

Wi-Fi 観測誤差を考慮した 歩行者経路選択モデルの構築

川田 蒼葉¹・柳沼 秀樹²・寺部 慎太郎³・田中 皓介⁴

¹学生非会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641) E-mail:7620506@ed.tus.ac.jp

²正会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail: yaginuma@rs.tus.ac.jp

³正会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail: terabe@rs.tus.ac.jp

⁴正会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail: tanaka.k@rs.tus.ac.jp

都市開発や拠点整備による歩行空間の混雑問題が顕在化しており、質的なサービスレベルの低下が問題となっている。特に、複数のプロジェクトが進行する再開発地域では想定以上の滞在人口の増加により、歩行空間の混雑がより悪化している。そこで、より円滑な歩行空間を提供するためには、再開発による需要増や歩行者の経路選択行動を加味した歩行空間の整備と設計を検討する必要がある。本研究では、歩行者の経路選択行動をWi-Fiパケットセンサにより把握し、観測と経路選択を同時に扱うネットワーク解析手法を提案する。しかし、このデータ取得方法では観測時に発生する時間誤差が大きいと、従来のモデリング手法では十分な精度を担保できない。そこで、DDR (Domain of Data Relevance) による観測精度を明示的に考慮した離散選択型の歩行者経路選択モデルを構築し、実際の空間における適用を行うことで、混雑箇所の把握とそれに基づく設計案へのフィードバックを目指す。

Key Words : *pedestrian route choice, Wi-Fi packet sensor, observation error*

1. はじめに

近年、都市部の混雑悪化は早期に解決すべき重要な問題となっている。その混雑の影響は交通のみならず、周辺の歩行空間まで圧迫しており、特に再開発事業が行われている地域では予期しない混雑が発生している。歩行空間の多くは、建設基準法に準拠するのみであり、再開発事業による利用者の増加は加味されていない。また、事業者は再開発が歩行空間に与える影響を十分に考慮せずに開発を行っており、パブリックな歩行空間は容量を超える集客によって、混雑が悪化している現状にある。そのため、利用者に快適な歩行空間を提供するためには、再開発による需要増加を考慮した設計が求められる。

本研究では、歩行空間の新設・改良の設計段階に

おける検討に資することを念頭に、歩行者の経路選択行動を記述する交通量配分モデルを構築する。また、利用者の経路選択行動を Wi-Fi パケットセンサによって把握し、観測とモデリングを同時に行う歩行者ネットワーク解析手法を提案する。Wi-Fi パケットセンサによる観測は、従来手法に比べ情報の収集や処理にかかるコストを削減するという利点がある。一方、観測時に周辺環境や機械ごとの個体差により、過大な誤差が発生するという欠点がある。観測誤差の発生要因には、データの欠損や観測時刻のズレ、データ重複等の原因があると考えられるが、本研究では、特に観測時刻に着目し、観測誤差の修正を試みる。観測誤差を考慮するため、DDR(Domain of Data Relevance)¹⁾の概念を導入し、新たなモデリング手法を提案することで、より精度の

高い歩行者経路選択モデルの構築を可能とする。最後に、得られた経路選択結果から、将来の需要増加を加味した歩行者経路配分を行う。この結果をもとに、歩行空間評価を行うことで、混雑箇所の把握とそれに基づく設計案へのフィードバックが可能となる。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

本研究は観測誤差を考慮した経路選択モデルに関する研究である。観測誤差を考慮したモデリング手法は、データの性質から位置データ(Location data)と近接データ(Proximity data)に二分でき、それぞれの既往研究についてレビューをする。最後に本研究の位置づけを示す。

