

地域鉄道における Bluetooth LE を用いた 利用状況の推定手法に関する研究

三木田 龍一¹・兵頭 知²・西脇雅人³・轟 朝幸⁴・五味 悠一郎⁵

¹学生会員 日本大学大学院 理工学研究科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)
E-mail: csry21006@g.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学 理工学部交通システム工学科 助教 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)
E-mail: hyoudou.satoshi@nihon-u.ac.jp

³学生会員 日本大学大学院 理工学研究科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)
E-mail: csma21001@g.nihon-u.ac.jp

⁴正会員 日本大学 理工学部交通システム工学科 教授 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)
E-mail: todoroki.tomoyuki@nihon-u.ac.jp

⁵非会員 日本大学 理工学部 応用情報工学科 准教授 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)
E-mail: gomi.yuichirou@nihon-u.ac.jp

地域鉄道の事業者において、最適な運行本数や運行時間の検討など事業改善のため日々の乗車状況を把握することは重要である。これまで、鉄道利用状況把握としては、IC カードデータや応加重装置によるデータを活用することが一般的である。しかしながら、設置・導入のコスト面から地域鉄道では IC カードや応加重装置を未導入の事業者も多い。このため、低廉かつ簡便に鉄道利用状況を把握する手法の構築が期待されている。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 の電波を用いて鉄道車両内での乗車状況の計測実験を行い、その実用性について検討した。その結果、目測による乗車人数と BLE による計測数との間には一定の相関があることを確認し、さらに BLE 計測数からピーク時と閑散期など乗車状況の傾向を把握することの可能性が示唆された。

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

1. はじめに

主に都市部の大手鉄道事業者では、車内や駅構内の混雑状況が計測されている。計測の主な目的は、ラッシュ時の混雑平準化が目的であったと思われるが、新型コロナウイルス感染症の流行以降、混雑した鉄道車両内での感染を避ける指標としても活用されている。また、地域鉄道についても、定期的ではないものの、通学・通勤のラッシュ時や行楽シーズンなどの混雑が発生するケースが想定される。さらに、最適な運行本数の計画や運行時間の検討など事業改善のため日々の乗車状況を把握する際にも有用であるものと考えられる。

乗車状況や乗降数把握の基礎データとしては、応加重装置によるデータや IC カード利用等の出入場データなどを中心に用いられているのが一般的である。しかしながら、都市部の鉄道事業者と比較して、地域鉄道で使用されている車両は古いことや新たに機器を設置・導入するコスト面を鑑みると、地域鉄道では乗車状況の計測に対する設備投資等の負担が大きいものと考えられる。

そこで、本稿では、スマートフォン等などから発信される Bluetooth Low Energy (以下、BLE) の電波を用いて鉄道車両内で混雑状況計測実験を行い、その実用性を検討する。同手法では、市販スマートフォンにインストールしたアプリケーションを用いて計測するため、大手事業者で先行して行われている事例と比較して、簡便かつ低廉に導入可能である点がその特徴として挙げられる。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

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した試みを中心に研究が実施されている。例えば、北澤ら¹⁾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.²⁾では、複数の Bluetooth デバイス

を搭載した車両が移動する場合の移動時間の推定に関するバイアスを検討している。坪田ら³⁾は、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⁴⁾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、その利用可能性を検討している。また、Nishiuchi and Nakano⁵⁾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 BLE の電波計測を活用して、歩行者の回遊性の計測⁶⁾やバス乗客の混雑度計測への応用も検討されている⁷⁾。しかしながら、鉄道利用状況を対象にした BLE の研究事例については僅少であり、かつ地域鉄道を対象にした十分な検討はなされていないといえる。

そこで、本研究では、Bluetooth Low Energy の電波を用いて鉄道車両内での乗車状況の計測実験を行い、その実用性について検討した。

3. BLE を用いた混雑状況の計測方法

(1) BLE の計測アプリ

Android 端末による Bluetooth 送受信機能を利用して、乗客が所持している BLE 機器から発信される電波を 10 秒ごとにセンシングし、その数量を計測するスマートフォンアプリを使用した (図-1 参照)。また、計測データについてはスマートフォンには直接記録せず、データ蓄積用のサーバに送信する仕様としている。計測機器は、表-1に示すように、いすみ鉄道では平日 3 車両運用、休日は 5 車両運用となるため、計 5 台設置して調査を実施した。設置した位置については、図-2に示す車両内の中央部にある網棚 (図-3) に設置して計測を実施した。

