小型電動モビリティのバッテリーシェアリングによる電池利用の平準化に関する考察

廣川　正太郎[1]・葉　健人[2]・周　純甄[3]・土井　健司[4]

[1]非会員　大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）
E-mail: hirokawa.shotaro@civil.eng.osaka-u.ac.jp
[2]正会員　大阪大学大学院助教　工学研究科地球総合工学専攻（同上）
E-mail: yoh.kento@civil.eng.osaka-u.ac.jp (Corresponding Author)
[3]非会員　大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻（同上）
E-mail: chun.chen.chou@civil.eng.osaka-u.ac.jp
[4]正会員　大阪大学大学院教授　工学研究科地球総合工学専攻（同上）
E-mail: doi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

小型電動モビリティのバッテリーを共通化し，街中のバッテリーステーションでバッテリーを即座に交換できるバッテリーシェアリングの仕組みが注目されている．バッテリーマネジメントの観点および省資源化の観点からバッテリー利用状況を平準化させることの重要性が高まっている．本研究では，バッテリー交換型2輪EVの実証実験で得られたデータを元にバッテリー消費・交換行動モデルを構築した．さらに，バッテリー配置や個人のバッテリー交換型2輪EVの利用の差異による電池利用状況の平準化効果および個人の効用との関係を明らかにした．

Key Words: *small electric vehicle, battery swap, battery load leveling, utility*

1. 研究の背景・目的

近年，環境負荷を低減でき，小回りが効きやすく身近な移動を支える次世代の交通手段として小型電動モビリティの普及が進んでいる．小型電動モビリティは自由度の高い移動を支えることが出来る点で，ニューノーマル時代の多様な交通需要に合った有用性の高い移動手段として期待が高まっている．

さらに持続可能な開発目標(SDGs)の目標12に掲げられた「つくる責任・つかう責任」に示される[1]ように，限られた資源を有効に活用し，消費者のみならず生産者が責任をもって持続可能な社会を目指すことが重要視されている．また，小型電動モビリティに使用される充電式バッテリーの劣化は充放電回数に比例する特徴[2]がある．近年ではライフサイクルを通したバッテリーマネジメントが重視され，劣化状況に応じた2次利用や3次利用，あるいは寿命を迎えたバッテリーをリサイクルすることでバッテリー循環社会の実現に向けた取り組み[3]が加速している．

このように公共財として大量のバッテリーが普及する状況において，社会のバッテリー毎の使用状況（単一バッテリーの総出力電力）の偏りを小さくすることで，劣化状況を均一化させることの重要性が高まっている．なお，以降では社会のバッテリー毎の使用状況（単一バッテリーの総出力電力）の偏りを小さくすることを電池利用の平準化と呼ぶ．

社会に普及したバッテリーの寿命の設計基準は充放電が多く繰り返されたバッテリーに依るため，使用状況を平準化させることで，シェアされるバッテリーの設計上の寿命を伸ばすことが可能となる． 加えて，バッテリーの利用状況を平準化することにより，バッテリーを他の目的に転用する際に実施する状態把握（劣化診断）が容易になるメリットがある．このような電池利用の標準化の利点を最大限享受する一つの手段として，バッテリーシェアリングが期待されている．バッテリーシェアリングとは電動モビリティのバッテリーを規格化し，バッテリー残量割合(SOC: State Of Charge)が少なくなった時に街中に配置されたバッテリーステーション(BS)で満充電されたバッテリーと交換する仕組みのことである．バッテリーシェアリングは既存のEVの「充電時間の長さ」

等の短所を克服する手段として近年アジアを中心に導入が進んでいる[4)5)6)]．また，まちなかに充電済みのバッテリーが整備されることから，モビリティ以外の用途での活用することで公共的な価値が高まり，新たなインフラとしての位置づけも期待ができる．

一方で，バッテリーシェアリングや利用者行動をモデル化し，シミュレーションによって利用者の利便性向上・充電戦略の構築・BSの最適配置などを扱った研究がみられる．Wuら[7)]はバッテリー交換の待ち時間の短縮及びサービスの効用の最大化を目的とし，ユーザーの人数とバッテリーの個数について考察している．Liuら[8)]は充電・設備投資コストを最小限にし，BSの経済的収益性と運用の柔軟性を向上させることを目的にバッテリーの個数と充電戦略について考察している．Wangら[9)]やHofら[10)]は車両の移動・運転経路をモデル化することにより，設置コストの低減と利便性の向上を目的としBSの数と最適立地について明らかにしている．また，バッテリーの劣化について検討した研究もわずかに存在する．Tararら[11)]はバッテリーの劣化要素を交換サイクルコストの計算に組み込み，バッテリー交換時のSOCを変化させることによってバッテリーの劣化を抑えるシナリオを立て分析した．Uribe[12)]らは充電スロット数・バッテリー数・2輪台数を変化させることによるバッテリーの充放電量を算出した．また，山本[13)]らの研究では集合住宅への電力供給において，燃料電池を複数世帯で共有することにより燃料電池の負荷を平準化可能であることを示しているが，この研究は住宅の電力消費に関する研究であり，モビリティによる移動と関連付けた研究ではない点に注意が必要である．以上のようにバッテリーシェアリングに関する研究が散見されるが，バッテリーの利用状況を平準化させることを主眼に置いた研究は乏しい．

