

電動パーソナルモビリティのシェアリング事業に向けた 無線充電システムのシミュレーションによる解析

林 寛将¹ 笹谷 拓也^{1,2} 畑 勝裕¹ 山村 亮介³ 川原 圭博¹

概要：

電動パーソナルモビリティは公共交通機関へのファースト/ラスト・ワンマイルをシームレスに接続することができる交通手段として台頭している。しかし、電池を使用することによって屋外での充電や電池の交換が必要となり、利便性や安全性が低下するといった問題が生じている。磁界共振結合方式を用いた無線充電技術はこれらの問題を解決すると期待されているが、シェアリング事業特有の利用パターンを考慮するとシステム設計や導入戦略に必要な入力電力や電池容量などの指標は未知数である。本論文ではこれらの指標を調べるために Citi Bike が公開するデータを用いてシミュレーションモデルを構築し、電池容量の削減・利便性の向上・事業者の負担軽減などの無線充電の導入によって与えられる効用を定量的に評価した。本シミュレーションを通して、無線充電化されたステーションの割合を 25% とするだけで、大きく利用者の利便性を向上させ、事業者が行う電池の交換回数が大きく減らせることが示された。また、この割合を 100% に近づけるにつれて、これらの指標の改善率は小さくなるため導入コストとのトレードオフが生じることが示唆された。さらに、既存の研究ではシェアリング特有の利用パターンを考慮せず大きな入力電力を設定したものが多かったが、入力電力を大きくする必要はなく 50 W 程度で十分であることを分かった。

Simulation-based Analysis of Wireless Charging Systems for a Sharing Service of Electric Personal Mobility Devices

HIROMASA HAYASHI¹ TAKUYA SASATANI^{1,2} KATSUHIRO HATA¹ RYOSUKE YAMAMURA³
YOSHIHIRO KAWAHARA¹

1. はじめに

マルチモーダルな交通ネットワークのラスト/ファーストワンマイルを埋める手段として、電動アシスト自転車や電動キックボードを始めとした電動パーソナルモビリティのシェアリング事業が世界中で注目を集めている [1]。2020 年現在では、このようなシェアリング事業は COVID-19 により多大な影響を受けているが、衛生管理に最大限の注意を払い、食料品や医療品の物流事業者や、医療従事者などの労働者へ優先的に開放している例もある [2]。さらにヨーロ

パ諸国では人々の健康増進や公共交通機関を避けることを目的として、自転車の利用が急増し、行政も自転車レーンの整備を進めるなど積極的に後押ししている [3]。このような情勢を鑑みると COVID-19 終息後でもパーソナルモビリティのシェアリング事業は単なる移動手段ではなく、物流や健康増進の担い手としても成長していく可能性がある。

さて、既存のシェアリング事業に着目すると電池容量が小さいことによって、利便性が低下することや電池の管理に費やす事業者の負担増加などの問題がある。例えば、需要が多い朝や夕方では多くの車両が電池切れの状態でステーションに放置される。さらに、有線での充電は雨・埃・潮風によって故障や感電の危険性があるため、事業者は電池の交換や車両を持ち帰って充電するなどという地道な作業を

¹ 東京大学 The University of Tokyo

² 日本学術振興会特別研究員 DC JSPS Research Fellow

³ 株式会社 Mercari R4D R4D, Mercari, Inc.