(2) 使用したデータ

本節では、BLE 機器から発信される電波の記録である BLE ログデータ、運行計画データおよび目視観測データの 3 つを使用している。BLE ログデータは MAC アドレス数とその内訳である各 MAC アドレスも記録されている。運行計画データは、鉄道事業者より提供頂いたデータでどの車両がどの時間帯に使用されているかを示したデータである。目視観測データは、目視による各駅の乗降人数の記録したデータである。

(3) MAC アドレス数の集計方法

本節では、BLE 機器から発信される電波の集計方法について説明する。15 秒を 1 回の計測周期として、その時間に計測された MAC アドレス数とその内訳である各 MAC アドレスが記録されている。そして、運行計画データとを照らし合わせることで、駅間に計測された MAC アドレス数を計測している。具体的には、図-4 に



図-1 Bluetooth 計測機器 (アプリ)

表-1 運行車両の概要

車両名	車両番号	座席タイプ	席数	乗車可能人数
いすみ300形	301/302	ボックス	43	113
いすみ350形	351	ロングシート	44	125
キハ28	125	ボックス+ロング	61	127
キハ52	2346	ボックス+ロング	32	77

いすみ300形
キハ28
キハ52



いすみ350形



図-2 Bluetooth 計測機器の設置車両



図-3 Bluetooth 計測機器の設置状況

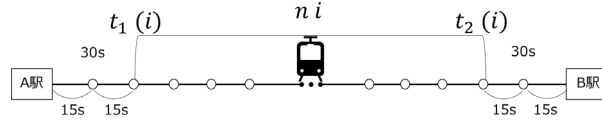


図4 MACアドレス数の集計イメージ



図5 対象の地域鉄道路線

示すように、 i 番目の駅間を出発後 30 秒後の時刻 $t_1(i)$ から到着時刻前 30 秒 $t_2(i)$ の間の時間帯で計測された平均 MAC アドレスの計測数 BL_{mean} を式(1)により集計している。

$$BL_{mean} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} BL(j) \quad (1)$$

ここで、

n_i : i 番目の駅間で対象時間帯に計測された回数

$BL(j)$: 計測時間内 j 番目の MAC アドレスの計測数とする。

4. 地域鉄道車両内での混雑状況計測実験

(1) 対象の地域鉄道路線

前述のスマートフォンアプリを用いた混雑状況の計測実験の対象として、地域鉄道のひとつである千葉県のいすみ鉄道の路線にて実施した (図-5 参照)。具体的には、いすみ鉄道の大原駅から上総中野駅の計 14 駅、26.8 km の路線 (上り/下り) を対象とする。

(2) 計測実験の概要

実験は運行事業者の許可ならびに協力を得て営業運転中の車内に BLE 機器を設置して行った。計測期間については、表-2 に示すように、2022 年の 9 月 13 日 (火) から 9 月 19 日 (月・祝日) の 1 週間を対象に実施した。また、BLE の MAC アドレス計測数と実際の乗車人数と

表-2 計測実験の概要

調査項目	・ Bluetooth 計測機器による計測 ・ 目視による乗降者数の記録	
日時	2022 年 9 月 13 日 (火曜) ～ 2022 年 9 月 19 日 (月・祝日)	
対象ダイヤ	平日	2D (5:50~6:19) ~ 31D (21:09~21:38)
	休日	50D (5:50~6:19) ~ 75D (20:42~21:11)
区間	いすみ鉄道 いすみ線 (千葉県) (上り) : 上総中野駅⇒大原駅 (下り) : 大原駅⇒上総中野駅 1 往復 53.6km	
調査人員・機器台数	4 人・5 台	



図-6 計測実験での様子

の比較のために、計測期間のうち 9 月 13 日と 9 月 19 日の 2 日間については、同時に計測員が乗り込み、目視による各駅の乗降人数の記録・観測調査もあわせて実施し

