制約条件 2: 出口ノード通過人数

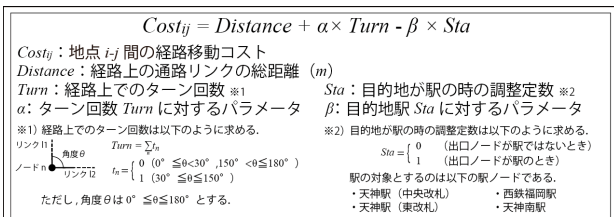
本稿では、歩行者が各時刻内に移動を完了することを想定する。

$$\sum_{i=1}^n O_i(t) = \sum_{j=1}^m D_j(t) \quad \text{for } \forall t \in \{7 \text{ 時台}, \dots, 21 \text{ 時台}\}$$

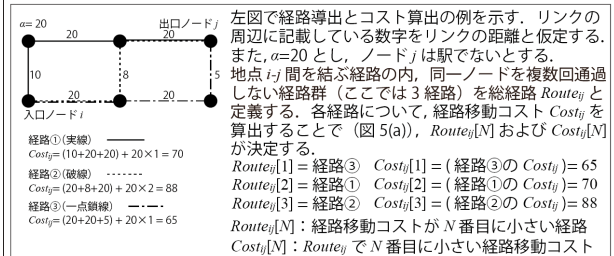
制約条件 3: 観測時間

(b) OD 交通量推定における制約条件

図3 OD 交通量 T_{ij} 推定手法



(a) 経路移動コスト $Cost_{ij}$ の算出



(b) 経路移動コストの算出例およびソート済経路移動コスト $Cost_{ij}[N]$ の算出

図4 地点 $i-j$ 間の経路移動コスト $Cost_{ij}[N]$ 算出

ターン回数および目的地種別を考慮し、昇順でソートした際の要素番号 N を用いて、経路移動コスト $Cost_{ij}[N]$ を算出する(図4)。これにより、歩行者

の直線的な経路選択を好む傾向(大佛・田中, 2017), および, 駅の通勤・通学による定常利用性を考慮した経路移動コストの算出が可能となる.

4.2. 選択可能経路の抽出

OD 交通量の推定に関する既往研究の多くは, 歩行者は移動距離や移動時間が最短となる経路(最短経路)を用いて移動すると仮定している. しかし, 移動経路の選好傾向には個人差があり, 必ずしも最短経路に限定した分析は, 観測データとの乖離の原因となる. そこで本稿では, 最短経路に加えて, 移動コストが2番目に小さい経路(準最短経路)を, 歩行者の選択可能経路に含める.

5. 移動コストの算出とリンク交通量の推定

5.1. 移動コスト C_{ij} の算出方法

移動コスト C_{ij} の算出方法を図5に示してある. 本稿では, 歩行者の立ち寄り行動を考慮して OD 交通量を推定するため, 通過交通の移動コスト pC_{ij} と商店に立ち寄る歩行者(以下, 立寄歩行者)の移動コスト sC_{ij} を組み合わせて, 地点 $i-j$ 間の移動コスト C_{ij} を算出する.

通過交通における移動コスト pC_{ij} は, 地点 $i-j$ 間の最短経路および準最短経路の経路移動コスト $Cost_{ij}[N]$ を用いて算出する(図5(b)).

立寄歩行者における移動コスト sC_{ij} は, 立寄歩行者が立寄ノード k を選択する確率 P_k と経路移動コスト $Cost'_{ijk}[N]$ を用いて算出する(図5(c)). この時, 立寄ノード k を選択する確率 P_k は, 消費者は近くにある大きな店舗へ行くという傾向を前提に考案された商圈分析モデルのハフモデルを用いて算出する(図6). 本稿では, 簡単のため, 立寄ノードを分析ネットワーク上のノード(ただし, 駅ノードは除く)に限定し, 立寄歩行者は目的店舗の最近傍にあるノードに立ち寄ると仮定した. これは, 各店舗を立寄ノードとした場合, 分析時のネットワークにおけるリンク数・ノード数が増え, 計算時間の増大につながるためである.

