

# Bluetooth を用いた地域鉄道 OD 交通量の推計手法に関する研究

兵頭 知<sup>1</sup>・三木田 龍一<sup>2</sup>・西脇 雅人<sup>2</sup>・轟 朝幸<sup>3</sup>・古竹 孝一<sup>4</sup>・菅 芳樹<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 徳島大学准教授 大学院社会産業理工学研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

E-mail: hyodo.satoshi@tokushima-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 日本大学大学院 (〒270-8504 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

<sup>3</sup>正会員 日本大学教授 理工学部交通システム工学科 (〒270-8504 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

<sup>4</sup>非会員 いすみ鉄道株式会社代表取締役社長 (〒298-0216 千葉県夷隅郡大多喜町大多喜 264)

<sup>5</sup>非会員 株式会社 地域未来研究所 (〒530-0003 大阪市北区堂島 1-5-17 堂島グランドビル)

鉄道事業者にとって、最適な運行本数の計画やダイヤの検討など事業サービス改善のため、日々の利用状況を把握することは重要である。OD 交通量調査は、駅構内でのアンケート調査等が一般的な手法であるため、手間や費用がかかること、特定日時に調査が限定されるなど課題がある。そこで、本研究では、スマートフォン等から発信される Bluetooth Low Energy の電波を用いて地域鉄道車両内で計測実験を行い、その計測データから、OD 交通量を把握する手法について検討し、地域鉄道車両内で調査された調査観測値を真値として精度の比較検証を行った。その結果、平日における時間帯別 OD 分布パターンを反映するなど地域鉄道の OD 交通量の調査手法としての一定の有用性が確認できた。

**Key Words:** *Transportation survey, Bluetooth Low Energy, regional railway*

## 1. はじめに

鉄道事業者にとって、最適な運行本数の計画やダイヤの検討など事業サービス改善のために、日々の利用状況を把握することは重要である。

乗車状況を継続的に把握する従来の方法は、車両に設置された応荷重装置による計測や IC カード利用等の出入場データを用いた観測が一般的である。しかしながら、都市部の鉄道事業者と比して、地域鉄道で使用される車両は古いことや自動改札など新たな機器を導入するコストの問題などを鑑みると、地域鉄道では乗車状況計測に対する設備投資の負担が大きく、継続的な状況把握が難しい点に課題がある。また、OD 交通量など詳細な状況調査についても、駅構内でのアンケート調査等が一般的な手法であるが、多くの手間や費用がかかること、特定の日に限定された調査で把握していることが現状である。

しかしながら、地域鉄道の旅客流動についても、季節や平・休日などに応じて時々刻々と変動するため、アンケート調査等による従来手法では、継続的な OD 交通量の状況を容易に把握できていないと考えられる。一方、

乗客が持つスマートフォン等から発信される Bluetooth Low Energy (以下、Bluetooth) の電波から得られる情報を活用した手法については、簡便かつ低廉に長時間に亘ってデータを取得できることが期待される。

そこで、本研究では、スマートフォン等から発信される Bluetooth の電波を用いて、鉄道車両内における利用状況の計測実験を行い、計測データに基づき OD 交通量を把握する手法を検討する。同手法では、スマートフォンにインストールされたアプリケーションを用いた簡便な計測手法であるため、低廉に導入可能である。

## 2. 既往研究

Bluetooth を用いた交通観測の手法については、これまで種々の研究が行われている。

具体的には、自動車を対象にした旅行時間計測や OD 交通量計測など交通調査への活用を念頭に試みを中心にして研究が実施されている。例えば、北澤ら<sup>1)</sup>は一般道路及び高速道路を対象に、観測調査ツールを用いて 2 地

点で計測された Bluetooth の MAC アドレスから区間旅行時間を算定する手法を検討している。Bhaskar et al.<sup>2)</sup>は、複数 Bluetooth デバイスを搭載した車両が移動する場合の移動時間推定におけるバイアスについて検討している。坪田ら<sup>3)</sup>は、愛媛県内の一般道 2 地点の区間速度および断面交通量の推定に用いる検討をしている。山中ら<sup>4)</sup>は、生活道路の通過交通調査と Bluetooth センサーによるカウント数との関係性を調査し、その利用可能性を論じている。Nishiuchi and Nakano<sup>5)</sup>の研究では、信号交差点の方向別交通量推定に影響する要因を分析している。

