

Wi-Fi パケットセンサと観測交通量データを用いた OD 逆推計手法の適用

中村 俊之¹・北村 清州²・桑原 昌広³・絹田 裕一⁴・
茂木 渉⁵・大野 沙知子⁶・西田 純二⁷

- ¹ 正会員 名古屋大学特任准教授 未来社会創造機構 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町 1)
E-mail:tnakamura@mirai.nagoya-u.jp
- ² 正会員 一般財団法人計量計画研究所 (〒162-0845 東京都新宿区市谷本村町 2-9)
E-mail: skitamura@ibs.or.jp
- ³ 正会員 トヨタ自動車株式会社 (〒100-0004 東京都千代田区大手町 1-6-1)
E-mail:masahiro_kuwahara_aa@mail.toyota.co.jp
- ⁴ 正会員 一般財団法人計量計画研究所 (〒162-0845 東京都新宿区市谷本村町 2-9)
E-mail: ykinuta@ibs.or.jp
- ⁵ 正会員 一般財団法人計量計画研究所 (〒162-0845 東京都新宿区市谷本村町 2-9)
E-mail: w Mogi@ibs.or.jp
- ⁶ 正会員 名古屋大学特任助教 未来社会創造機構 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町 1)
E-mail:sachi_ono@coi.nagoya-u.ac.jp
- ⁷ 正会員 株式会社社会システム総合研究所 (〒550-0002 大阪市西区江戸堀 1-22-4-503)
E-mail:nishida@jriss.jp

近年 ICT による流動把握の手法として Wi-Fi パケットセンサの活用が進められている。多くの人がスマホを所持しており、その機器が発信するプローブクエストを捕捉することで流動把握する Wi-Fi パケットセンサはリアルタイム観測が可能一方で、プローブクエストの発信タイミングにより捕捉できない、また発信される MAC アドレスのランダム化の影響で抽出サンプルによる断片的な流動の結果であるという問題を抱えている。そうした中、断面の観測交通量データを用いることで交通工学分野において開発されてきた OD 逆推計手法の適用が可能であり、一定の精度の流動把握の可能性が期待される。本論文では、日常的に人流が発生している大規模施設を対象として手法適用を行うことで、実際の都市への適用可能性を示唆するものである。

Key Words: *Origin-Destination Flow, Wi-Fi Packet sensor*

1. はじめに

近年の ICT 技術の進展に伴い、GPS や交通系 IC カード、携帯電話の基地局情報、Wi-Fi やブルートゥースを活用したビーコン等、人の移動履歴を捕捉できるツールが各種登場している。特に昨年来大きな社会的影響を及ぼしているコロナ禍においては、感染拡大防止の観点からも人流把握の重要性が格段に高まっており、上記に示した人流把握ツールは、従来のまちづくりや都市交通計画等での活用に留まらず、防疫の観点からのモニタリングやアラート発信等、活用場面の拡大が見込まれる。

都市交通計画分野で活用されている代表的な OD デー

タとして、PT 調査データや道路交通センサスの自動車 OD 調査データが挙げられるが、これらは数年に一度の大規模な調査で取得されるデータであり、更新頻度が数年間隔であることや、データの解像度が数 km のゾーン単位と粗いことから、大規模なインフラ整備等計画等への活用は有効であるものの、局所的な高解像度の分析やリアルタイムのモニタリングには不向きである。また、近年は携帯電話の GPS や基地局情報に基づく OD データの活用も進められており、高解像度でリアルタイム性の高い有用なデータであるものの、継続的な活用には相応のコストを要するため、定常的なモニタリング用途には

コスト面での制約が生じる。これに対し、Wi-Fi パケットセンサは、センサを設置するだけで継続的にデータを取得できることから、安価で容易な調査手法であると言える。一方で、センサのカバー範囲や捕捉率（サンプル抽出率）、取得される OD や経路のパターン等、取得したデータの一般性については不透明な部分が多く、社会実装に向けて様々な視点からの技術検証が期待されている。

本稿は、交通工学分野において開発されてきた OD 逆推計の技術を適用することで、断面交通量の観測値を用いた Wi-Fi パケットセンサデータの補正技術の確立を目的とし、まずは、一般的なまちなかのような多様な交通手段が入り込まない大規模工場を対象として、方法論の有効性を検証するものである。OD 逆推計の技術を用いることで、観測断面の交通量と整合させた、信頼性の高い OD 推計をリアルタイムかつ安価に実施できるようになると考えられ、まちづくり等の各種検討に資する OD データを取得するための有効なツールとして活用できる可能性がある。