5.2. リンク交通量の推定手法

リンクごとのリンク交通量 $p_l(t)$ の推定方法を図7

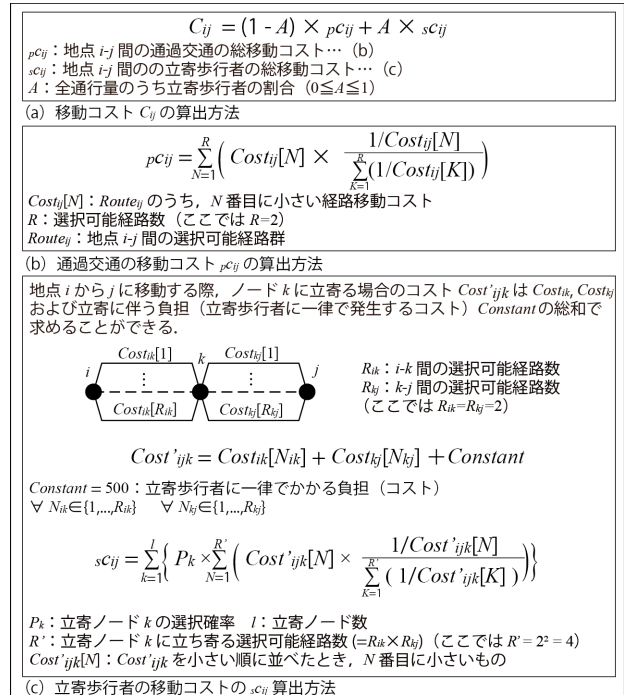


図5 経路選択に基づく移動コスト C_{ij} 算出

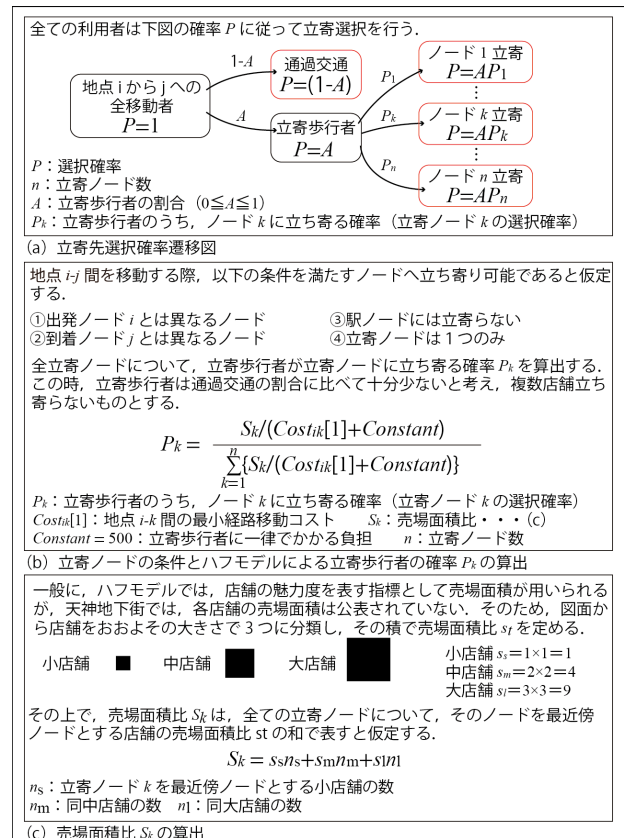


図6 経路選択における立寄先選択モデル

に示してある. リンク交通量 $p_l(t)$ は, 通過交通によるリンク交通量 $p p_l(t)$ と立寄歩行者によるリンク交通量 $s p_l(t)$ に区別して推定する. 具体的には, 歩行者は, 経路移動コストの小さい経路を優先的に選択