また、近年では、自動車の交通観測のみならず Bluetooth の電波計測を活用し、歩行者の回遊性の計測<sup>6)</sup>やバス乗客の混雑度計測への活用可能性も検討されている<sup>7)</sup>。しかしながら、地域鉄道利用状況を対象にした Bluetooth データの活用事例は僅かであり、かつ駅間の OD 交通量のような詳細な利用状況について、十分な検証はなされていない。

そこで、本研究では、千葉県地域鉄道事業者であるいすみ鉄道において、車両内計測実験と Bluetooth 使用状況調査を行い、取得された計測データに基づき OD 交通量を把握する手法を検討する。

### 3. 分析概要

#### (1) 分析対象地

本研究の計測実験対象地として、千葉県の地域鉄道のひとつであるいすみ鉄道の路線にて実施した。具体的には、図-1 に示すように、いすみ鉄道の大原駅から上総中野駅までの計 14 駅、26.8 km の路線（上り/下り）を対象とする。

#### (2) 分析対象期間

本研究の計測実験は、表-1 に示すように、千葉県内南部の地域鉄道のひとつであるいすみ鉄道において、2022 年 9 月 13 日と 9 月 19 日の 2 日間実施した。

#### (3) Bluetooth スキャナの計測及び目視計測

計測実験では、図-2 に示すように、Bluetooth スキャナ機器から発信される電波を取得したログデータおよび調査員による目視観測データの 2 つを取得している。

Bluetooth による計測では、(株)地域未来研究所より Bluetooth 計測アプリおよびその端末であるスキャナを貸与し、計測に使用した。同スキャナでは 15 秒を 1 回の計測周期として、その間に計測された同じ MAC アドレスなどの情報が記録される。Bluetooth のログデータでは、各 MAC アドレス、観測頻度 CNT (回/周期)、平均電界強度 RSSI (dBm/周期) が記録される。なお、CNT とは、1 回の周期の間に計測された同じ MAC アドレスの観測頻度である。例えば、CNT=3 であれば、15 秒の間に 3 回計



図-1 計測調査地

表-1 調査概要

項目	内容
調査項目	BLE計測機器による計測 目視観測による乗降者数の記録(発生・集中交通量)
BLE計測・目視観測期間	2022年9月13日(火) ※平日 2022年9月19日(月・祝日) ※休日
区間	いすみ鉄道 いすみ線(千葉県) 上総中野駅⇄大原駅 1往復 53.6km
対象車両	定期運行している全車両(一両編成)のうち、調査員が同乗した車両
機器台数	2台
調査人員	4人



図-2 計測実験の様子

測されたことを意味する。なお、次周期でまた同じ MAC アドレスが計測された場合については、別レコードとして出力される。また、RSSI の値については、その値が大きいほどスキャナと利用者が所持する端末が近傍にあることを示す指標である。観測された RSSI は、計測周期に複数回同じ MAC アドレスが取得された場合、その最大値を利用している。また、目視観測データは、乗り込み調査員が目視により、各駅の乗降人数及び駅間の OD を記録したデータである。

#### (4) Bluetooth 端末所有に関するアンケート調査

本研究では、計測実験日とは別日ではあるが、後日(2022 年 12 月)に大多喜高校の生徒及びいすみ鉄道利用者を対象に、Bluetooth 端末の所有率に関する WEB と手渡し配布によるアンケート調査を行った。その調査結果を図-3 に示す。同図に示すように、他の年齢層に比べ、生徒の方が端末を ON にしている Bluetooth 端末の所有率