2. 対象地域と分析データの概要

(1) 対象地域の概要

トヨタ自動車九州株式会社の宮田工場（従業員数：約 6,000 人 用地面積：約 113ha）を対象とし、Wi-Fi パケットセンサデータの取得、断面交通量の観測調査を実施した。宮田工場内の一部（工場施設の 1/3 程度）を分析対象地域として、工場施設内に設置した Wi-Fi パケットセンサで把握した流動量と、工場施設間の歩行経路上に設定した断面での観測歩行者交通量との関係性を分析する。

図-1 は、工場内の施設と通路を模式化した図である。a-e は工場内の施設をエリア分けしたものであり、灰色で示された歩行者通路上で、エリア間の移動を捕捉するための交通量観測断面を設定し、交通量を取得した。

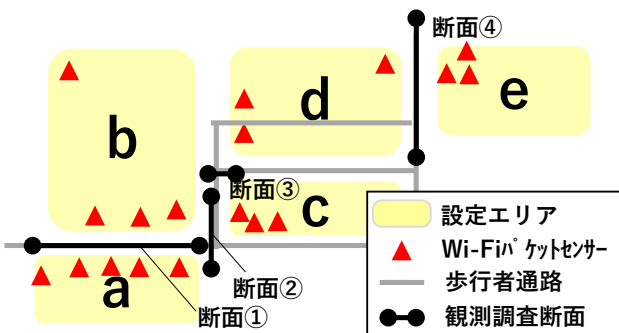


図-1 宮田工場内に設定した分析対象地域の模式図

(2) 分析データの概要 a) 観測交通量データ

2021 年 3 月 8 日（月）に、図-1 に示した 4 つの観測調査断面において、交通量調査を実施した。断面別時間帯別の歩行者交通量（方向計）を図-2 に示す。宮田工場は、2 交代制で 24 時間稼働していることから、工場職員の交代時間において、工場のゲート部付近の断面での交通量が増加する傾向にある。

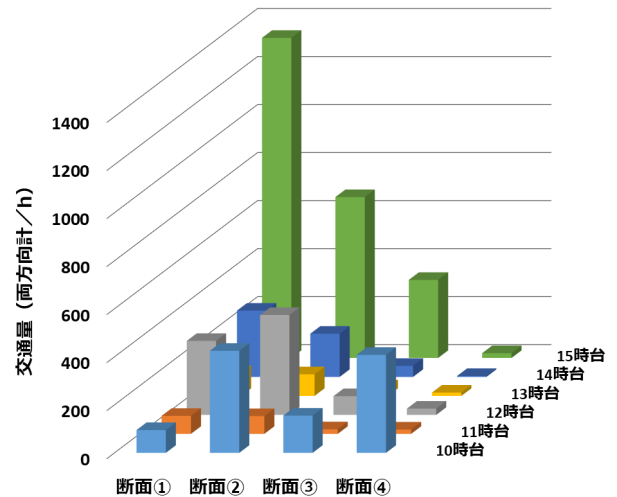


図-2 時間帯別断面別歩行者交通量（方向計）

b) Wi-Fi パケットセンサデータ

図-1 に示した分析対象地域において、各々の設定エリア間の流動を把握するため、各エリア内の建屋の出入口付近に設置した 18 箇所の Wi-Fi パケットセンサを用いて、Wi-Fi をオンにした状態のスマートフォン等の通信機器を保有している職員の移動パターンを捕捉した。

Wi-Fi パケットセンサは、スマートフォン等の通信機器が定期的に発信するプローブリクエストを捕捉する機器である。スマートフォンがプローブリクエストを発信するタイミングで、電波が届く範囲内に Wi-Fi パケットセンサが設置されていた場合に、スマートフォン等の通信機器の MAC アドレスを匿名加工済みの ID として記録（センサ内で MAC アドレスを匿名加工した ID に変換）する仕組みであることから、周辺にセンサが存在しないことでの未捕捉や、1 回のプローブリクエストを複数のセンサで同時に捕捉する等の現象が生じる。このため、捕捉データの OD を集計する前に、一定のデータクレンジングを行い、不要なデータを削除する。本稿において実施したクレンジング処理を表-1 に示す。