(1) 位置データ取得時の観測誤差を考慮したモデリング手法に関する研究の整理

位置データは、GPS データや聞き取り調査等から取得される報告されたトリップのように、位置情報から観測されるデータが該当する。

観測の不確実性を持つ GPS データと報告されたトリップに対して、Bierlaire and Frejinge¹⁾ は観測の曖昧さを残したまま経路選択モデルを推定するフレームワークを提案した。経路観測モデルの経路選択枝集合生成のために、データが関連づけられる空間的範囲について DDR (Domain of Data Relevance) の概念を提唱している。GPS データの場合であれば、各観測点の位置座標から一定の範囲(DDR)内に存在するリンクのみが経路候補集合と仮定することで、経路選択枝候補を外生的に定めることが可能となる。しかし、DDR を定義するためには観測点の誤差パラメータ σ の値が既知である必要があり、マッチング前の段階では各観測点の真の位置・空間情報を知ることではできないため、 σ は「ネットワーク上で均一」の値として分析者に設定される「所与」のパラメータとする必要があった。

そこで、大山・羽藤²⁾らは観測誤差分散パラメータ σ のネットワーク内不均一性を考慮したモデリングのフレームワークを提案した。具体的には、逐次的なリンクの特定を行うことで、候補リンク集合がモデルによって与えられることに着目した。観測点と候補リンクとの対応関係をあらかじめ明らかにすることで、その空間的関係からリンク固有変数としての観測誤差分散パラメータが推定可能となる。また、逐次リンク観測モデルについては、ベイジアンアプローチに基づく逐次リンク選択モデルを採用す

ることで、選択枝集合の列挙を必要とせずに行動メカニズムを考慮した観測の補正を行うことができる。いずれのパラメータについても「所与」とせずモデルを通して推定を可能とすることで、バイアスの軽減に結びつく。

(2) 近接データ取得時の観測誤差を考慮したモデリング手法に関する研究の整理

近接データは、Wi-Fi固定観測・Bluetooth固定観測のように、近接情報から得られるデータが該当する。

Oijen, Daamen, Hoogendoorn³⁾ は、Wi-Fi 固定観測時に生じるデータの欠損に着目し、誤差を考慮したモデルのフレームワークを提案している。従来、観測されたデータにのみ基づいてモデリングを実施していた。しかし、実際はデータの欠損がみられ、センサ付近を通過していても観測されない可能性があり、検出率 θ によって再現することを試みた。そのため、再帰型ロジットモデルを用いることで、検出率 θ の推定と各パラメータ β_n の同時推定を可能とした。この研究では、データの欠損に着目し補正を試みたが、時間に対する補正は今後検討すべき項目として挙げられている。

(3) 本研究の位置づけ

本研究では、Wi-Fi 固定観測の補正について、新たなモデリング手法を示す。DDR の概念を取り入れることで、時間誤差の補正をするモデリング手法を提案する。DDR は位置データの補正に用いられていたものであるが、これを Wi-Fi 固定観測に応用する。ある観測点ごとに発生する時間誤差に着目することによって、各観測点の誤差範囲の大きさを同時に推定できる経路選択モデルのフレームワーク構築を目指す。

3. 分析対象地域および Wi-Fi 調査の概要

本研究では、渋谷駅東口再開発地域を対象にケーススタディ分析を行う。当該地域では、渋谷ストリームや渋谷スクランブルスクエアの開業等、大規模施設整備が進行しており、大幅な歩行者数の増加が予想されている。そのため、道路管理者は各施設を接続する歩行空間として、東口交差点上の歩行デッキ、地下通路と滞留広場の整備を進めている。

対象地域の歩行移動の実態を把握するために、Wi-Fi パケットセンサを利用した歩行者経路データの収集調査を行った。現地調査は、2018年7月13日(金) 12:05~13:05 の1時間で実施した。Wi-Fi パケットセ