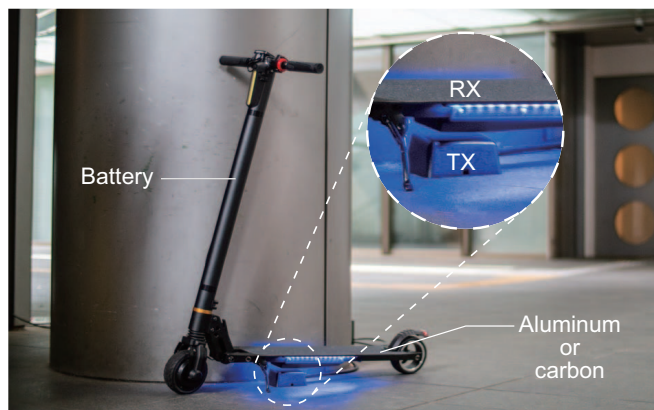


図 1 無線充電システムを搭載した電動キックボード。

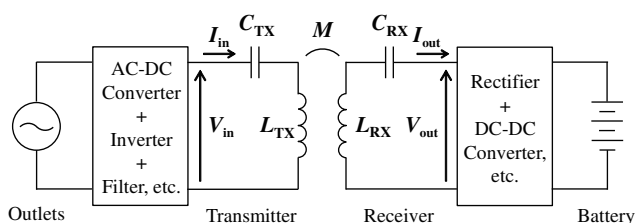


図 2 磁界共振結合方式を用いた無線充電の回路図。

する必要がある。

磁界共振結合方式を用いた無線充電技術はこれらの問題を解決する可能性を有している。一例として我々が実装した電動キックボードに向けた無線充電システムを図 1 に、その簡単な回路図を図 2 に示す。商用電源に繋がれ地面に設置された送電コイルが、電動キックボードのデッキ裏に配置された受電コイルに磁界を介して非接触で電力を送ることができる。このような無線充電システムを既存ステーションに導入することで、利用者が停車すると同時に無意識的に充電が始まるので利便性の向上や事業者の負担軽減が期待される。さらに、金属端子が露出しないため屋外での充電にも適している。したがって、多くの研究者がパーソナルモビリティに向けた無線充電システムの構築に向けた研究に取り組んでいる。この分野で課題となっているのは、高効率化 [4,5]、電磁界被爆からの人体防護 [6]、大電力化 [7]、システムの簡略化・低コスト化 [8,9]、受電器の軽量化 [10,11]、車両形状に適した受電器の設計 [12]、バッテリーマネジメント [13,14] などである。しかし、多くの研究が送受電器の設計やステーションの設計などマイクロな問題の解決に取り組んでいるのが現状である。

そこで本論文ではマクロな視点に立ち、無線充電システムの導入がシェアリング事業全体へ与える影響を調査する。具体的には利用者の利便性や事業者が行う電池交換の回数、搭載する電池の容量などが受ける効用を評価するためにシミュレーションモデルを構築し、そのシミュレーション結

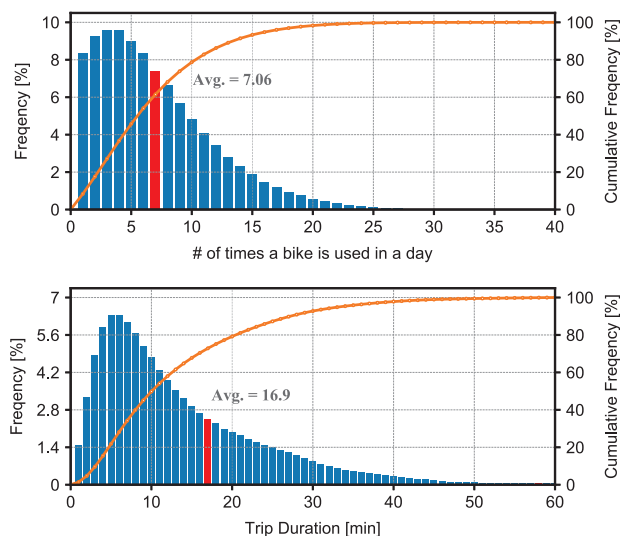


図 3 Citi Bike における 1 台の車両が 1 日に利用される回数のヒストグラムと、1 回のトリップ時間のヒストグラム。

果に考察を与える。無線充電システムの導入によってこれらの指標が大きな影響を受けることは明らかであるが、図 3 に示すように短いトリップ時間で 1 日に数回使われるというシェアリング事業特有の利用パターンを考慮すると効用の大きさやシステム設計に必要な要件は未知数である。予め定量的な評価をすることは無線充電システムの設計や導入戦略などを決定するために非常に重要である。