第一に人の流動を把握する上で、同一 ID の記録数が 1 レコードしかないものを除外する。第二に多くの移動が記録され過ぎることにより流動量を過大に評価し過ぎる要因を除去する。本稿の対象エリアにおいては、近い距離に複数のセンサを設置していることから、複数のセンサで同時受信をするケースが存在し、②捕捉回数

の多すぎるデータ（上位約 0.7%を除外）や③複数捕捉されているものの同時捕捉されただけのデータを除去した。

表-1 データクレンジングによるデータ量の変化

クレンジングの考え方	処理方法	ユニーク ID	レコード数
全レコード		327,551	615,661
ランダム化データ等の除外	1レコードしか捕捉できていない ID を除外	115,719	403,829
複数箇所での同時取得等、過大要因となるデータの除外	50レコード以上捕捉されているデータを除外	114,864	260,590
	1日の最初と最後の捕捉が同時刻であるデータ	47,273	118,104

クレンジング後のデータを対象に、各 ID ごとにセンサでの捕捉順を整理した。このとき、a-e の設定エリア内のセンサ間の移動は内々トリップとし、異なるエリアのセンサへの移動を内外・外内トリップと判定した。また、分析対象地域内の設定エリアの移動は、横断歩道を渡る必要があり、一定程度の所要時間が必要となるが、Wi-Fi パケットセンサでの流動には、ほとんど所要時間がかかっておらず、道路を挟んだ反対側の設定エリアのセンサにて捕捉されたと考えられるレコードが少なからず存在していることが確認された。これを踏まえ、異なる設定エリアに移動し、かつ、所要時間が 5 秒以上のものを内外・外内トリップとみなすこととした。

Wi-Fi パケットセンサで観測した a-e のエリア間の 10 時台~15 時台の 6 時間計の OD 表を表-2 に示す。

表-2 Wi-Fi パケットセンサの OD 表 (6 時間計)

		着エリア					計
		a	b	c	d	e	
発 エ リ ア	a	0	185	75	7	1	268
	b	136	0	70	58	7	271
	c	68	48	0	17	7	140
	d	10	52	15	0	21	98
	e	6	7	12	22	0	47
	計	220	292	172	104	36	824

表-2 に示した OD 表から図-1 に示した観測調査断面の歩行者交通量を試算し、観測値との比較を行った結果が図-3 である。Wi-Fi パケットセンサで捕捉した OD は、断面交通量ベースで 23%程度であることが確認された。また、各断面間の流動量のバランスは、観測値と比較して

高い精度を持つことも確認できた。

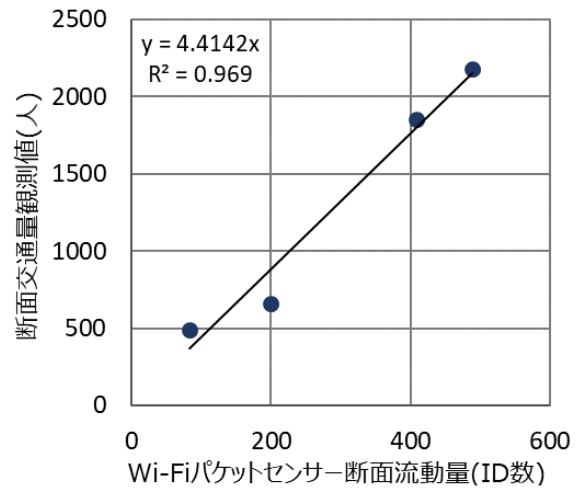


図-3 Wi-Fi パケットセンサの断面流動量と観測交通量の関係

3. 本検討で用いた OD 逆推計手法

Wi-Fi パケットセンサによる人流データと断面の観測交通量データを用いて、全体の人流を推計する手法として、OD 逆推計手法を適用する。OD 逆推計には利用可能なデータに応じていくつかの手法が存在するが、ここでは、Wi-Fi パケットセンサによって把握される人流データを OD パターン（先験 OD 表）及び経路利用率として活用し、観測交通量データに整合するように OD 表を逆推計する方法を適用する。