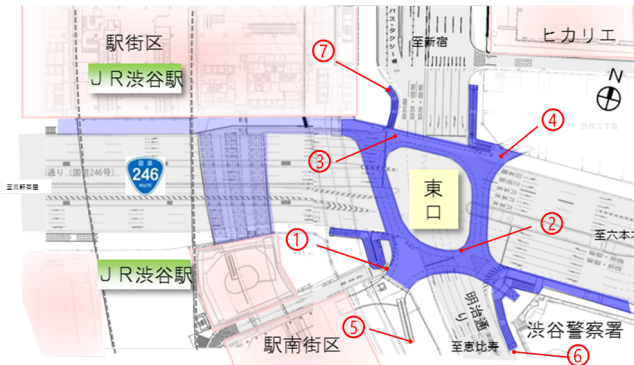


図-1 地上 Wi-Fi 装置設置箇所

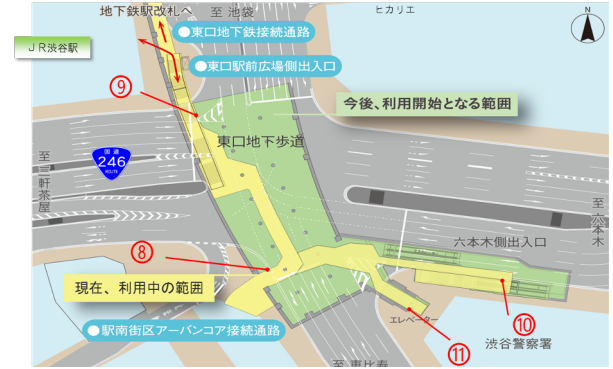


図-2 地下 Wi-Fi 装置設置箇所

ンサは、図-1⁴⁾、図-2⁴⁾に示す 11 地点に設置し、センサ周辺に存在する歩行者のスマートフォン等から機器固有の ID と通過時刻を取得した。その際、このデータを用いて歩行者データのみを取り出し、滞留行動や重複データの除外といった、データクリーニングを施し、各センサ間で取得された ID をマッチングすることで、個人の歩行経路を特定した。

4. 歩行者の非集計経路選択モデルの構築

(1) モデルのコンセプト

個人の経路選択行動を考える上で、新たに歩行空間ネットワークを評価するために、離散選択モデルを援用し、Wi-Fi 観測時の誤差を考慮したモデルを構築した。観測誤差の補正に関する研究としては、GPS 観測時の誤差を考慮したモデル²⁾はすでに提案されているが、本研究のように Wi-Fi 観測誤差の時間補正に関するモデルは見受けられない。そこで、個人の経路選択に関わる外生的な要因として観測誤差を定義した、新たな歩行者経路選択モデルの構築を試みる。

最後に、歩行者経路選択モデルから得た計算結果をもとに確率的利用者均衡配分モデルによってリンクコストを考慮した歩行者配分を実施した。リンクコストの設定については、BPR 関数を導入することによって、歩行者の経路選択行動を記述し、歩行の行動を再現する。

(2) 効用関数の構築

本研究では、Multinomial Logit (MNL) モデルをベースとして採用し、各経路の特性を表現する変数をとって、経路の総移動時間、上り階段段数、エレベータ (EV) やエスカレータ (ES) の有無を用いて効用関数を特定した。用いた効用関数を式(1)、Wi-Fi センサによる機械観測誤差を考慮した時間の補正式

を式(2)に示す。

$$v_k = \alpha_1 T_{est} + \alpha_2 N_{up} + \alpha_3 Ev + \alpha_4 Es \quad (1)$$

$$T_{est} = T_{obs} + \sum_{i=1}^{11} m_i \beta_i \sigma_i \quad (2)$$

なお、式(1)では $\alpha_{(n:1\sim4)}$ を推定するパラメータ、 T_{est} を総移動時間、 N_{up} を上り階段段数、 Ev をエレベータ設置ダミー、 Es をエスカレータ設置ダミーとして設定した。このうち、 T_{est} については観測誤差を考慮するために、式(2)でさらに詳しく定義している。 $\beta_{(n:1\sim11)}$ は機械ごとに誤差の大小を表すパラメータとし、 T_{obs} を Wi-Fi 観測による観測移動時間、 m_n を観測機械ダミー、 $\sigma_{(n:1\sim11)}$ を誤差分散として与えた。観測機械ダミーは歩行者が移動する際に、Wi-Fi によって観測されている出発または到着地点を 1、それ以外の場合は 0 とする。 $\sigma_{(n:1\sim11)}$ は誤差分散とし、平均 0、標準偏差 1 の正規分布を仮定した。