本稿は，実証実験で収集された実利用データを用い移動・バッテリー交換をモデル化する．この上で，インフラ整備としてのバッテリー配置や個人のバッテリー交換型2輪EVの利用（トリップ発生頻度・バッテリー交換のタイミング）に関するシナリオを設け，電池利用の平準化効果を検証する．加えて，各シナリオ下におけるバッテリー交換に関わる個人の負の効用を算出し，電池利用の平準化との関係を明らかにすることで，バッテリーシェアリングシステムの普及施策に資する知見を得ることを目的とする．

2. バッテリー交換型2輪EV実証実験「eやんOSAKA」

(1) 実証実験の概要

本研究では小型電動モビリティのうち，バッテリー交換型 2 輪 EV を対象として分析を行った．本研究で扱うデータは（一社）日本自動車工業会，大阪府，大阪大学が共同で実施したバッテリー交換型 2 輪 EV 実証実験「eやん OSAKA」で収集されたものである．実証実験は，BS を街中に配備することによる，充電待ち時間の低減，航続距離の増加などの利便性の向上を検証することが目的として実施された．**表-1** に実証実験の概要を記載する．学生を中心としたモニターに原付一種の電動 2 輪 EV を貸与した．今回実験に用いた車両はプラグインによる充電はできず，バッテリーを交換する型である．なお，本実験ではバッテリーの充電器を個人に貸渡せず，大学キャンパスおよび実験に協力する街中のコンビニ計 12 箇所に，バッテリー交換ステーション（以降，BS）を設けた．以降，大学キャンパスの BS を CBS，街中のコンビニに設置された簡易な BS を TBS と表記する．**図-1** としてバッテリー交換型 2 輪 EV での移動およびバッテリー交換のイメージ図を示す．なお，CBS には 3 回分，TBS には 2 回分の交換用バッテリーが充電・設置されているが，実験後のヒアリングでは交換時に充電済みのバッテリーが無かったケースは存在してないことを確認しており，街中に配備されたバッテリーの数は十分だった．

表-1 実証実験「eやん OSAKA」の概要

実験期間	2020 年 9 月～2022 年 3 月（3 カ月×6 期） ただし，本稿は 2021 年 1 月から 9 月までの 3 期分のデータを用いる
モニター	大阪大学所属学生・教職員各期 20 名 一部複数期を跨ぎ参加しているため， 分析対象は計 49 名
実験条件	それぞれの実験モニターに車両を貸出， BS でバッテリー交換
貸出車両	本田技研工業社製　BENLY e（原付一種） 以降，単に 2 輪 EV と表記
バッテリー交換場所	大阪大学豊中・吹田キャンパス，キャンパス付近のローソン 10 店舗計 12 箇所