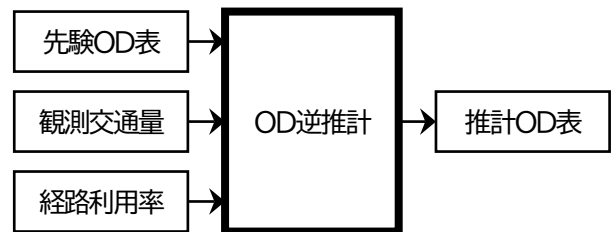


図-4 OD 逆推計の入出力

(1) OD 逆推計手法

既存の OD パターン（先験 OD 表）を活用してネットワーク上の観測交通量に整合するように OD 表を逆推計する代表的な方法には、残差平方和最小化モデルとエントロピー最大化モデルがある¹⁾。残差平方和最小化モデルは、一般には 2 次計画問題に定式化され解きやすい一方で、無制約では負値の OD 交通量が計算されることもあり、非負制約などの制約条件をかける必要がある。エントロピー最大化モデルは、非線形計画問題として定式化されるため解析の難易度が高いが、非負制約をかけなくても自然に正の OD 交通量が得られる利点があり、本

稿では、エントロピー最大化モデルを活用する。

エントロピー最大化モデルは、推計リンク交通量が観測交通量（観測リンク交通量）に一致するという制約条件の下でエントロピー最大化により OD 表を逆推計する、というのが基本的な考え方である。これをベースに、観測交通量には誤差があることを考慮して残差を許容したモデル（ここでは“拡張型モデル”と呼ぶ）も提案されている²⁾。Willumsen²⁾のモデルは、先験総交通量（先験 OD 表の総量）と推計総交通量（推計 OD 表の総量）が一定であるという前提で定式化されているが、推計総交通量も未知変数として扱った改良モデルも提案されている³⁾⁴⁾。改良モデルは、総交通量も推計することにより、観測リンクを通過しない OD ペアについても OD 交通量を推計可能であることも利点である。

本稿では、全数調査ではない Wi-Fi パケットセンサによる OD パターンを先験 OD 表として用いることから、総交通量の推計を行う必要がある。また、観測交通量には一定の誤差を含むことから、残差を考慮することが望ましい。これらの前提条件を踏まえ、茂木⁵⁾で提案されている“拡張型改良 Willumsen モデル”を適用することとする。

(2) 観測交通量の誤差を考慮したエントロピー最大化モデル（拡張型改良 Willumsen モデル）

“拡張型改良 Willumsen モデル”は、推計総交通量を未知変数として、推計リンク交通量を観測交通量（観測リンク交通量）になるべく近づけるというアプローチのモデルであり、以下の非線形計画問題として定式化される²⁾⁵⁾⁶⁾。

$$\max \left\{ \frac{q!}{\prod_{rs \in \Omega} q_{rs}!} \prod_{rs \in \Omega} \left(\frac{\hat{q}_{rs}}{\hat{q}} \right)^{q_{rs}} \right\} \left\{ \frac{x!}{\prod_{a \in A} x_a!} \prod_{a \in A} \left(\frac{\hat{x}_a}{\hat{x}} \right)^{x_a} \right\}^{\gamma} \quad (1)$$

$$s. t. \quad x_a = \sum_{rs \in \Omega} q_{rs} p_{rs,a} \quad \forall a \in A \quad (2)$$

$$q = \sum_{rs \in \Omega} q_{rs} \quad (3)$$

ここに、

- \hat{q}_{rs} : OD ペア rs の先験 OD 交通量
- \hat{q} : 先験 OD 交通量の全 OD ペアの合計
(先験総交通量)
- q_{rs} : OD ペア rs の推定 OD 交通量
- q : 推定 OD 交通量の全 OD ペアの合計
(推定総交通量)
- \hat{x}_a : リンク a の観測リンク交通量
- \hat{x} : 観測リンク交通量の全リンクの合計
- x_a : リンク a の推定リンク交通量
- x : 集合推定リンク交通量の全リンクの合計
- $p_{rs,a}$: OD ペア rs のトリップが、リンク a を通過する