式(1)に含まれる T_{est} は、式(2)によって詳しく説明される、入れ子型のモデルになっている。これは個人の経路選択について、外生的な要因として観測機器ごとの観測誤差を定義することにより、移動所要時間を補正しつつ、各経路の選択確率を算出するためである。 T_{est} を観測移動時間項 (T_{obs}) と観測誤差項 (T_{obs} 以外) に分解し、誤差分散をあらかじめ与えることで機械誤差の大小も推定する枠組みとした。機械誤差の大小は $\sigma_{(n:1\sim11)}$ に掛け合わされる $\beta_{(n:1\sim11)}$ によって表現でき、絶対値が大きい程誤差分散が大きいことを表す。

MNL モデルでは、一般的に最尤推定法によってパラメータの推定が可能だが、本研究のように入れ子型をとるパラメータの同時推定は不可能である。そのため、パラメータの推定には擬似最尤推定法の一つである、Nested Pseudo Maximum Likelihood⁵⁾ (NPL) を用いることでパラメータ $\alpha_{(n:1\sim4)}$ と $\beta_{(n:1\sim11)}$ の同時推定を可能とした。

表-1 パラメータ推定結果の比較

説明変数	MLE			NPL		
	パラメータ	t 値		パラメータ	t 値	
総時間(100秒)	-1.602	-4.13	***	-4.72	-3.49	***
登り階段段数(10段)	-0.231	-8.02	***	-0.165	-5.14	***
EVダミー	0.386	1.16		-0.438	-2.01	**
ESダミー	1.012	4.63	***	1.054	5.94	***
サンプル数	399			399		
初期尤度	-463.4			-404.7		
最終尤度	-324.5			-254.7		
尤度比	0.300			0.370		
修正済み尤度比	0.291			0.360		

** 5%有意 *** 1%有意

(3) パラメータの推定結果

NPL によるパラメータ $\alpha_{(n:1\sim4)}$ の推定結果を表-1 に示す。なお、比較として、機械誤差を考慮せずに $T_{est} = T_{obs}$ と定義し、MNL モデルのパラメータ $\alpha_{(n:1\sim4)}$ のみを最尤推定法 (MLE) によって推定したモデルも示す。尤度比が大幅に向上し、モデルフィットは極めて良好である。また、説明変数の t 値は全ての項目で 5% 有意であり、モデルの説明力も向上した。エレベータダミーについては正負が異なるが、経路上にエレベータがあっても使用しないケースが多く、モデルの信頼性に関して問題はないとした。さらに、MNL モデルに比較して総時間に関するパラメータの絶対値が大きくなっており、移動時間に対する感度が高まったといえる。一方で、上り階段に対する感度はやや低下している。

また、機械誤差パラメータ $\beta_{(n:1\sim11)}$ の推定結果を表-2 に示す。パラメータの値は誤差分散の大小を示している。なお、パラメータは絶対値で表記した。歩行デッキ上と地上で観測を行なった地点①や地点③、地点⑦では推定されたパラメータ値が大きく、観測誤差が大きかったことが想定される。これは、デッキ上や地上の観測地点では障害物が少なく、Wi-Fi センサの観測範囲が広がったためであると考えられる。一方で、地下の観測地点では観測範囲が比較的小さいことがわかった。さらに、地上で観測を行なった場合でも、アタッシュケースを用いた場合、観測範囲が狭まり誤差範囲の縮小に大きく寄与することも読み取れる。

以上のことから、外生的な要因を各観測機器の過大な機械誤差と定義することによって、個人の移動所要時間を補正しモデル全体の精度向上につながるという仮定が立証できた。

表-2 観測誤差に関するパラメータ推定結果

地点	パラメータ	観測場所	備考
地点①	8.56	デッキ上	
地点②	ODなし	デッキ上	
地点③	9.77	デッキ上	
地点④	欠損	デッキ上	
地点⑤	0.96	地上	アタッシュケースを使用
地点⑥	0.31	地上	アタッシュケースを使用
地点⑦	9.14	地上	
地点⑧	0.01	地下	
地点⑨	0.85	地下	
地点⑩	1.97	地下	
地点⑪	2.25	地下	