た。計測の様子を図-6に示す。調査員を車両の前後にそれぞれ1人ずつ配置する形で目視による観測を実施した。

5. 分析結果

(1) 実験の計測結果

図-7に得られた計測期間別の有効運行本数当たりの述べMACアドレスの計測数を示す。ここで、有効運行本数とは、計測機器のバッテリー切れ等の不具合で正常に

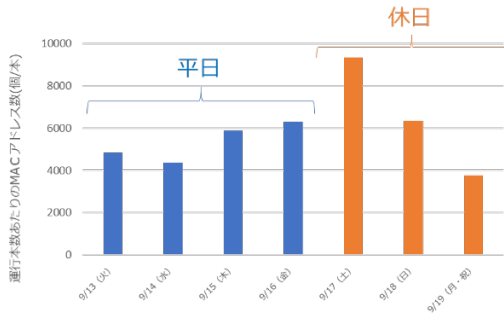


図-7 計測期間別の有効運行本数当たりのMACアドレス数

計測できなかった対象運行を除いた正常に観測ができた運行本数のことを指している。

結果に示すように、日別に観測 MAC アドレス計測数を比較すると、平日では 4,359~6,304 の間で安定的に推移しており、一方休日では土曜日に最も多くの MAC アドレス数 (9,352) が計測されていることが分かった。このことから、平日に比べ休日の利用が多い観光鉄道の側面を持ついすみ鉄道ならではの乗車傾向を概ね捉えられているものと推察される。ただし、9/19 (月・祝) については、3 連休の最終日でかつ台風襲来の情報が影響したのか、その他の休日に比べ少ない観測数 (3,762) であった。

次に、9/13 (火) の観測データを時間帯別・方向別に BLE の MAC アドレス計測数と実際の乗車人数との関係を整理した結果を図-8 および図-9 にそれぞれ示す。結果に示すように、下り区間と上り区間共に、MAC アドレス計測数から朝・夕の高校生の通学や帰宅のピーク時とそれ以外の閑散期の時間帯などの乗車状況の傾向を把握することができる。また、目測による乗車人数と MAC アドレス計測数との間には一定の関連があることが確認でき

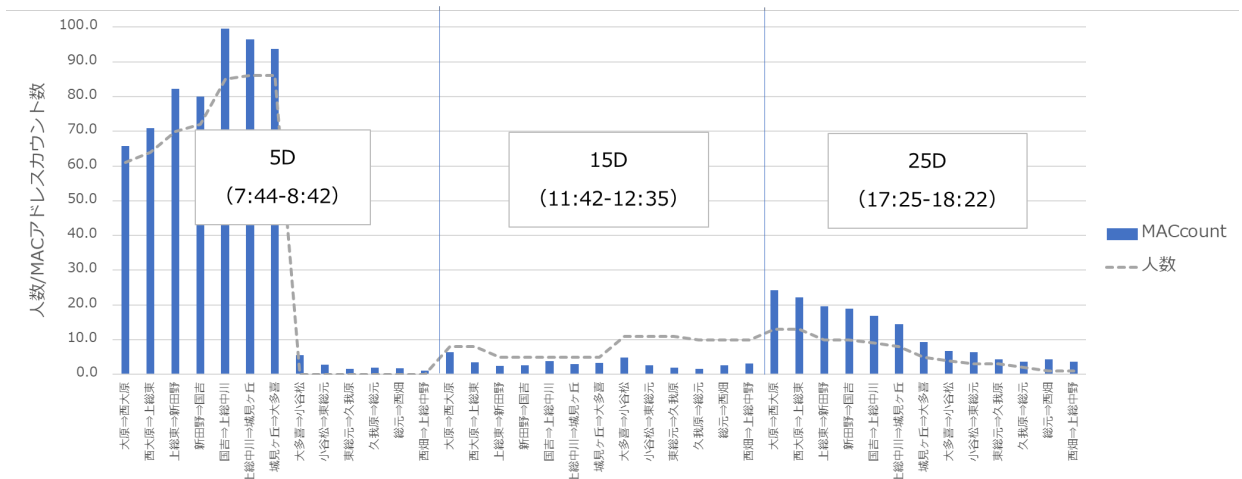


図-8 MAC アドレス計測数と実際の乗車人数 (下り：大原 ⇒ 上総中野)