確率（リンク利用率）

- Ω : OD ペア集合
- A : リンク集合
- γ : パラメータ

この関数におけるパラメータ γ は、OD 表推計に反映させる先験 OD 交通量情報と観測リンク交通量情報の重みを調節するためのパラメータであり、 γ が大きいほど観測交通量の情報が多く反映され、 $\gamma \rightarrow \infty$ ならば観測リンク交通量と完全に整合するような OD 表を求める問題になる。また、 γ が小さいほど観測リンク交通量の情報は反映されず、先験 OD 交通量の情報がより強く反映され、得られる推計 OD 表は先験 OD 交通量に近いものになる²⁾。

この問題を、ラングランジュ未定乗数法を用いて解くことを考えると、解くべき問題は以下の非線形連立方程式となる（式展開の詳細は、茂木⁵⁾を参照）。

$$1 = \sum_{rs \in \Omega} \left\{ \left(\frac{\hat{q}_{rs}}{\hat{q}} \right) \prod_{a \in A} \Lambda_a^{p_{rs,a}} \right\} \quad (4)$$

$$\hat{x}_a \Lambda_a^{-\frac{1}{\gamma}} = q \sum_{rs \in \Omega} \left\{ p_{rs,a} \left(\frac{\hat{q}_{rs}}{\hat{q}} \right) \prod_{a' \in A} \Lambda_{a'}^{p_{rs,a'}} \right\} \quad \forall a \in A \quad (5)$$

以上により、観測地点数+1 の未知変数を持つ非線形連立方程式を解き、求めた q, Λ_a (Λ_a はラグランジュ乗数 λ_a を $\Lambda_a = \exp(-\lambda_a)$ にて変数変換したもの) を(6)式に代入することで推計 OD 交通量 q_{rs} を、(7)式に代入することで推計リンク交通量 x_a をそれぞれ得ることができる。

$$q_{rs} = q \left(\frac{\hat{q}_{rs}}{\hat{q}} \right) \prod_{a \in A} \Lambda_a^{p_{rs,a}} \quad \forall rs \in \Omega \quad (6)$$

$$x_a = \hat{x}_a \Lambda_a^{-\frac{1}{\gamma}} \quad \forall a \in A \quad (7)$$

4. Wi-Fi パケットセンサと観測交通量データを用いた OD の推計

(1) 先験 OD 交通量

OD 逆推計のための先験 OD 交通量として、第 2 章のデータ概要の表-2 に示した、Wi-Fi パケットセンサより取得された、5 エリア間の 6 時間合計の OD 交通量を用いた。

(2) 観測交通量

OD 逆推計のための観測交通量として、第 2 章のデータ概要の図-2 に示した、4 断面別の観測交通量を用いた。先験 OD 表と条件を一致させるため、今回は 6 時間合計の交通量を採用した（図-4）。

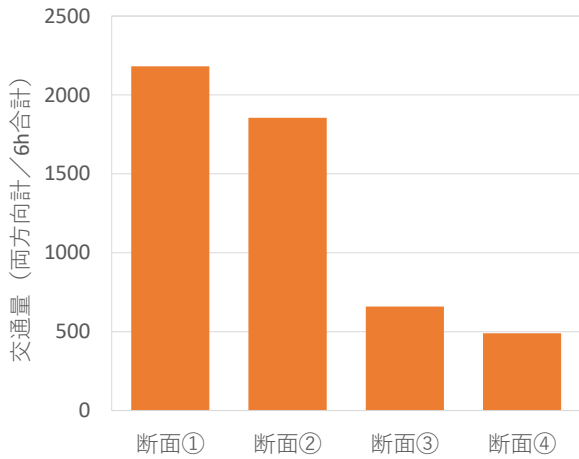


図4 観測交通量 (6h 合計)

(3) OD ペア毎の通過断面設定 (リンク利用率設定)

OD 逆推計のためのリンク利用率の設定にあたり、本稿の推計では、対象としたエリア間の歩行者動線が工場内の歩行者通路に限定されることから、OD のペア毎に通過断面を設定し、リンク利用率を 100%に設定した (表-3)。複数の移動経路を持つエリア間の OD 表を推計するためには、観測リンクの利用率を設定する必要があるが、本稿で対象とした工場のように、対象とする OD の動線が限定される施設等を対象とする場合は、OD 間を移動する際に必ず通過する断面上で交通量を観測することで、当該リンクの利用率を調査する必要がなくなり、簡便にリンク利用率を設定できる利点がある。