が高いことを確認することができる。一方、高齢になるほど、端末所有率は下がるものの、割合が最も少ない70歳代においても半数は超えているとの結果を得た。

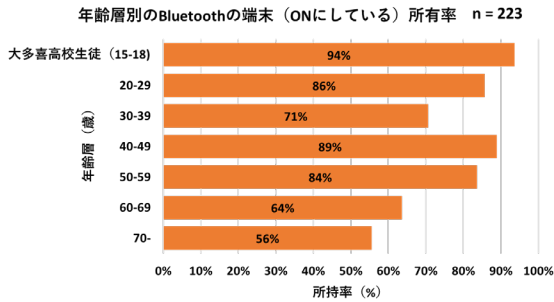


図-3 年齢層別の Bluetooth 端末 (ONにしている) 所有率

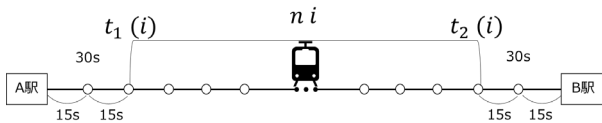
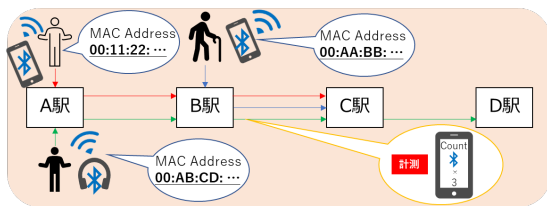


図-4 駅間の MAC アドレス計測期間について



アドレス例	A駅 -B駅	B駅 -C駅	C駅 -D駅	乗車区間 推定結果
00:11:22: ...	○	○	×	A駅⇒C駅
00:AA:BB: ...	×	○	×	B駅⇒C駅
00:AB:CD: ...	○	○	○	A駅⇒D駅

○: その区間でアドレスが観測された  
×: 観測されなかった

図-5 MAC アドレス数による乗車区間 OD の計測方法

#### 4. 分析方法

##### (1) OD 交通量の推計方法

本節では、Bluetooth を用いた OD 推計手法について説明する。

前述したログデータでは、各 MAC アドレス、観測頻度 (回/周期)、平均電界強度 RSSI (dBm/周期) が記録されている。なお、今回用いたスキャナデバイスには位置情報 (緯度・経度) の計測機能がないため、運行計画データから得られる電車の到着・出発時刻の情報を利用して時刻を同期して、駅間計測の結果を整理する必要がある。

そのため、まず、図-4 に示すように、起点駅出発時刻後 30 秒経過した時刻  $t_{1(i)}$  から次駅到着時刻の前 30 秒  $t_{2(i)}$  の間で計測された MAC アドレスを計測対象としている。そして、MAC アドレス計測による乗車区間 OD 表は、図-5 に示すように、同一の MAC アドレスが複数の駅間で観測されたときに、観測された時刻順に端末の OD 移動を結合していくことにより生成される。そして、平均成長率法である式(1)によって、Bluetooth アドレス数による観測された OD 表及び目視計測から得られた実乗降客数 (発生・集中量) から駅間の実分布交通量を推計する。

$$T_{ij} = t_{ij} \cdot \frac{1}{2} (Fd_j + Fo_i) \quad (1)$$

ここに、推定した分布交通量を  $T_{ij}$ 、Bluetooth アドレス数計測による分布交通量を  $t_{ij}$ 、集中交通量の変化率を  $Fd_j$ 、発生交通量の変化率を  $Fo_i$  とする。

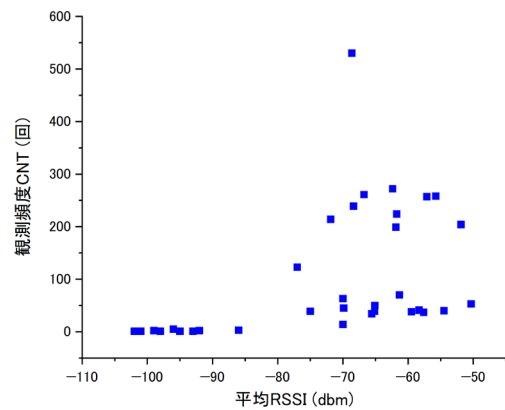


図-6 観測頻度 CNT と平均電界強度 RSSI の関係 (列車番号 3D 大原→西大原区間の観測データ)