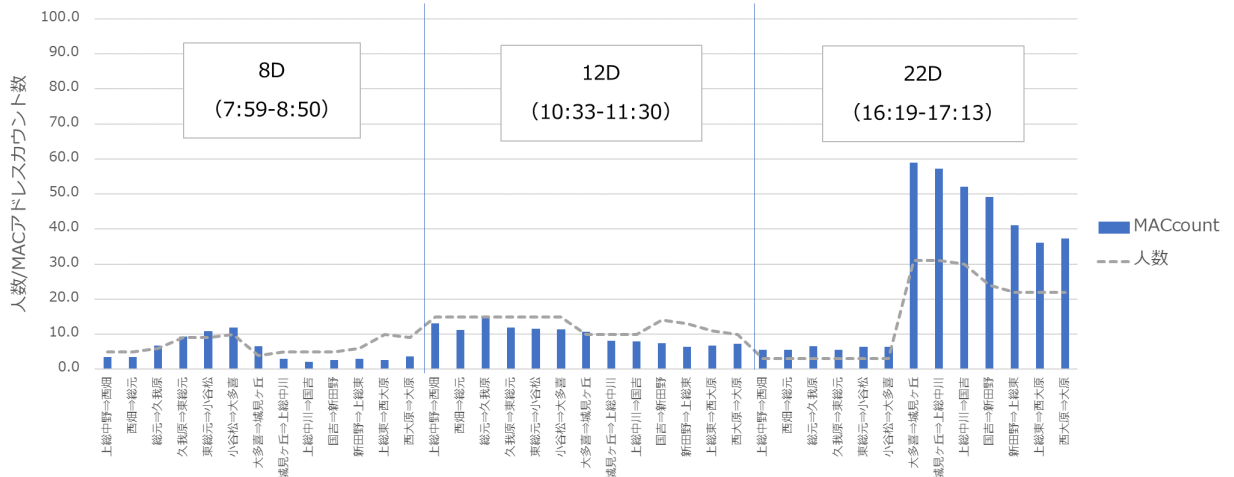


図-9 MAC アドレス計測数と実際の乗車人数 (上り：上総中野 ⇒ 大原)

る。

(2) BLE 計測数と乗車人数との相関について

ここでは、BLE 機器により観測された MAC アドレス計測数と実際の乗車人数との関係を把握する。まず、図-10 に 9/13 (火) の観測データから得られた結果により整理した結果を示す。また、図-11 に 9/19 (月・祝) の観測データから得られた結果を示す。それら結果に示すように、これらの相関係数は全体で $R=0.941$ (平日)、 $R=0.879$ (休日) と概ね高い値であることが分かる。また、平日については、朝・夕の通学/通勤と帰宅のピーク時間帯 (図-10 中のオレンジ四角) とそれ以外の時間帯 (図-10 中の青丸) の違いに着目すると、朝・夕のピーク時間帯の方が相関関係 ($R=0.921$) がそれ以外の時間帯 ($R=0.782$) に比べて強い傾向であることが伺える。これは、いすみ鉄道の場合、朝・夕のピーク時間帯の利用者の多くは高校生のため Bluetooth イヤホンなどの使用

表-3 MAC アドレス計測数と乗車人数の回帰分析結果

種類	対象ダイヤ (サンプルサイズ)	決定係数	回帰係数	t値
全て	3D~26D (n=267)	0.92	0.76	56.5
平日	通学/通勤・ 帰宅	0.93	0.77	30.6
	それ以外	0.81	0.84	32.1
休日	51D,54D,55D,57D,58D,61D n=65	0.90	0.94	27.0

頻度が高いことが想定され、その影響が相関関係に反映されたものではないかと推察される。

(3) BLE 計測数と乗車人数との回帰分析結果

前節の結果を受けて、MAC アドレス計測数と実際の乗車人数との関係性が時間帯によって異なると考えたため、時間帯別・日別に MAC アドレス計測数から乗車人数を回帰モデルにより推定した。回帰分析結果を表-3に示す。なお、日付については平日と休日、次いで平日における時間帯を朝・夕の通学/通勤・帰宅のピーク時間帯とそれ以外の計三つに分割して分析している。結果に示すように、平日における通学/通勤・帰宅などのピーク時間帯における決定係数は 0.93 と最も高い決定係数値を示した。このことから、同時間帯では平日 (その他) の時間帯や休日と比較して、BLE による MAC アドレス計測数と実際の乗車人数との関係性が強いとの結果を得た。このことから、通学/通勤・帰宅のピーク時間帯のように、高校生のような特定の乗客が定期的に利用する時間帯の場合の方がよりロバストな推定ができる可能性が示唆された。