するという仮定の下、地点 $i-j$ 間の OD 交通量 $T_{ij}(t)$ を、2 地点間を結ぶ選択可能経路へ確率的に割り振る。すなわち、各経路の経路移動コストに基づいて経路選択人数 $pPr_{ij}[N](t) \cdot sPr_{ijk}[N](t)$ を算出する。以上の操作を全地点間でおこない、経路リンク含有定数 $pL_{ijl}[N] \cdot sL_{ijkl}[N]$ を乗じた総和を通過交通および立寄歩行者によるリンク交通量 $ppl(t) \cdot spl(t)$ とする。

リンク交通量 $ppl(t)$ の推定に必要なパラメータ (α, β, A, C^*) の推定方法を図 8 に示してある。観測データの得られた 17 本の観測リンクについて、観測データと推定データの自乗誤差 s が最小となる値を勾配法を用いて集計単位時間ごとに推定する。

6. OD 交通量とトリップ分布の推定結果

平日の朝 (8 時台)、正午 (12 時台)、午後 (15 時台)、夜 (18 時台) における OD 交通量 $T_{ij}(t)$ の推定結果を図 9 に示してある。

コンター図より全ての時間において立寄歩行者割合 A を考慮することで、リンク交通量の推定精度が向上していることがわかる。立寄歩行者を考慮しないとき ($A=0$) 平均推定誤差割合 s' (図 8(c)) は 13.6~17.4% であるが、考慮するとき ($A>0$) s' は 9.8~13.4% に低減している。

朝 (8 時台) の推定結果では、天神駅-天神南駅間の移動や同 2 駅からゾーン 1 の出入口ノードへ向かう人が多い (図 9(a))。これは、通勤・通学者が地下街を利用しているためだと考えられる。また、地下街の商店の営業時間外であるため、他の時間と比べて立寄歩行者割合 A が小さな値を示している。

正午 (12 時台) の推定結果では、近隣ノード間のトリップ数が多く (図 9(b))、午後 (15 時台) の推定結果では、トリップがまばらに分布しており、全体として利用者が少ない様子がわかる (図 9(c))。正午における地下街の利用者には、本地下街に慣れていない遠方からの来訪者が多くと推察される。他の時間と比べて、ターン回数に対するパラメータ α の値が大きく、対象地に不慣れな人ほどターン回数を減らす傾向 (大佛・田中, 2017) が確認できる。