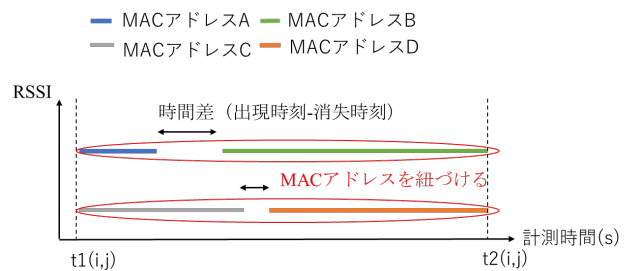


図-7 MAC アドレスランダム化への対応のイメージ図

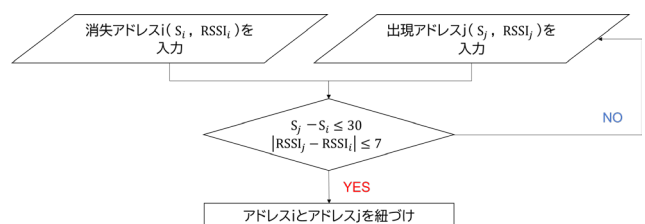


図-8 MAC アドレスランダム化への対応アルゴリズム

## (2) 有効な MAC アドレス抽出方法

前述の駅間計測において、人家や並行する道路などから瞬間的に観測された有効でない MAC アドレスを除外する。本研究では、RSSI に閾値を定めスクリーニングする。具体的には、駅間計測時間内の観測頻度と RSSI の関係より RSSI の閾値を定める。それら関係性の結果を図-6に示す。同図に示すように、-80 (dBm) を境界に観測頻度が大きく変化していることがわかる。このため、本研究では、-80 (dBm) 以上の MAC アドレスを有効な観測対象として抽出している。

## (3) MAC アドレスランダム化への対応

近年、Wi-Fi や Bluetooth を発信する機器では、端末利用者のプライバシー保護のため MAC アドレスがランダム化されることが一般的である。ランダム化された端末は、一定間隔で MAC アドレスが再生成され更新されるため、長時間同一端末を追跡することは困難となる。このため、本研究ではランダム化された MAC アドレスを紐づける集計方法について検討する。具体的には、図-7に示すように、秋山ら<sup>9)</sup>が提案されている手法に倣い、駅間計測中に消失した MAC アドレスとその直後に出現したアドレスとの時刻差（出現時刻-消失時刻）とそれらの固有 RSSI の差分を用いて、ランダム化された MAC アドレスを紐づける方法を適用する。具体的な手順は、図-8に示すように、MAC アドレス出現-消失の時刻差の閾値を 30 (s) 以下、平均 RSSI の差を約 7 (dBm) 以下と設定して、より近い MAC アドレス同士をペアリングして抽出している。なお、全くの同条件により重なってしまったアドレス候補ペアについては、分析対象から除外している。

## 5. 分析結果

### (1) BLE 計測数と実乗車人数との関係

BLE 機器により観測された MAC アドレス計測数と実際の駅間乗車人数との関係を把握する。図-9に9/13 (火) の観測データから得られた結果を示す。結果に示すように、BLE 電波による MAC アドレス計測数の平均値と乗車人数には一定の相関が認められる。また、朝の通学/通勤のピーク時間帯（図-9中の橙）とそれ以外の時間帯（図-9の青）の違いに着目すると、ピーク時間帯の方が決定係数 ( $R^2=0.98$ ) がそれ以外の時間帯 ( $R^2=0.66$ ) に比べて、関係性が強い傾向であることが判明した。

### (2) 時間帯別 OD 分布パターンの推計結果

平日 (9/13) の時間帯別の真値（目視計測）と推計値の OD 分布パターンを図-10、図-11に示す。図-10の平日朝ピーク時では、真値と推計値の OD 分布が概ね近似していることが確認できる。これは、平日ピーク時では、