さらに、平日 (その他) の時間帯の回帰係数 (0.84) と通学と帰宅のピーク時間帯の回帰係数 (0.77) や休日の回帰係数 (0.94) とを比較すると、僅かな差であるが休日の時間帯の係数が最も高い値を示し、次いで平日 (その他) 時間帯の回帰係数が高い値を示した。このことから、時間帯別の利用者によって拡大係数が異なる可能性が示唆された。しかしながら、概ね $0.8\sim 0.9$ 倍すれば平均的な乗客状況は推定できる可能性が示された。

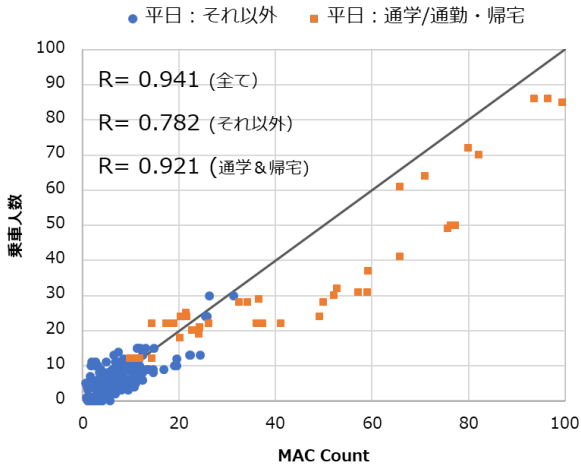


図-10 MAC アドレス計測数と乗車人数との関係 (平日)

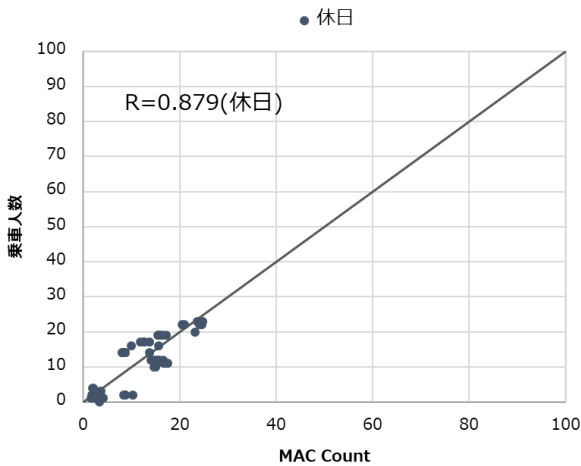


図-11 MAC アドレス計測数と乗車人数との関係 (休日)

6. おわりに

本稿では、鉄道車両内で計測した BLE 電波による MAC アドレス計測数と乗車人数の推定を目的に BLE 電波を計測するスマートフォンアプリを作成し、実際の車内で計測実験によりそれらの関係性を検証した。その結果、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、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、以

下に示す知見を得た。

- ・ BLE 電波による MAC アドレス計測数により平日と休日の利用乗客状況の違いを反映できる可能性が示唆された。
- ・ 通学/通勤・帰宅のピーク時間帯などの定期利用者が多くを占める時間帯において、MAC アドレス計測数と実際の乗車人数との関係性が強い傾向であることが示唆された。
- ・ 概ね BLE 電波による MAC アドレス計測数に 0.8 ~ 0.9 倍すれば、平均的な乗客状況を推定できる可能性が示唆された。

また、今後は、BLE 電波による MAC アドレス計測時における周辺人家による影響などに対するスクリーニング処理の精緻化、乗客 OD の計測への活用可能性の検討やより長期間の観測データに基づく検証などを行う予定である。

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

参考文献

- 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 MAC Scanner 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: BLE 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: BLE 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. (2022.09.30 受付)

STUDY ON A USAGE ESTIMATION METHOD USING BLUETOOTH LE ON REGIONAL RAILWAYS

Ryuichi MIKITA, Satoshi HYODO, Masato NISHIWAKI, Tomoyuki TODOROKI and Yuichiro GOMI