本稿の以下の章は次のように構成される。第 2 章で Citi Bike が公開するデータセットを用いた電池残量推移や車両選択のモデル構築について記述する。次に、第 3 章でシミュレーションにより得た結果と考察について詳細に説明する。最後に第 4 章で本論文のまとめと今後の展望について記す。

2. シミュレーションモデルの構築

本章では既存のシェアリング事業に無線充電システムを導入するにあたって必要なシミュレーションモデルの構築方法について説明する。データセットとして、New York City で自転車のシェアリング事業を展開する Citi Bike が公開するトリップデータを用いた [15]。このデータには利用時間、利用開始・終了時刻、利用開始・終了ステーションの ID と位置情報、利用自転車 ID、利用者の属性が含まれる。2020 年 5 月時点でステーションは約 900 個設置され、使用されている自転車数は約 14,500 台に至る。我々は Citi Bike が公開するデータからトリップ数が約 250 万トリップと 2019 年で最も多い 9 月の時系列の利用パターンをシミュレーションで再現した。そして図 4 に示すように、利用回数の多いステーションから段階的に無線充電システムを導入することを仮定しシミュレーションを行う。以下では、無線充電

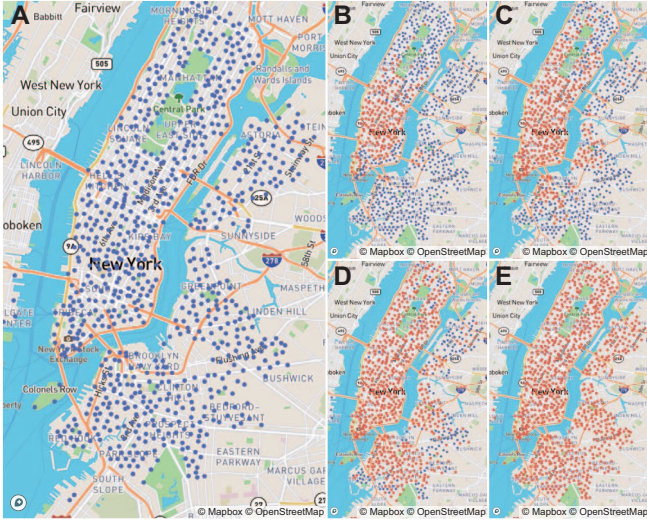


図 4 Citi Bike のステーションマップ. 赤いマーカーは無線充電ステーションを表しており, A から E にかけて無線充電ステーションの導入率が大きくなる. (A : 0 %, B : 25 %, C : 50 %, D : 75 %, E : 100 %)

システムを導入するにあたって車両の選択や再配置, 電池残量の推移などをモデル化するため, それらを詳細に説明する.

2.1 車両の選択

Citi Bike では主に電動ではない車両をシェアリングしているため, 電動化したことを仮定すると利用者は車両の電池残量によって選択するようになることが想定される. これを表現するために, 多項ロジットモデルによる車両の選択手法を導入した. 利用するステーションにある車両の集合 J のうち, 車両 i を選択する確率 p_i は式 (1) で表される. αZ_i は効用関数であり, Z_i [%] は車両 i の電池残量, α はそれにかかる係数である.

$$p_i = \frac{\exp \alpha Z_i}{\sum_{j \in J} \exp \alpha Z_j} \quad (1)$$

今回, 係数 α はパラメータであり我々の経験に基づき 0.1 という値を用いた. このとき例えば, あるステーションに 4 台の車両が停車され, 電池残量が (10, 50, 90, 100)% であるとする, それぞれの選択確率は (0.000090, 0.0049, 0.27, 0.73) となる.

2.2 再配置

Citi Bike を始めとする自転車シェアリング事業では時間や地域ごとにステーションが満車または空になることを防ぐために, 事業者がそれを予測して車両を再配置している. しかし, Citi Bike では再配置した車両台数やその時刻についてのデータを公開していないため, 得られるデータの中

からそれらを推定する必要がある.