(4) 確率的利用者均衡配分 (SUE) モデル

上記の経路選択モデルは、交通量の変化による混雑とそれによる経路変更が記述できない。そこで、混雑を内在化した利用者均衡配分に歩行者経路選択モデルを組み込んだ SUE モデルによって交通量を算出した。具体的には、リンク所要時間を交通サービスの供給 (設計) 条件を表すリンクコスト関数によって変化させ、確率的配分との均衡状態における所要時間と交通量を算出する。

リンクコスト関数は式(3)に示す BPR 関数を用いた。

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right\} \quad (3)$$

BPR 関数⁶⁾とは、米国道路局 (US Bureau of Public Road) が 1964 年に示したリンクコスト関数の一つである。均衡配分で用いる実用的なリンクコスト関数として幅広く利用されている。 $t_a(x_a)$ はリンク旅行時間、 t_{a0} は自由走行時のリンク旅行時間、 x_a はリンク交通量、 C_a はリンク可能交通容量、 α 、 β はパラメータである。米国道路局では、 $\alpha = 0.15$ 、 $\beta = 4$ を用いている。本研究では、歩行者の旅行時間推計のためにこの BPR 関数を適用する。しかし、歩行者に適用できる BPR 関数を推計することが現段階ではできないため、現実的な参考値として $\alpha = 0.1$ 、 $\beta = 2$ として設定した。

また、リンク可能交通容量は国総研プロジェクト研究報告第7号⁷⁾を参考に算出をした。具体的には、対象となる歩道において自由走行可能なサービスレベルを歩行者密度(k)の値で 0.3 (人/m²) と設定し、既往研究⁸⁾⁹⁾のもと、この歩行者密度を用いて単位時間あたりに処理できるリンク交通容量 (リンク可能交通容量と同義) を算出する。

$$v = 1.13 - 0.28k \quad (4)$$

$$q = 60kv \quad (5)$$

$$C_a = qB \quad (6)$$

v はリンク移動速度 (m/s) , q は単位幅員あたりのリンク可能交通容量 (人/分・m) , B はリンク幅員 (m) である. 本研究では, 幅員が必ずしも一定とは限らないため, 幅員として最小幅員を適用するものとした.

また, 経路ごとの総移動時間を推定された観測誤差に関するパラメータを用いて補正した. その後, シナリオごとに OD 人数の設定を行った. BPR 関数を用いた確率的利用者均衡配分モデルを逐次近似法によって実行し, 収束したところで経路配分を終了とした.

5. 渋谷駅東口地域の歩行空間評価への適用

渋谷駅東口地域は今後も付近の再開発が進み歩行者流動が活発になることが予測されている. そのた

め, この再開発の影響を考慮した歩行者需要のシナリオを作成し, 歩行者流動分析を行う. 各 OD 間に現時点と近似する歩行者数を設定した上で, 新たに開発されるストリーム側に接続する交通量を現状の約 1000 (人/時) から 5 倍まで感度分析的に変化させた. 例えば, 渋谷駅側からストリーム側の OD 交通量は 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 (人/時) の範囲で変化させ, 歩行空間評価を行なった. 評価方法として, 非混雑時と混雑時の移動所要時間の比を表現する, 遅れ比率を用いた. その結果, 混雑の最も酷い渋谷駅側の階段では, OD 人数 3000 人/時を超えると, 国土交通省が定めるサービス水準である遅れ比率 10%を超えてしまうことが確認された. OD 人数 5000 人/時になると, 遅れ比率が 20%にまで達している.