表-3 OD ペア毎の通過断面設定 (リンク利用率の設定)

発エリア	着エリア	通過断面 (発エリア→着エリアのODが当該断面を通過する=1、通過しない=0) ※動線が限定する工場を対象としているため、断面上のリンク利用率を100%として設定			
		断面①	断面②	断面③	断面④
a	a	0	0	0	0
a	b	1	0	0	0
a	c	1	1	0	0
a	d	1	1	1	0
a	e	1	1	1	1
b	a	1	0	0	0
b	b	0	0	0	0
b	c	0	1	0	0
b	d	0	1	1	0
b	e	0	1	1	1
c	a	1	1	0	0
c	b	0	1	0	0
c	c	0	0	0	0
c	d	0	0	1	0
c	e	0	0	1	1
d	a	1	1	1	0
d	b	0	1	1	0
d	c	0	0	1	0
d	d	0	0	0	0
d	e	0	0	0	1
e	a	1	1	1	1
e	b	0	1	1	1
e	c	0	0	1	1
e	d	0	0	0	1
e	e	0	0	0	0

(4) OD 交通量の推計結果

(1)~(3)の設定に従い、第 3 章に示した OD 逆推計手法を用いて、工場内 5 エリア間の OD 推計を実施した。推計された OD 表を表-4 に、交通量観測断面上の OD 交通量の補正結果を図-6 に、Wi-Fi OD 交通量と推計 OD 交通量の比較結果を図-5 に示す。

表-4 推計 OD 表 (6h 合計)

		着エリア					計
		a	b	c	d	e	
発エリア	a	0	801	372	22	5	1,201
	b	589	0	358	190	34	1,172
	c	338	246	0	49	30	662
	d	32	170	43	0	140	385
	e	29	34	51	147	0	261
	計	987	1,252	825	408	209	3,681