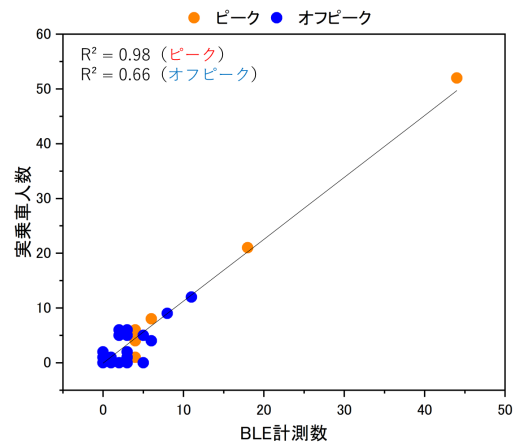


図-9 平日の BLE 計測数と乗車人数との関係

高校生の利用が多く、MAC アドレス端末の所有率の高い属性の乗客が利用する時間帯の方が、より精度の高い推計ができる可能性が示された。一方で、図-11の平日オフピーク時では、真値と推計値の OD 分布に差がみられた。これは、1~2の少サンプルであるために MAC アドレスの誤計測の影響、あるいはピーク時間帯ほど特定属性の乗客に偏りが無いことによる端末所有率などのバラつきが影響した可能性が推察される。

また、平日ダイヤ（表-2参照）内の他鉄道との接続時間帯による OD 分布パターンの反映状況を調べた結果を示す。具体的には、上総中野駅において小湊鐵道と接続する時間帯と直後の非接続時間帯の別の真値（目視計測）と推計値の OD 分布パターンを図-12、図-13に示す。両図の結果に示すように、接続時においては、上総中野から拠点駅である大多喜駅、JR 外房線のある大原駅の OD 量が多くなるなどそうでない場合の傾向の違いを反映していることが確認できる。以上のことから、推定精度が時間帯によっては異なるものの、時間帯による OD パターンの違いを概ね補足できる可能性が示された。一方、一定精度を確保可能なサンプル数検証が今後必要である。

## 6. おわりに

本研究では、BluetoothのMACアドレスを活用して、取得されたデータからOD推計を行う手法を提案し、地域鉄道車両内で調査された調査観測値を真値として精度の比較検証を行った。その結果、MACアドレス計測数により、地域鉄道の乗車状況計測に活用できる可能性が示唆された。具体的には、BLE電波によるMACアドレス計測数の平均値と乗車人数には一定の相関が認められた。また、ピークのOD分布パターンの違いを反映するなど、地域鉄道におけるOD交通量の推計としての有用性が確認できた。ただし、今後の課題として、時間帯に