データセットの中の利用自転車 ID ごとに時系列でソートすると, トリップが終了したステーションと次にトリップが開始するステーションが異なる場合がある. これはこの終了時刻から開始時刻までの時間帯でトリップ以外の方法によって自転車が移動されたことを示している. したがって, この時間帯で再配置が行われたと推定することができる. しかし, この時間帯の中で再配置された正確な時間を知ることができないため, この時間帯の中央値にあたる時刻で再配置されたとした. 実際に再配置された時刻との誤差はあるが, 大量にあるデータを平均化すればこの時刻に近づく可能性がある.

2.3 電池残量の推移

Citi Bike では主に電池を搭載していない自転車をシェアリングしているため, まず搭載する電池の容量を決める必要がある. 本論文では電動アシスト自転車から電動キックボードまで様々なパーソナルモビリティがシェアリングされていることを加味して, 電池容量をシミュレーションのパラメータとし, 市販されている製品を参考に 180 Wh, 270 Wh, 360 Wh のそれぞれの値を設定した.

既存の電動パーソナルモビリティのシェアリング事業では, 電池残量が小さくなった電池を交換するシステム導入していることが多く, すでに一部のステーションでは充電可能になっている例もある [16, 17]. したがって, 本論文では電池の消費や充電に加えて, 電池交換をモデル化する.

まず, 電池消費では上述のように様々なパーソナルモビリティがあることを考慮して, 消費電力 W_{out} をパラメータとして 60 W, 120 W, 180 W のそれぞれの値でシミュレーションする. なお, 消費電力は荷重, 気温, 道路状況, 走行速度, 使用年数などの多くの不確定要素の影響を受ける. したがって, 平均の値 μ を上記の値とし, 変動係数を 1/10 に固定した標準偏差を設定し, 平均に対する相対的なばらつきを均一とした正規分布 $N(\mu, (\mu/10)^2)$ に従うとした.

次に, 電池交換では事業者が既に再配置のために頻繁にステーションを訪れていることに着目し, 業務を効率化することを目的として再配置と同時に行うように設定した. しかし, 無線充電ステーションでは自動的に充電されるため, 再配置が行われても電池交換は行わない. また, 再配置のときだけ電池を交換すると, 充電切れの車両が長時間に渡って放置されてしまう. そこで, 再配置とは別に電池を交換する必要があるのだが, 事業者がどのような基準で電池を交換するか推定する必要がある. Citi Bike が公開している Monthly Report によると, 再配置に関わるサービス品質保証では「どのステーションでも 4 時間以上停止しない (満車

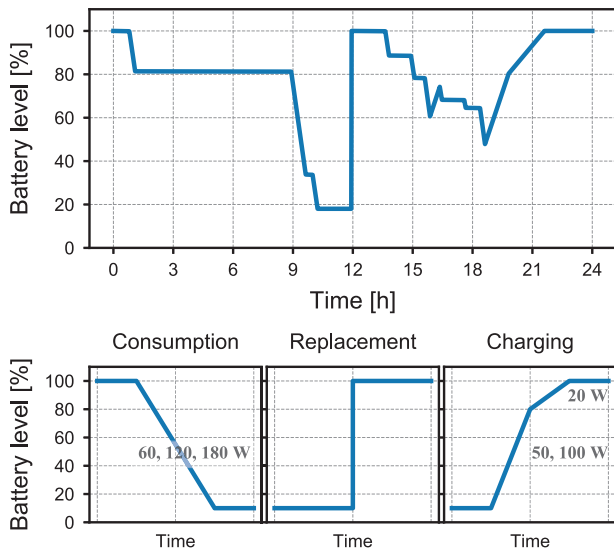


図 5 1 日の電池残量推移の例。下の段はそれぞれ電池消費・交換・充電のそれぞれの電池残量推移を表す。

または空にならない) こと」と定めている [18]。これは再配置の基準であるが、利用者に不便を与える基準として同じ枠組みであるとして「4 時間以上電池残量が低い車両を放置しない」とした。したがって、30 分走行できる電池残量がない車両は 4 時間以内に一律分布に従う確率的に電池の交換が行われるように設定した。