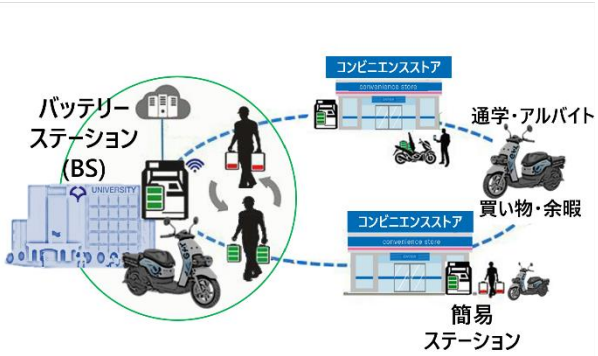


図-1 実験でのバッテリー交換および移動

(2) 実験で収集したデータ

本研究では車両の走行履歴データ，バッテリー交換データおよび実験参加前後での意識・行動に関する情報を

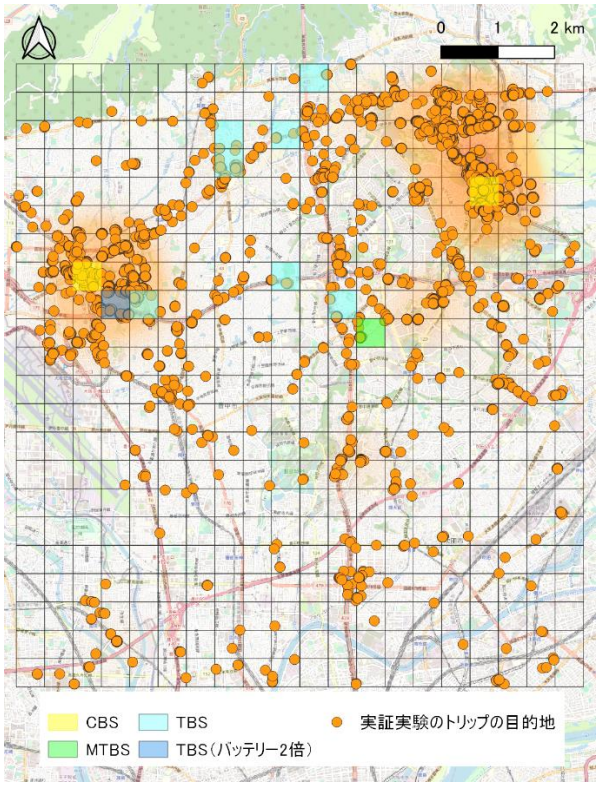


図-2　モデル化対象地域とBS配置

収集した．車両の走行履歴データについて，車両に搭載されたセンサーなどから車両の位置情報及び時刻，車両電源の ON/OFF 情報，搭載されているバッテリーの識別記号であるバッテリーID が得られる．バッテリー交換に要する時間が約 1 分であり，こうした短時間の立ち寄りも考慮するために車両電源が OFF になってから ON になるまでに 1 分以上ある場合を滞在と判定し，その場所を目的地とした．ある目的地から次の目的地までの移動を 1 トリップとし，目的地の位置情報，出発時刻及び到着時刻，トリップの走行距離，使用したバッテリーのバッテリーID を抽出した．また，個人情報保護および倫理的観点からモニターの自宅の町丁目内の車両の位置情報データについては，町丁目内の代表地点に置き換えるという秘匿処理を行った．バッテリー交換データは，交換日時，交換を実施した車両，バッテリーの交換場所，SOC，バッテリーID 等の情報を含んでいる．実験参加前後での意識・行動に関するアンケート調査では，バッテリー交換を行うシチュエーション，利用状況，今後求められるサービス等を尋ねた．

3.　電池利用平準化の効果検証のためのバッテリー消費・交換行動モデル

(1)　実証実験のモデル化

実証実験に基づきバッテリー消費・交換行動をモデル化するにあたり，以下の設定を行った．

モデル化対象地域は，**図-2**に示す大阪府北摂地域の東西方向10km南北方向11kmとした．図中の橙色のマーカーは実証実験のトリップの目的地を示しており，設定した範囲は全目的地の92%をカバーしている．ここに，500m四方のグリッドを配置し，トリップをグリッド間の移動として表現した．

BSの配置について，図の通り実証実験でBSが配置されていたグリッドと同じグリッドに配置することとした．ただし，10箇所のTBSのうち2箇所は非常に近接しているため同じグリッド内に配置された1か所のBSとしてみなし後述するBS内バッテリー個数は2倍とした．また，2つの大学キャンパスの中間部分に位置し，なおかつ対象地域の中心部分に位置するTBSを，特にMTBSと表記し，グリッドを緑色で表現した．車両，バッテリーおよびBSにはIDを付与し，それぞれを追跡できるモデルを構築した．

本モデルにおけるユーザーの移動およびバッテリー消費・交換行動の表現方法を**図-3**のフローチャートを用いて説明する．第一に，実利用データに基づき，ユーザー毎にトリップチェーンを確率的に生成し，移動する車両・出発地・目的地・走行距離のデータを以降のトリップの繰り返し部分のループに与えた．なお，トリップチェーンの生成に関しては第4章で詳述する．

第二に，車両ID，その車両に搭載しているバッテリーのバッテリーID，SOC，およびバッテリー交換を決断するSOC（SOC閾値）が格納された車両・バッテリーデータベース（以降車両・バッテリーDBと表記）から，トリップ開始前の情報を取得した．

第三に，バッテリーを交換しなかった際のトリップ終了時のSOCを式(1)にて算出した．なお，満充電時の航続可能距離は後述する実測値に基づき整数で与える．

$$SOC_{atD} = SOC_{ato} - \frac{Dist}{Dist_{max}} \quad (1)$$

ここで，SOC_{atD}:バッテリー交換を行わずトリップが終了した際のSOC
SOC_{ato}: トリップ開始前のSOC
$Dist_{max}$:満充電航続可能距離,
$Dist$:トリップの走行距離

第四に，トリップ中にバッテリーを行うか否かの判定を行う．バッテリー交換を行う基準となるSOC閾値は，バッテリー交換毎に，実験で得られた交換時のSOCの平均値と標準偏差を持つ正規分布に従う値として，確率的に与えた．SOC_{atD}がSOC閾値を上回る場合，トリップ中にバッテリー交換を行わないこととした．SOC_{atD}がSOC閾値を下回る場合，出発地から最寄りのBSに移動