よっては、実測値と乖離やバラツキが大きくなっていることから、一定の精度を確保可能なサンプル数の検証が必要であると考えられる。さらに、長期間の観測データ

に基づく検証や季節変動を考慮した検証なども課題として挙げられる。

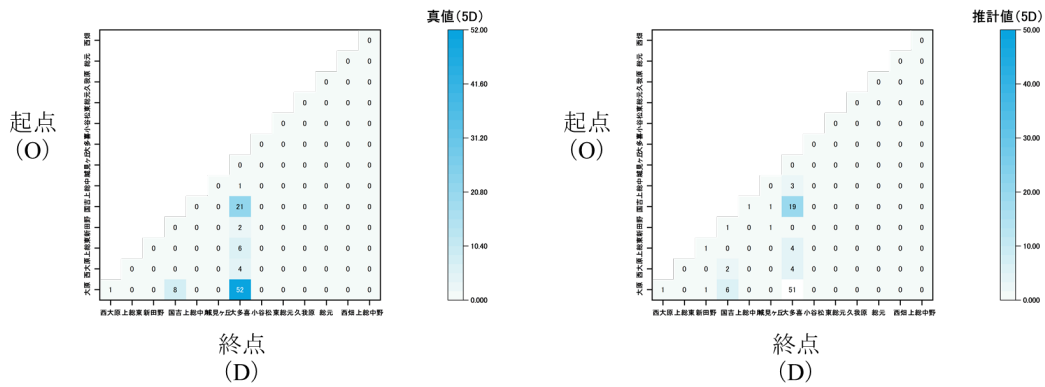


図-10 平日ピーク時(5D)のOD分布パターンの比較

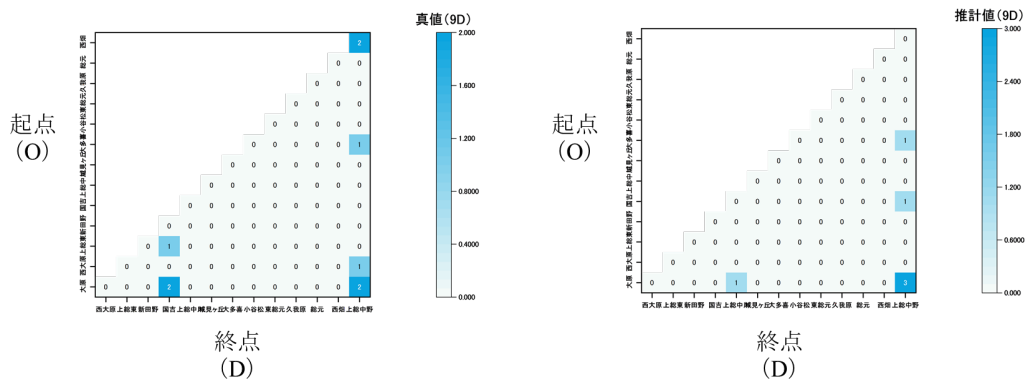


図-11 平日オフピーク時(9D)のOD分布パターンの比較

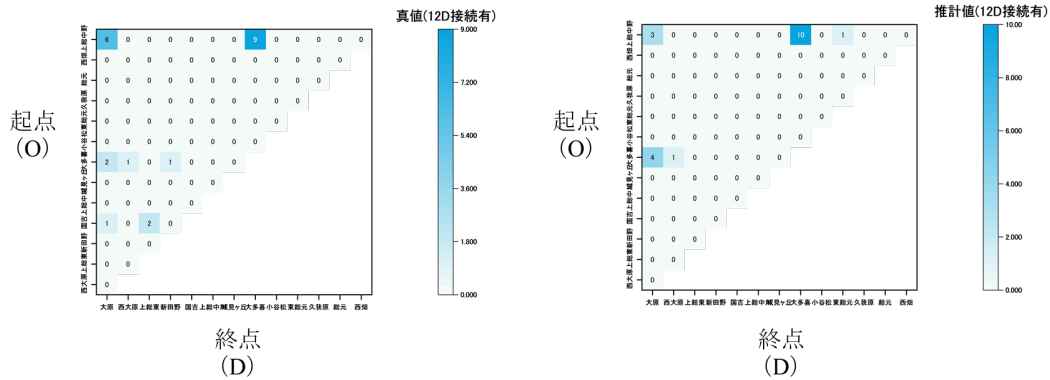


図-12 平日小湊鉄道接続有り(12D)のOD分布パターンの比較

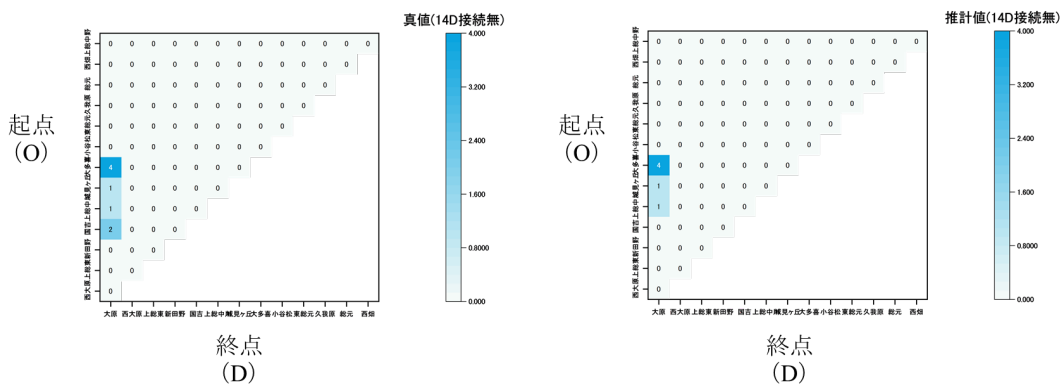


図-13 平日小湊鉄道接続無し(14D)のOD分布パターンの比較

表-2 いすみ鉄道における平日ダイヤの一部抜粋

	駅名	列車番号			駅名	列車番号	
		5D	9D			12D	14D
下り	大原	7:44	9:23	上り	上総中野	10:33	11:48
	西大原	7:48	9:26		西畑	10:36	11:51
	上総東	7:54	9:33		総元	10:41	11:56
	新田野	7:58	9:37		久我原	10:44	11:59
	国吉(着)	8:01	9:39		東総元	10:47	12:02
	国吉(発)	8:03	9:41		小谷松	10:50	12:05
	上総中川	8:08	9:46		大多喜(着)	10:54	12:09
	城見ヶ丘	8:12	9:50		大多喜(発)	11:01	12:22
	大多喜(着)	8:14	9:53		城見ヶ丘	11:03	12:24
	大多喜(発)	8:21	9:58		上総中川	11:08	12:29
	小谷松	8:25	10:02		国吉(着)	11:12	12:33
	東総元	8:27	10:04		国吉(発)	11:13	12:34
	久我原	8:30	10:07		新田野	11:16	12:37
	総元	8:33	10:10		上総東	11:21	12:42
	西畑	8:38	10:15		西大原	11:27	12:48
	上総中野	8:42	10:19		大原	11:30	12:51

謝辞：研究を遂行するにあたり、いすみ鉄道関係者の皆様には調査への協力や有益なご助言を戴いた。ここに皆様に感謝の意を表す。

## REFERENCES

- 1) 北澤俊彦, 塩見康博, 田名部淳, 菅芳樹, 萩原武司: Bluetooth 通信を用いた旅行時間計測に関する基礎的分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No. 5, pp. 501-508, 2014.