最後に無線充電ステーションでの充電では、入力電力 W_{in} をパラメータとして 50 W, 100 W のそれぞれでシミュレーションを行う。簡単のため電池残量が 80 % 以下では上記の値を用い、それ以上では 20 W で充電するように設定した。

以上をまとめて、図 5 に車両 1 台の 1 日の電池残量推移の例を示す。図 5 のように、1 日の中で何度か使用され、電池交換と充電によって満充電になるという電池残量の推移が繰り返される。

2.4 評価項目

本論文では、第 2.3 節で示した電池の交換回数と、以下で定義する利用者が問題なく貸出・返却できる確率を評価する。前者は事業者の負担に関わる指標、後者は利用者の利便性に関わる指標である。

あるトリップが時刻 t , ステーション i で開始し、時刻 $t + \Delta t$, ステーション j で終了したとする。このとき、貸出時にステーションに車両があり貸出できる確率 $p_{rent}(t, i)$ と返却時にステーションに空きがあり返却できる確率 $p_{return}(t + \Delta t, j)$ は次のように表せる [19]。

$$p_{rent}(t, i) = 1 - p(n(t, i) = 0) \quad (2)$$

$$p_{return}(t + \Delta t, j) = 1 - p(n(t + \Delta t, j) = n_{max}(j)) \quad (3)$$

表 1 シミュレーションに用いたパラメータ

電池容量	180, 270, 360 Wh
導入率	0, 25, 50, 75, 100 %
入力電力 W_{in}	50, 100 W
消費電力 W_{out}	60, 120, 180 W

ただし、 $n(t, i)$ は時刻 t , ステーション i での車両数を表し、 $n_{max}(j)$ はステーション j の車両数の最大値を表す。これを電動の車両のシェアリング事業に拡張すると、電池残量に関する項を加える必要がある。すなわち、貸出時に電池残量がゼロの車両しか存在しない場合や、返却前に電池残量がゼロになってしまう確率を考慮する必要がある。したがって、次のように表すことができる。

$$p_{rent}(t, i) = 1 - p(n(t, i) = 0) - p(\max B(t, i) = 0) \quad (4)$$

$$p_{return}(t + \Delta t, j) = 1 - p(n(t + \Delta t, j) = n_{max}(j)) - p(b_{returned}(t + \Delta t, j) = 0) \quad (5)$$

$B(t, i)$ は時刻 t でステーション i にある車両の電池残量の集合であり、 $b_{returned}(t + \Delta t, j)$ は利用されていた車両の電池残量である。式 (4, 5) によって、時間やステーションごとに变化する貸出・返却確率を表現することができる。なお、本稿で行うシミュレーションは実データに基づくトリップが再現されるため、

$$p(n(t, i) = 0) = p(n(t + \Delta t, j) = n_{max}(j)) = 0 \quad (6)$$

であることに注意されたい。

全てのトリップ $(t, i) \rightarrow (t + \Delta t, j)$ に対し電池の問題が発生せずに、貸出・返却できる確率は次のように表される。

$$p_{rent} = 1 - \sum_{(t, i)} Q(\max B(t, i)) / N_{trip} \quad (7)$$

$$p_{return} = 1 - \sum_{(t + \Delta t, j)} Q(b_{returned}(t + \Delta t, j)) / N_{trip} \quad (8)$$

ただし、 N_{trip} は期間内の総トリップ数であり、 $Q(x)$ は以下を満たす関数である。

$$Q(x) = \begin{cases} 1 & (x = 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (9)$$