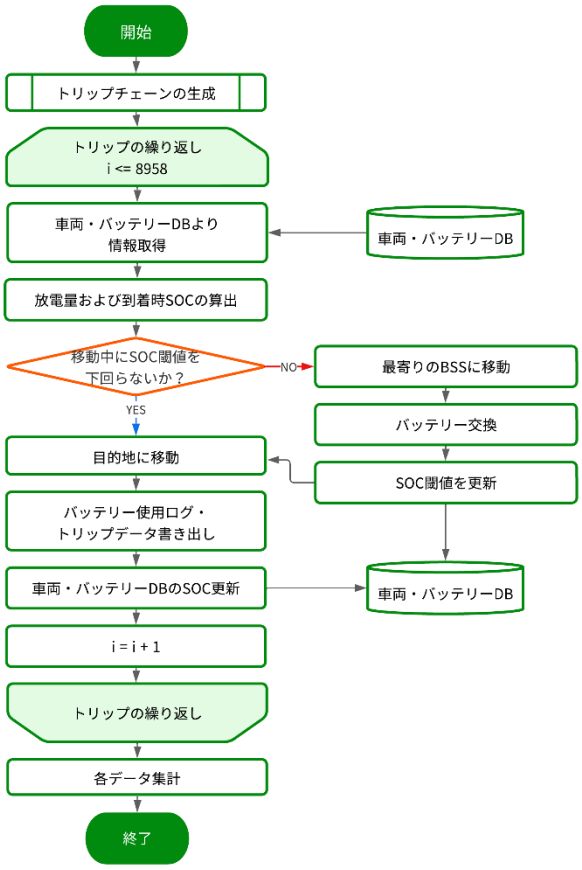


図-3　モデル全体のフローチャート

を行い，バッテリー交換を行った後に，目的地へ移動するようにした．なお，バッテリー交換は，BS中に最も長く待機していたバッテリーから先に交換されるように表現している．ただし，今後の課題でもあるが充電時間は考慮できていないため，タイミングによらず常に満充電のバッテリーが供給されることとなっている．

最後に，トリップ情報としてOD，消費したSOCの値，車載したバッテリーIDを記録するとともに，車両・バッテリーDB中の該当する車両のバッテリーID，SOC, SOC閾値を更新した．ここまでがトリップ・バッテリー交換の一連の流れであり，これを8,958回繰り返し，最終的なアウトプットとしてバッテリーごとの合計放電量，バッテリー交換に伴う損失時間などを集計・算出した．

(2)　モデルの設定条件

モデルでは実証実験の1期と同じく，20名のユニークユーザーがそれぞれ車両を1台保有するとした．実証実験では，1期3か月ごとに一部のユーザーを入れ替え，3期9か月の間に計49人のユニークユーザーが実験に参加したが，本モデルでは後述の通り実験で得られたトリップチェーンデータをプールし，確率的に各ユーザーに割り当てることから，ユーザーのトリップ発生に関わる異質性を考慮していない．また，実験で用いた車両は1台

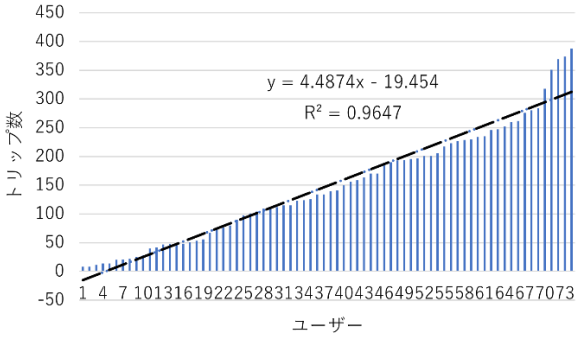


図-4　実証実験のトリップ数分布

につきバッテリー2個を搭載しており，走行に応じ同量の放電がなされ，2個同時に交換を行う．すなわち，実質2つで1つのバッテリーであるという扱いができるが，実験に則り同数のバッテリーであるとしてモデル上で表現した．すなわち車両に搭載されたバッテリーは計40個である．また，実験ではCBSには1か所あたり6個のバッテリーを，TBSには1か所あたり4個のバッテリーを配置し，BS合計で計52個のバッテリーを配置した．つまり全体では合計で92個のバッテリーが用いられており，本モデルにおいてもバッテリー総数は92個とした．