- 2) Bhaskar, A., Kieu, L. M., Qu, M., Nantes, A., Miska, M. and Chung, E.: Is bus overrepresented in Bluetooth MACScanner data? Is MAC -ID really unique?,

International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, Vol.13(2), pp. 119-130, 2015

- 3) 坪田隆宏, 吉井稔雄, 藤井浩史, 河野侑奈: Bluetooth スキャナの指向性と設置位置を考慮した MAC アドレスの検知確率推定モデル, 交通工学論文集, Vol. 3, No. 2, pp. 37-43, 2017.
- 4) 山中亮, 神谷大介, 我部新, 福原和人, 金城太一, 久保田尚, 小嶋文, 菅芳樹: 生活道路の通過交通調査における Bluetooth センサーの利用可能性の検討, 第 61 回土木計画学研究発表会・講演集, 1184, 2020.
- 5) Nishiuchi, H., Nakano, S.: Factors Influencing the Accuracy of Directional Traffic Volume Estimation at Signalized Intersection Using Bluetooth MAC Address, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, Vol.20, pp. 212-222, 2022.
- 6) 中村典雅, 薄井智貴, 山本俊行, 森川高行: BLUETOOTH を活用した観光回遊行動把握の可能性に関する研究, 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集, 35-01, 2016.
- 7) 金光勇慈, 田谷瑛悟, 立花巧樹, 中村優有吾, 松田裕貴, 諏訪博彦, 安本慶一: BLUETOOTH を用いた路線バスの混雑度推定, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム 2021 論文集 2021 (1), pp.62-69, 2021.
- 8) 秋山周平, 森本涼也, 谷口義明: MAC アドレスがランダム化された BLE 機器の同定手法, 2021 年度情報処理学会関西支部 支部大会, 2021.

(Received July 1, 2022)

(Accepted November 1, 2022)

## ORIGIN-DESTINATION MATRICES ESTIMATION METHOD USING BLUETOOTH SENSING DATA ON REGIONAL RAILWAYS

Satoshi HYODO, Ryuichi MIKITA, Masato NISHIWAKI, Tomoyuki TODOROKI, Koichi FURUTAKE and Yoshiki SUGA