3. シミュレーション結果と考察

第 2 章で説明したシミュレーションに用いたパラメータを表 1 にまとめる。これらのパラメータを全通りの組み合わせに対して電池の交換回数と式 (7, 8) で示す貸出確率と返却確率の積を評価した結果を図 6 に示す。電池容量は 3 種類の色で、導入率は 5 種類の図形で、入力電力は行で、消費

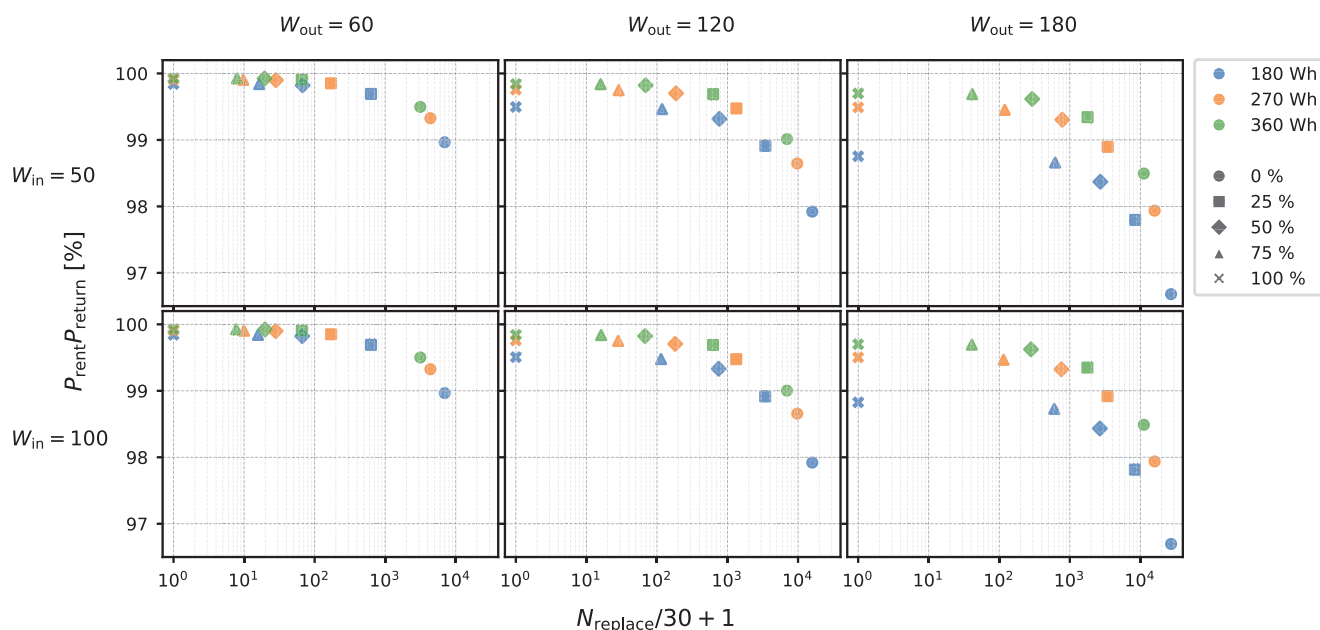


図 6 電池の交換回数と貸出・返却確率の積のシミュレーション結果。電池容量は色で、導入率は図形で、入力電力は行で、消費電力は列でそれぞれ示している。

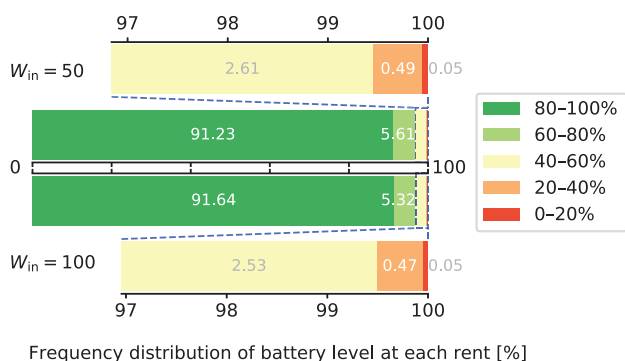


図 7 入力電力をそれぞれ 50 W と 100 W としたときの、貸出時の電池残量の度数分布の比較。

電力は列でそれぞれ表示している。電池の交換回数 N_{replace} は 1 日あたりの平均で示し、ログスケールで表示するために 1 を加算している。

まず、図 6 の色で表示されている電池容量に着目する。電池容量が大きいくほど電池の交換回数も貸出・返却確率も良くなるが、導入率を大きくするとその差は小さくなるのが分かる。例えば、導入率 50%，入力電力 50 W，消費電力 60 W の場合（図 6 の左上の 3 色の◆）を見ると、電池の交換回数は全て 100 回以下であり、電池容量の増加に伴う確率の上昇幅は 0.077% と 0.025% であり小さい。したがって、無線充電を導入することで搭載する電池容量を減らせる可能性があることが分かる。

次に図 6 のマーカーの図形で表示した導入率に注目する

と、25% の導入で最も大きな改善が見られる。例えば、電池容量 180 Wh，入力電力 50 W，消費電力 180 W の場合（図 6 の右上の青■）を見ると、1 日の電池の交換回数が 26384 回から 8161 回まで減少し、確率は 1% 以上上昇している。月間の総トリップ数は約 250 万回であるため、確率 1% の上昇は 25000 回のトリップを改善したことに相当する。しかし、導入率を大きくするほど改善率は小さくなることも分かる。特に消費電力 60 W の場合では、導入率を 50% 以上とすると電池の交換回数は 100 回以下で推移し、確率もほとんど改善されないため、導入率の上昇とともに無線充電ステーションの導入コストとユーザの利便性やその他のコストとのトレードオフが生じると推定される。