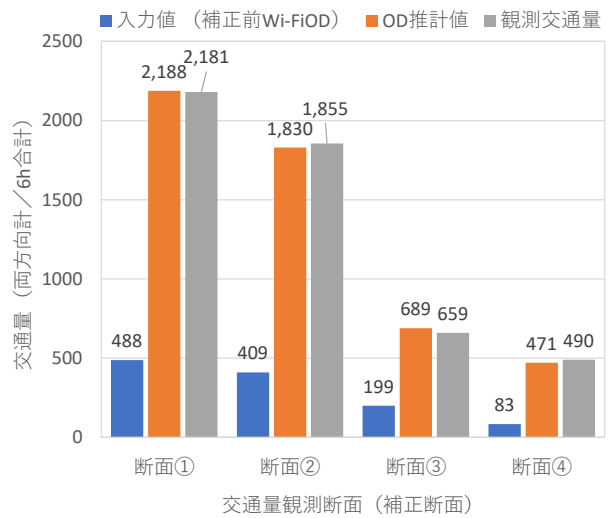


図-5 交通量観測断面上の通過 OD 交通量の補正結果

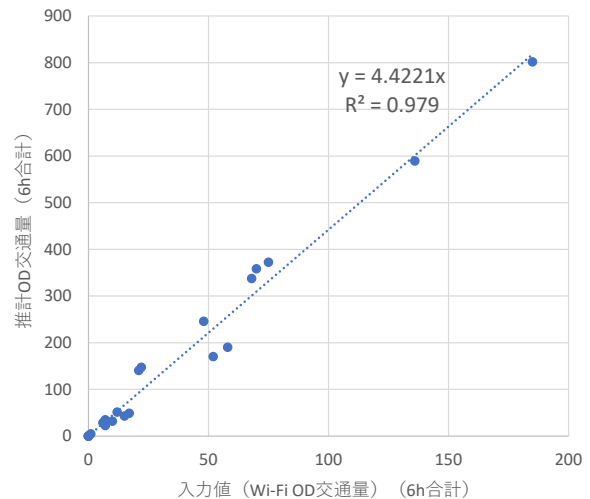


図-6 Wi-Fi OD 交通量と推計 OD 交通量の比較

観測断面上の OD 交通量は、交通量調査の結果と一致するように補正されている。Wi-Fi OD 交通量と推計 OD 交通量の相関係数は 0.979 と高く、Wi-Fi パケットセンサから取得された OD の分布パターンを概ね維持したまま、観測断面上の交通量が調査結果と一致するように OD 表全体が補正されたことが確認できる。このことより、Wi-Fi パケットセンサと特定断面の観測交通量を用いることで、本稿の目的である簡便かつ信頼性の高い OD 推計が可能であることが示された。推計された OD 表 (表 4) を確認すると、一般的な OD 表では、対となる OD ペア (例: $a \rightarrow b$, $b \rightarrow a$) の交通量は対象となる性質を示すが、今回の結果はやや異なる傾向を示していることが分かる。調査時間帯が日中の 6 時間であり 1 日ではないため、必ずしも対の OD ペアで交通量が類似している必要があるわけではないものの、Wi-Fi パケットセンサの特性やデータクレンジングの手法が影響している可能性も考えられる。本稿には掲載できていないが、取得データでは、時間解像度を一時間等に設定したより詳細な解像度での OD 推計なども可能である。時間帯別の移動パターンの違いを反映した詳細な OD モニタリングの可能性や、先験 OD 表として用いた Wi-Fi パケットセンサデータのクレンジング手法の妥当性等について、引き続き検証を進めたい。

5. まとめ

本稿では、Wi-Fi パケットセンサを用い、安価に一定の精度で OD を把握するため、OD 逆推計の技術を適用し、断面交通量の観測値を用いた Wi-Fi パケットセンサデータの補正を行い OD 表を作成する手法を提案した。提案した手法をトヨタ自動車九州株式会社の宮田工場において取得した交通量調査データ及び Wi-Fi パケットセンサデータを用いて適用した。

推計された OD 交通量は、断面交通量の調査結果と一致するように補正された。特定断面の観測交通量を用いて OD 逆推計を適用することにより、センサの未捕捉や複数機器の同時捕捉等で実際の流動量への換算が困難であった Wi-Fi パケットセンサ単体での流動観測の課題を

解消し、簡便に観測交通量との整合性が確保された信頼性の高い OD 推計が可能であることを示した。また、本稿で対象とした工場のように、移動動線が特定しやすいエリアを対象とする場合には、推計したい OD が必ず通過する断面上のリンク交通量を観測することで、OD 逆推計を行う際に必要なリンク利用率の取得が不要となる。実務適用に際し、そのデータ取得が負担となるリンク利用率を調査することなく OD 推計が可能であり、多様な交通の混在や複雑な経路選択が生じないエリアであれば、予めセンサ設置個所と交通量観測箇所の工夫することで、本手法が容易に適用可能であることを示した。

断面交通量の観測に関しては、カメラ映像の AI 解析等センシング技術の進展により、安価に常時モニタリングが可能となってきている。Wi-Fi パケットセンサとカメラ等で常時観測される断面交通量を組合せ、本稿で提案した手法を適用することで、安価に継続して OD のモニタリングを行うことが可能であり、都市交通計画分野における OD 取得ツールとしての普及が期待される。

参考文献

- 1) 土木学会 (編) : 交通ネットワークの均衡分析—最新の理論と解法—, 丸善, 1998.
- 2) Willumsen, L. G.: Estimating Time-dependent Trip Matrices from Traffic Counts, Proceedings of the 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp. 397-411, 1984.
- 3) 飯田恭敬, 高山純一, 小林光二: リンク観測交通量を用いたエントロピー最大化による道路網交通需要推計法, 土木計画学研究・講演集, No. 9, pp. 441-448, 1986.
- 4) 高山純一: リンクフロー観測値に基づいた道路網交通需要分析モデルに関する方法論的研究, 京都大学学位論文, 1988.
- 5) 茂木渉: OD 逆推定におけるエントロピー最大化モデルのホモトピー法による解法, 土木計画学研究・論文集, Vol. 76, No. 5, pp. 1_837-846, 2021.
- 6) 小根山裕之, 桑原雅夫: 路側観測交通量からの時間変化する OD 交通量の推定, 交通工学, Vol. 32, No. 2, pp. 5-16, 1997.

(2021. 10. 1 受付)

Study on Estimation Method of Origin-Destination Flow using Wi-Fi Packet Sensor and Observed Traffic Data

Toshiyuki NAKAMURA, Seishu KITAMURA, Masahiro KUWAHARA, Yuichi KINUTA, Wataru MOGI, Sachiko ONO and Junji NISHIDA