実証実験では3期9か月の間に計8,958のトリップが発生し，本モデルでも同様の総トリップ数とした．実証実験ではユーザー毎のトリップ数が異なっており，1期あたりのトリップ数をトリップ数昇順に並べると三角分布とみなせ，ユーザー番号を順に整数で与えるとトリップ数がユーザー番号の一次関数で表現できることを確認した（**図-4**）．モデルでは20人のユニークユーザーの3期9か月間のトリップを表現するので，総トリップ数を変化させずに，相似な三角分布を仮定した．結果としてトリップ数昇順に1~20で与えられたユーザー番号xを用いて，番号xのユーザーの総トリップ数N_xは以下の式(2)のように表された．

$$N_x = 42.47x + 2.02 \qquad (2)$$

ここで，x:1~20の整数で表されるユーザー番号

上式においては，トリップ数が整数となるように処理している．以上の方法で，ユーザーごとのトリップ発生頻度・総数を表現した．

バッテリー交換の基準となるSOC閾値は，前述の通り実証実験から得られたSOC分布（**図-5**）に基づき，確率的に与えられた．この分布が正規分布であるとみなすと交換時のSOCの平均は46.2(%)，標準偏差は18.0となった．繰り返しになるが，バッテリー交換の都度，この分布に従う値としてSOC閾値を車両に与えた．

満充電航続可能距離についても実証実験で得られたデ

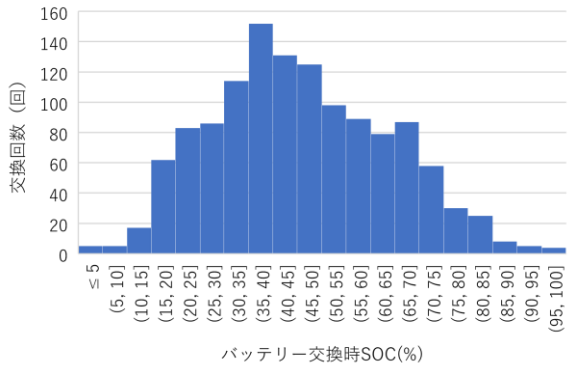


図-5　実証実験のバッテリー交換時SOC分布

ータを元に設定した．実証実験の総走行距離が34,227km，バッテリーの総放電量が67,933%であったことから，これを割った値50.38kmを満充電時（SOCが100%の時）の航続可能距離とした．

(3)　モデルに入力するバッテリー配置・交換およびトリップ生成に関するシナリオ

構築したモデルの各種条件を変化させたシナリオを以下のように設定し，シミュレーションを行った．

a)　バッテリー配置に関するシナリオの設定

このシナリオでは，BSに配置されているバッテリーの個数について検討した．実証実験ではCBS，TBSのそれぞれに均一にバッテリーを配置していたが，新たに4つのバッテリー配置の方針を立て，それに数種類のバリエーションを持たせた計22のバッテリー配置パターンを設定した．

「1. 全BS配置方針」は計2つのパターンを用意し，TBSに配置する個数を2ないし4とし，残りのバッテリーをCBSへ均等に配置することで，すべてのBSにバッテリーを配置した．「2. 大学集中配置方針」はCBSにのみバッテリーを配置する方針である．2つのCBSに均等に配置するパターン，および実験での交換回数にて配置数を案分した2つのパターンを設定した．「3. 一部BSS傾斜配置方針」はBS利用回数の上位数か所のBSを選択し，選択されたBSのみに実験での交換回数にて配置数を案分する方針である．選択するBSの数を変化させ，パターンを8個設定した．「4. 一部BSS均等配置方針」はBS利用回数の上位数か所のBSを選択し，選択されたBSに均等にバッテリーを配置させる方針である．選択するBSの数を変化させ，10個のパターンを設定した．以上のバッテリー配置パターンに対しシミュレーションを実施した．

b)　トリップ発生頻度の分布に関するシナリオの設定

このシナリオでは，ユーザーによって異なるトリップの回数，即ちトリップ発生頻度を変更することを検討した．総トリップ数を変化させず，前述の式(2)の傾きを40,30,20,10,0と変化させた得られたトリップ数N_xを表す以下の式(3)~(7)を5つのトリップ発生頻度シナリオとして設定した．

$$N_x = 40x + 27.90 \quad (3)$$
$$N_x = 30x + 132.90 \quad (4)$$
$$N_x = 20x + 237.90 \quad (5)$$
$$N_x = 10x + 342.90 \quad (6)$$
$$N_x = 447.90 \quad (7)$$

ここで，x:1~20のユーザー番号（整数）

ただしトリップ数が整数となるよう処理している．**表-2**に1次近似の式の傾きを変化させた場合のユーザー毎のトリップ数を示す．この値を用いてシミュレーションを実行した．

c)　バッテリー交換に関するシナリオの設定

このシナリオでは，バッテリー交換の基準となる閾値であるSOC閾値を変化させた場合の影響について検討した．ここでは，SOC閾値を全ユーザーに共通する定数すなわち一様分布として与えた．本シナリオではSOC閾値が28,36,48,58,66 (%)の5通りの場合で分析を行った．加えて，ユーザー毎に個別にSOC閾値を設定した場合も検討した．この場合は20名のユーザーに対しSOC閾値を28(%)から66(%)まで2%刻みで変化させ，シミュレーションを実行した．この設定によりこまめにバッテリー交換を行うユーザーと残量が残り少なくなるまでバッテリー交換を行わないユーザーの効用を比較することが出来る．