次に、図 6 の 1 行目と 2 行目で表示されている入力電力に注目すると、入力電力は電池の交換回数には全く影響を与えないことが分かる。また、貸出・返却確率も消費電力や導入率が大きいくほど改善されているが効果は限定的である。これは、ステーションには複数の車両が待機しているため、充電速度が速くなくとも利用者は十分に充電された車両を選択できるためである。図 7 に電池容量 180 Wh，導入率 50%，消費電力 120 W の場合（図 6 の中央の青◆）の貸出時の電池残量の度数分布を示す。実際に図 7 を見ると、入力電力が 50 W ですでに 90% 以上の利用者は電池残量が 80% の車両を選択できていて、また、貸出・返却確率の低下につながる 40% 以下での貸出数は消費電力を 100 W としてもほとんど改善されない。パーソナルモビリティに向

けた無線充電に関する既存研究では 100 W 以上の大電力を送電することが研究課題になっていたが [4–14], 我々のシミュレーション条件では高々 50 W で十分であることが分かる。大電力化はシステムの複雑化や高コスト化につながるが, シェアリング事業ではその必要性はないことが示された。

4. おわりに

本稿では, Citi Bike を例としてシミュレーションモデルを構築し, 無線充電システムを導入したときに得られる効果を定量的に示した。無線充電システムの導入によって, ユーザの利便性が向上することや事業者が行う電池交換の回数が大きく減少することが分かった。しかし, 無線充電ステーションの導入率を大きくするにつれてこれらの改善率は減少するため, 導入コストとのトレードオフがあることが示唆された。さらに, シェアリング事業ではステーションに待機している車両が多いため入力電力を大きくする必要がないことが分かった。今後は, 時間や区域ごとの需要の変化に着目し, 利用者の行動変容が電池容量や事業者の電池交換回数に与える影響について評価する。