夜 (18 時台) は、他の時間と比べて利用者が多い。

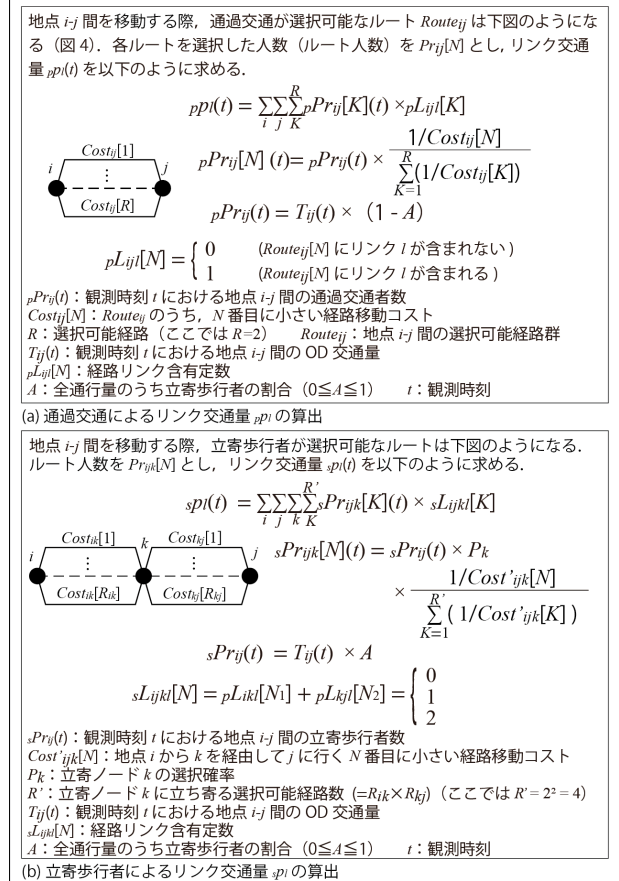


図 7 OD 交通量 T_{ij} を用いたリンク交通量の推定手法

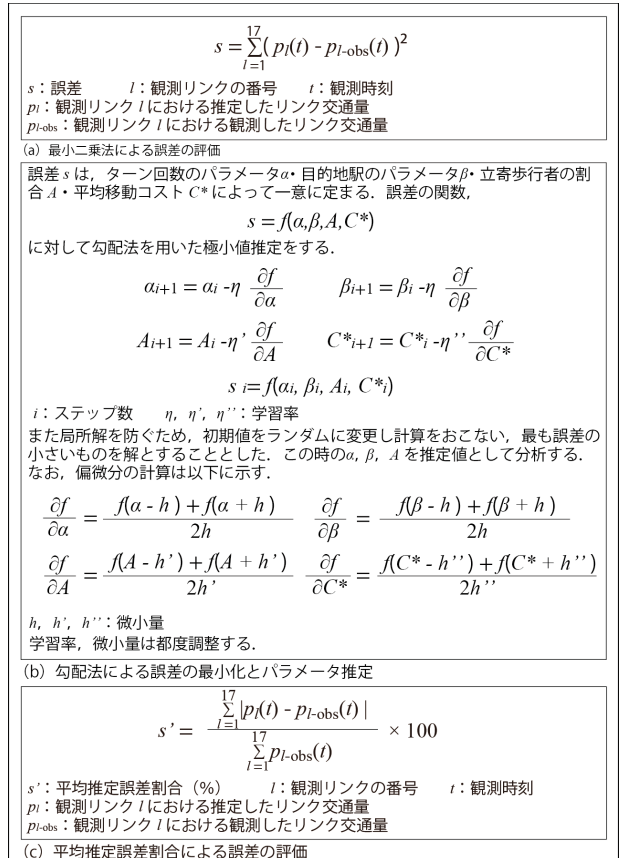


図 8 誤差の評価と勾配法によるパラメータ推定

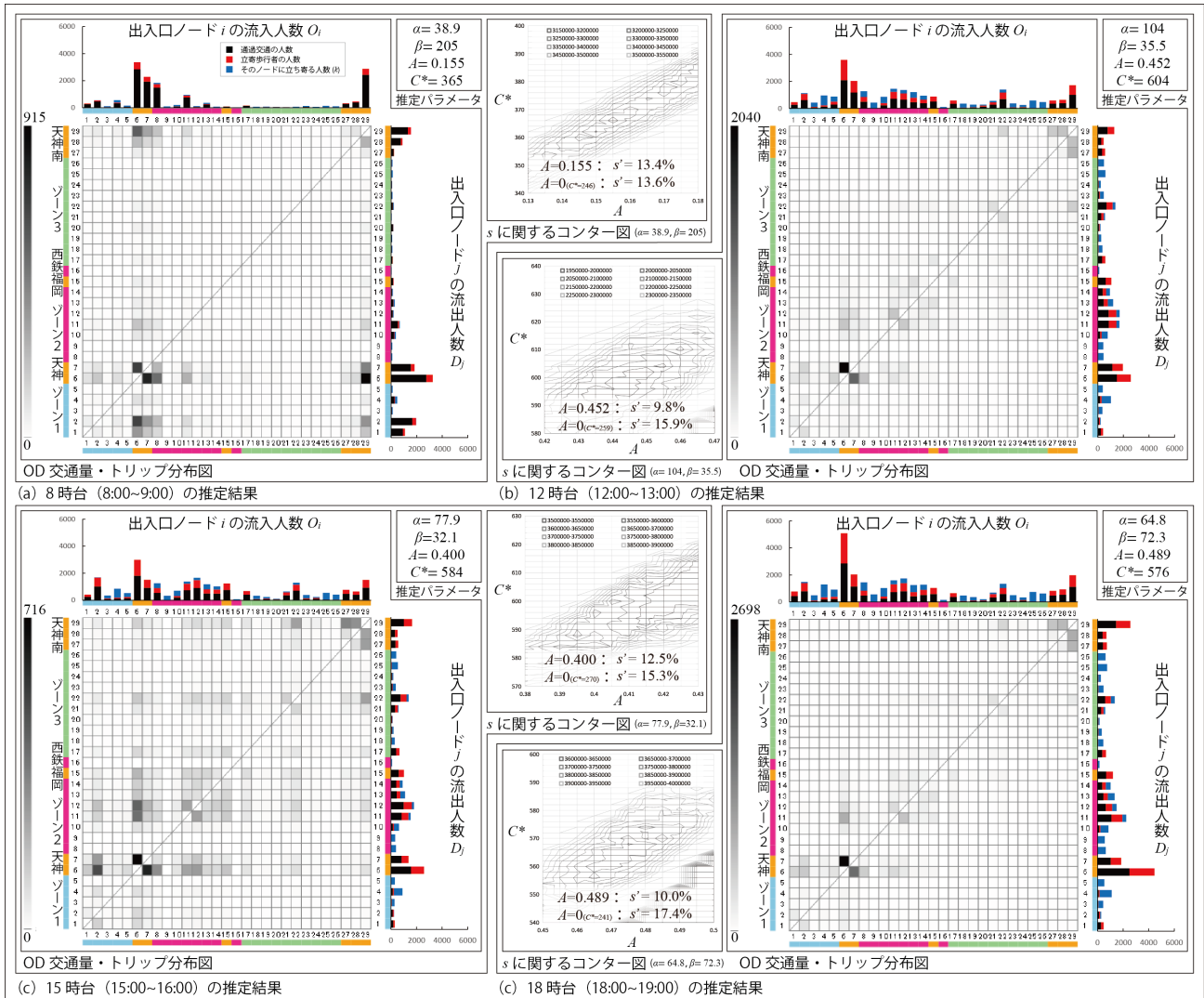


図9 推定したOD交通量の評価とトリップ分布

推定結果では、立寄歩行者割合 A が大きな値を示すことから、帰宅のための通過交通と購買のための立寄歩行者が混在していることがわかる (図9(d))。

7. まとめ

本稿では、エントロピー最大化法を用いて立ち寄り行動を考慮した歩行者 OD 交通量の推定手法を構築した。これにより、立ち寄り行動を考慮しないとき (立寄歩行者割合 $A=0$) より精度良く OD 交通量の推定が可能であることを示した。また、推定結果を時間ごとに比較することで、時間によって異なる歩行者の行動特性を把握できることを示した。

本稿で提案した立ち寄り先選択モデルは、簡素化した立ち寄り行動の記述に留まっている。複数店舗への立ち寄りや店舗滞在時間の考慮といった複雑な

歩行者行動を記述可能なモデルの構築は今後の課題である。

謝辞

本研究における歩行者断面交通量調査データは福岡市による。ここに記して関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 大佛俊泰・田中あずさ (2017) 経路選択に関わる要因分析と歩行者行動のモデル化, 日本建築学会計画系論文集, Vol.82, No.734, 895-903.
- Gu, Z. and Osaragi, T. (2016) Estimating Pedestrians' Movement in Underground Space Based on Flow Count Data, 日本建築学会計画系論文集, Vol.81, No.730, 2625-2634.