ここまで, 歩行空間評価をおこなってきたが, 快適な移動空間を提供するためには, この結果に対する対策を講じる必要がある. そのため, 現実的な対策として, 通路幅の拡幅を提案する. 図-6 は, OD 人数が 4000 (人/時) での通路幅と遅れ比率の関係を示している. この場合, サービス水準である遅れ比率

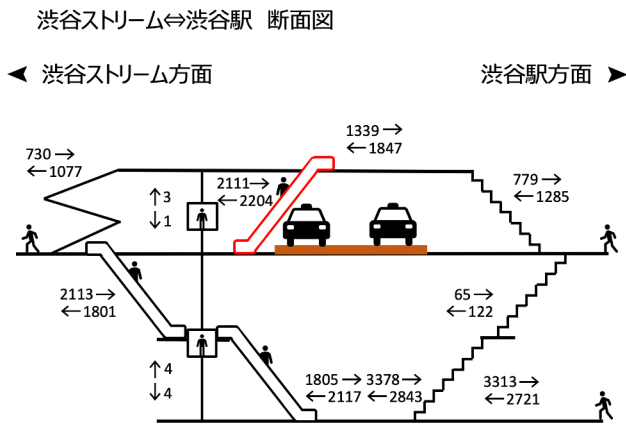


図-3 歩行者フローの例 (3000 人/h)

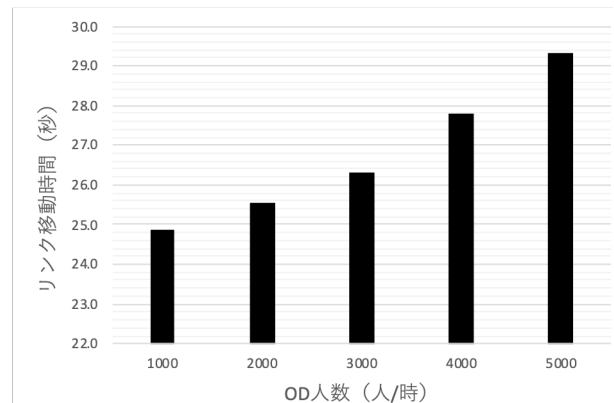


図-4 リンク所要時間と OD 人数の関係

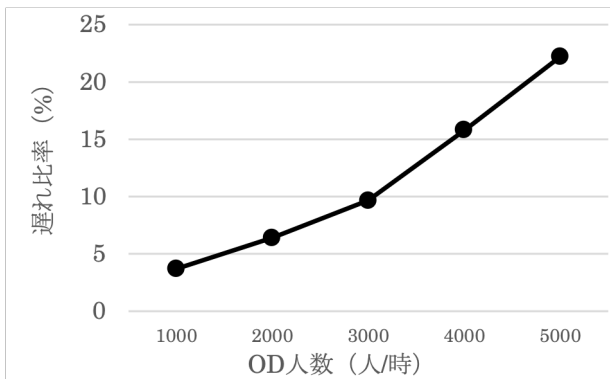


図-5 遅れ比率と OD 人数の関係

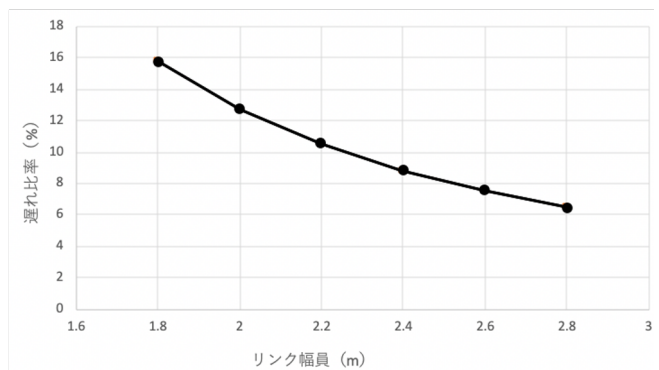


図-6 幅員の増加と遅れ比率の改善

10%を満たすためには、現状の幅員 1.8m から最低でも 2.4m 程度まで拡幅する必要がある。すなわち、十分なサービスを提供するためには現状の 3/2 程度の拡幅が必要である。

同じように、混雑が激しさを増すと考えられる。ストリーム側のエスカレータについては、拡幅は現実的ではないため、新たな動線の確保や付近に階段を設置するといった解決策が求められる。