謝辞

本研究は JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JP-MJER1501), JSPS 特別研究員奨励費 (JP18J22537), (株)メルカリの助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Fishman, E.: Bikeshare: A review of recent literature, *Transport Reviews*, Vol. 36, No. 1, pp. 92–113 (2016).
- [2] Lyft: Supporting critical workers and providing free scooter rides, Lyft (online), available from <https://www.lyft.com/blog/posts/LyftUp-Scooter-Critical-Workforce-Program> (accessed 2020-05-12).
- [3] James McAuley and Christine Spolar: One way the coronavirus could transform Europe's cities: More space for bikes, *Washington Post* (オンライン), 入手先 https://www.washingtonpost.com/climate-solutions/one-way-the-coronavirus-could-transform-europes-cities-more-space-for-bikes/2020/05/08/e57f2dbc-8e40-11ea-9322-a29e75effc93_story.html (参照 2020-05-12).
- [4] Pellitteri, F., Boscaino, V., Di Tommaso, A., Miceli, R. and Capponi, G.: Wireless battery charging: E-bike application, *2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, IEEE, pp. 247–251 (2013).
- [5] Pellitteri, F., Boscaino, V., Di Tommaso, A., Genduso, F. and Miceli, R.: E-bike battery charging: methods and circuits, *2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, IEEE, pp. 107–114 (2013).
- [6] Kim, S.-M., Kim, S.-W., Moon, J.-I. and Cho, I.-K.: A 100W wireless charging system with a human protection function from EM field exposure, *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, IEEE, pp. 684–688 (2016).
- [7] Kindl, V., Pechanek, R., Zavrel, M., Kavalir, T. and Turjanica, P.: Inductive coupling system for electric scooter wireless charging: electromagnetic design and thermal analysis, *Electrical Engineering*, pp. 1–10 (2019).
- [8] Beh, H. Z. Z., Covic, G. A. and Boys, J. T.: Wireless fleet charging system for electric bicycles, *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 75–86 (2014).
- [9] Mai, R., Chen, Y., Li, Y., Zhang, Y., Cao, G. and He, Z.: Inductive power transfer for massive electric bicycles charging based on hybrid topology switching with a single inverter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 8, pp. 5897–5906 (2017).
- [10] Li, Y., Hu, J., Chen, F., Liu, S., Yan, Z. and He, Z.: A new-variable-coil-structure-based IPT system with load-independent constant output current or voltage for charging electric bicycles, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 10, pp. 8226–8230 (2018).
- [11] Kwan, C. H., Arteaga, J. M., Yates, D. C. and Mitcheson, P. D.: Design and Construction of a 100 W Wireless Charger for an E-Scooter at 6.78 MHz, *2019 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, IEEE, pp. 186–190 (2019).
- [12] Beh, H. Z. Z., Covic, G. A. and Boys, J. T.: Investigation of magnetic couplers in bicycle kickstands for wireless charging of electric bicycles, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 87–100 (2014).
- [13] Hu, J.-S., Lu, F., Zhu, C., Cheng, C.-Y., Chen, S.-L., Ren, T.-J. and Mi, C. C.: Hybrid energy storage system of an electric scooter based on wireless power transfer, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 14, No. 9, pp. 4169–4178 (2018).
- [14] Ando, T., Omori, H., Kimura, N. and Morizane, T.: Innovative EDLC driven electric scooter with unique power supply systems, *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, IEEE, pp. 1–6 (2018).
- [15] Citi Bike: Citi Bike System Data, Citi Bike (online), available from <https://www.citibikenyc.com/system-data> (accessed 2020-05-17).
- [16] docomo: docomo cike share service home page, docomo (online), available from <https://docomocycle.jp/?lang=en> (accessed 2020-04-29).
- [17] hello cycling: hello cycling home page, hello cycling (online), available from <https://www.hellocycling.jp/> (accessed 2020-04-29).
- [18] Citi Bike: Citi Bike Monthly Operating Reports, Citi Bike (online), available from <https://www.citibikenyc.com/system-data/operating-reports> (accessed 2020-04-24).
- [19] Yoon, J. W., Pinelli, F. and Calabrese, F.: Cityride: a predictive bike sharing journey advisor, *2012 IEEE 13th International Conference on Mobile Data Management*, IEEE, pp. 306–311 (2012).