表-2　1次近似の式の傾きとトリップ数

ユーザー番号x	1次近似の式の傾き				
	40	30	20	10	0
1	68	163	258	353	448
2	108	193	278	363	448
3	148	223	298	373	448
4	188	253	318	383	448
5	228	283	338	393	448
6	268	313	358	403	448
7	308	343	378	413	448
8	348	373	398	423	448
9	388	403	418	433	448
10	428	433	438	443	448
11	468	463	458	453	448
12	508	493	478	463	448
13	548	523	498	473	448
14	588	553	518	483	448
15	628	583	538	493	448
16	668	613	558	503	448
17	708	643	578	513	448
18	748	673	598	523	448
19	787	702	617	532	447
20	827	732	637	542	447
合計	8,958	8,958	8,958	8,958	8,958

ただし，この場合はユーザーのトリップ発生頻度は均一になるよう設定した.

(4) 平準化効果の検証のためのモデルのアウトプット

モデルの重要なアウトプットとして，バッテリー関連の指標と移動関連の指標を設定した.

まず，バッテリーの利用状況を示す数値としてサイクル数を算出した．サイクル数はバッテリーのSOCを100%の状態から0%に完全放電し，さらに充電により再び100%の状態にする操作を1とカウントする数値と定義され，放電量を基準に計算される．本研究においてもバッテリー毎の総放電量(%)を算出し，その値を100で割ることによってサイクル数を算出した．モデルのアウトプットとしてはバッテリー毎にサイクル数を算出し，その中の最大値，最小値，データの範囲（最大値-最小値の値．以降単にデータ範囲と示す）及び標準偏差の値を使用した．データ範囲が小さいほど，また標準偏差の値が小さいほどバッテリー利用状況のばらつきが小さいため平準化されているということができる.

移動関連の指標として，ユーザーの活動と移動に関わる効用を用いることとし，バッテリー交換作業を考慮した効用Uを次式のように定義する.

$$U = U(A, T_m, T_C) = A - \beta_m T_m - \beta_c T_C \quad (8)$$

ここで，A:一定期間中の訪問地（目的地）での活動量
T_m:目的地間の移動の総所要時間
T_C: バッテリー交換のための移動及び作業時間．ここでは，BSへの立ち寄りに要する時間T_{toBS}とバッテリー交換に要する時間T_{swap}の和（$T_C = T_{toBS} + T_{swap}$）として表す.
β_m, β_c :上記の2つの時間に係わるパラメータ

本モデルにおいては，トリップチェーンをモデルのインプットとして確率的・外生的に与えているためA及びT_mは定数である．一方，T_Cについてはシナリオの条件を変化させることによって変化する変数であり，モデルのアウトプットとして得ることができる．T_CのうちT_{toBS}は以下の式(9)を用いて算出し，T_{swap}は実証実験の結果より1分とした.

$$T_{toBS} = \frac{Dist_{OtoBS} + Dist_{BStoD} - Dist_{OD}}{V} \quad (9)$$

ここで，$Dist_{OtoBS}$:出発地からBSまでのグリッド距離
$Dist_{BStoD}$:BSから目的地までのグリッド距離
$Dist_{OD}$:出発地から目的地までのグリッド距離
（ただしグリッド距離はグリッド上でのx方向距離とy方向距離の和を指す）
V:車両速度
（実証実験の結果より分速300mとした）

さらに，1回のバッテリー交換毎に算出されるT_Cを損失時間とした．この損失時間が短いほどユーザーのバッテリー交換に対する利便性が高いと解釈できる．以上の点より損失時間を負の効用に影響を与える要素とし，シナリオの分析時に算出した.

4. バッテリー消費・交換行動モデルに対し外生的に与えるトリップチェーンデータの生成

(1) トリップチェーンの考え方

一般的にトリップチェーンは複数の連続して行われるトリップのことを指している．実証実験での2輪EVは公共交通機関と比較して自由度の高い移動を提供でき，複数目的地への回遊・立寄り行動を誘発すると考えられる．さらにバッテリー交換型モビリティはBSでのバッテリー交換が必須であり，日々の移動の中にバッテリー交換を目的としたBSへの移動が組み込まれるものと考えられる．そこで本研究ではトリップチェーンの途中にBSを目的地として組み込んでいる．このようにトリップチェーンにバッテリー交換を含むモデルは過去の研究には無く，新規性があるといえる.