6. おわりに

(1) 本研究の成果

本研究では、Wi-Fi センサによりデータを取得し、観測誤差を考慮した経路選択モデルを NPL によって推定した。さらに、SUE による歩行空間ネットワーク解析手法を構築し、歩行空間の定量的評価を行った。これにより、将来の混雑しやすい場所がわかり、対策を講じることが可能となる。また、混雑緩和のためには、幅員の拡大は有効な手段であり、十分な混雑解消につながる事が判明した。国土交通省が主体となって進めている渋谷駅東口デッキの拡張や、地下空間の拡幅は効果があるものといえる。本研究が、今後の歩行空間整備に資することが期待される。

(2) 今後の課題

本研究では、Wi-Fi センサによりデータを取得し、モデルの構築を行ったが、実際にはセンサ付近を通過しても観測されない可能性がある。今後は Oijen, Daamen, Hoogendoorn³⁾のように、観測時の欠損率も加味したモデルの構築が求められている。

また、現在は将来の利用者数の予測を感度分析的に考えている点が挙げられ、感度分析による OD の設定は信頼性に欠けるところがある。今回の観測ではデータが欠損している箇所が見られたことや、観測による OD の偏りが大きかったことが挙げられる。そのため、正確に OD の設定をするためには、定点カメラによる画像認識技術等の併用も必要になると考えられる。

参考文献

- 1) Bierlaire, M., & Frejinger, E. (2008). : Route choice modeling with network-free data, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(2), 187-198.
- 2) 大山雄己, 羽藤英二: 観測誤差分散のリンク固有性に着目した経路選択モデルの構造推定, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.73, No.5 (土木計画学研究・論文集第 34 巻), I_597-I_608, 2017.
- 3) Tim P. van Oijen, Winnie Daamen, Serge P. Hoogendoorn : Estimation of a recursive link-based logit model and link flows in a sensor equipped network, *Transportation Research Part B* 140 (2020) 262–281
- 4) 東急電鉄: SHIBUYA の未来はこう変わる!?渋谷再開発情報サイト, 渋谷駅周辺の開発 <http://www.tokyu.co.jp/shibuya-redevelopment/shibuya/index.html> (2019 年 12 月 5 日最終閲覧)
- 5) Aguirregabiria, V.: Estimation of Dynamic Discrete Games Using the Nested Pseudo Likelihood Algorithm: Code and Application, Unpublished, 2009.
- 6) Bureau of Public Roads : Traffic assignment manual, Urban Planning Division, US Department of Commerce, Washington DC, 1964.
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 道路空間の安全性・快適性向上に関する研究, 国総研プロジェクト研究報告 第 7 号, 第 3 章 道路空間の快適性向上に関する研究, 2006.
- 8) 吉岡昭雄: 歩行者交通と歩行空間 (II) 一歩行速度・密度・交通量について-, 交通工学, Vol.13, No.5, pp.41-53, 1978.
- 9) Fruin, J. J. : 歩行者の空間—理想とデザイナー-, 鹿島出版会, 1974. ETC の利用状況, 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/road/yuryo/etc/riyou/index.html>

(Received October 1, 2020)
(?)

CONSTRUCTION OF PEDESTRIAN FLOW ANALYSIS METHOD CONSIDERING WI-FI OBSERVATION ERROR

Aoba KAWADA, Hideki YAGINUMA, Shintaro TERABE and Kosuke TANAKA

In recent years, redevelopment projects have been actively conducted in urban areas of Japan. However, the increase in the number of pedestrians is not considered, which is a major cause of congestion. We construct a route selection model in Shibuya, redevelopment area in Japan, based on observations using Wi-Fi sensors, taking into account errors during observations. Considering the observation error, we used a parameter estimation method called pseudo maximum likelihood estimation. Finally, after performing the user equilibrium distribution, it is possible to quantitatively evaluate the pedestrian space, which can be useful for grasping congested points and improving pedestrian space in the future.