ただしモデルで用いているトリップ数について，ある特定の期間に行われたトリップ数を意味するものではない点に留意が必要である．つまり，トリップ数は時間的な尺度ではなく単純にトリップが行われた回数を意味している.

(2) トリップチェーンのODの与え方

トリップチェーンは実証実験の結果に基づき，典型的なトリップパターンを外生的・確率的に与えた.

まずユーザー毎のトリップ数N_xを式(2)もしくは式(3)~(7)によって算出した．次に，実証実験グリッド間移動確率は，実証実験の全トリップのうちモデル化対象地域内で観測されたものをグリッド間の移動に変換しOD表として整理した．これを出発グリッドごとに目的地のトリップ割合を算出し，これをグリッド間の移動確率（以降単に移動確率と表記する）とした．各ユーザーのトリップチェーンの始点は大学キャンパスとし，与えられたトリップの数だけ，移動確率に基づき連続的にトリップを生成し，これをトリップチェーンとした．なお，終着点の制約は設けない．この時，移動はグリッド間の移動として扱われるが，その際の実際の走行距離はグリ

ッドの重心間の距離とは大きく乖離があった．そこで，実験のトリップデータからグリッドの重心間距離と実際の走行距離の組をデータベース化し，グリッドの重心間距離に対応する走行距離のリストの中からランダムに一つをモデルで扱う走行距離として割り当てた．

最後に，移動するユーザーの順番を決定した．以上の方法で移動するユーザー・出発地・目的地・走行距離からなるトリップデータ及びトリップの連続であるトリップチェーンデータを生成した．

5. モデル分析の結果

(1) 構築したモデルの再現性の確認

本節では作成したモデルによる結果と実証実験から得られた結果を比較し，モデルの再現性について確認する．実験を再現したモデルの全ユーザーの総走行距離は33,402kmとなり，実証実験の総走行距離(34,227km)の相対誤差5%の範囲内に収まることを確認した．また1トリップの走行距離分布についても**図-6**の通り変化の傾向が概ね一致していることが読み取れる．バッテリーに関するデータでは，総バッテリー交換回数は1267回・総放電量は64,709%であり，実証実験の交換回数(1,248回)及び総放電量(67,933%)の相対誤差5%の範囲内に収まっていることを確認した．またバッテリー毎のサイクル数の分布は**図-7**の箱ひげ図の通り，最大値・最小値等のデータは**表-3**の通りとなり，おおむね実証実験と合致していることを確認した．サイクル数の最大値が実証実験の値よりも平均値に近い値となっている．これは，実際には満充電航続距離が気温やトリップ中の経路の高低差，走行速度やブレーキ回数等の影響により定まった値にならないが，本モデルでは一律な値として与えている点に起因すると考えられる．実証実験・本モデル結果のBS毎のバッテリー交換回数について示した円グラフを付録の**図-A**および**図-B**に示す．CBS1の交換回数が1番多い点，CBS2・TBS1が占める割合は合致しているが，交換回数が異なるBSも見られる．これはユーザーの大学をはじめとする目的地での滞在時間や道路環境に起因するBSへの立ち寄りやすさ等を考慮していないことに起因すると考えられる．

(2) バッテリー配置による電池利用の平準化への影響

第1節では実証実験と同様のバッテリー配置でシミュレーションを実行し，BS毎のバッテリー交換回数を算出した．この交換回数をもとに，BS毎のバッテリー配置個数に関するパターンを**表-4**のように設定した．行ごとに配置パターン名とBSに配置するバッテリー個数を示した．ただし配置パターン名について「配置方針の番号-配置方針に属する通し番号」の形式で表記した．また表の空所の部分はバッテリーを配置しないことを意味する．ここで，パターン1-1は実証実験と同じバッテリー配置パターンである．

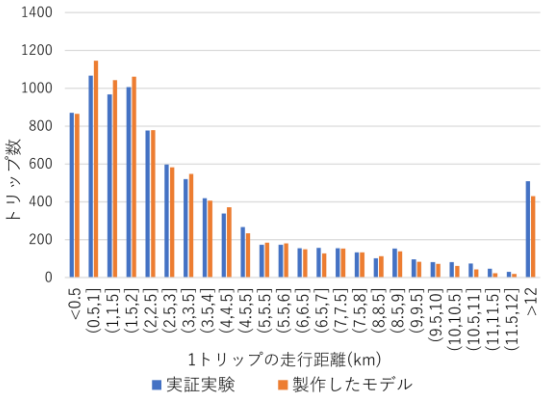


図-6 トリップの走行距離分布

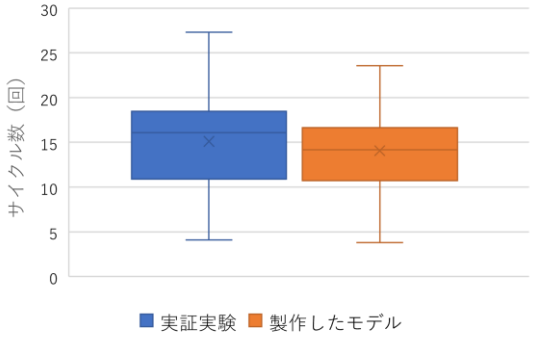


図-7 サイクル数の分布比較

表-3 サイクル数に関するデータの比較

	最大値 (回)	最小値 (回)	データ範囲 (回)	標準偏差
実証実験	27.3	4.11	23.19	5.04
製作したモデル	23.6	3.78	19.79	3.93

すべてのバッテリー配置パターンに対してシミュレーションを行い，サイクル数の最大値，最小値，データ範囲，標準偏差を算出した．また全トリップ・全ユーザーの損失時間を合計した合計損失時間も合わせて算出し，**表-5**に示した．加えて，横軸にバッテリー配置パターンをとり，棒グラフでサイクル数の標準偏差を，折れ線グラフで合計損失時間を表したグラフを**図-8**とする．

「1. 全BS配置方針」はサイクル数の標準偏差が大きく平準化されていない一方で，合計損失時間が短い傾向が読み取れる．バッテリーを全てのBSに配置したことでバッテリー交換回数の少ないBSが生じ，バッテリーが滞留したことがバッテリー利用状況に偏りを生じさせた原因であると考えられる．一方でBSの数が多いためユーザーがBSに移動する距離が短くなり，合計損失時間が短くなったと考えられる．

表-4　バッテリー配置パターン

	CBS1	MTBS	CBS2	TBS1	TBS2	TBS3	TBS4	TBS5	TBS6	TBS7	TBS8
1-1	6	4	6	4	4	4	8	4	4	4	4
1-2	16	2	16	2	2	2	4	2	2	2	2
2-1	26		26								
2-2	40		12								
3-1	38	14									
3-2	30	12	10								
3-3	26	10	10	6							
3-4	26	10	8	6	2						
3-5	24	10	8	6	2	2					
3-6	24	8	8	6	2	2	2				
3-7	22	8	8	6	2	2	2	2			
3-8	22	8	6	6	2	2	2	2	2		
4-1	26	26									
4-2	18	18	16								
4-3	14	14	12	12							
4-4	12	10	10	10	10						
4-5	10	10	8	8	8	8					
4-6	8	8	8	8	8	6	6				
4-7	8	8	6	6	6	6	6	6			
4-8	6	6	6	6	6	6	6	6	4		
4-9	6	6	6	6	6	6	4	4	4	4	
4-10	6	6	6	6	4	4	4	4	4	4	4

表-5　バッテリー配置パターン毎のシミュレーション結果

	サイクル数				合計損失時間（分）
	最大値（回）	最小値（回）	データ範囲（回）	標準偏差	
1-1	20.95	4.69	16.27	3.46	5392
1-2	18.46	7.94	10.52	2.25	5513
2-1	18.44	9.26	9.19	1.76	9231
2-2	17.70	9.59	8.11	1.79	8962
3-1	20.91	10.21	10.70	2.20	11452
3-2	17.63	11.31	6.32	1.64	7218
3-3	17.72	10.25	7.47	1.73	6771
3-4	17.33	10.24	7.10	1.63	6368
3-5	18.43	8.30	10.13	2.00	6357
3-6	17.23	10.23	7.00	1.62	6526
3-7	17.88	8.83	9.06	1.93	5888
3-8	18.82	10.44	8.37	1.61	5781
4-1	18.17	11.17	7.00	1.94	11846
4-2	17.44	10.34	7.10	1.52	7492
4-3	17.28	9.02	8.26	1.75	6563
4-4	18.17	10.47	7.70	1.77	6641
4-5	18.27	8.77	9.51	2.18	6360
4-6	19.23	9.07	10.16	2.14	6243
4-7	20.35	8.34	12.01	2.72	5409
4-8	19.22	9.87	9.35	2.41	5613
4-9	20.96	7.97	12.99	2.70	5211
4-10	19.41	1.33	18.08	3.66	5708

「2. 大学集中配置方針」はサイクル数の標準偏差が小さく平準化がなされている一方で合計損失時間が比較的大きくなっている．CBSのみにバッテリーを集中して配置したことによりBS1か所あたりのバッテリー交換回数が増加し，バッテリーが極端に長い期間BSに待機した状況が発生しにくかったことがバッテリー利用状況を平準化させた要因であると考えられる．対してBSの数が少ないためBSへの移動距離が増大し，合計損失時間が長くなったと考えられる．

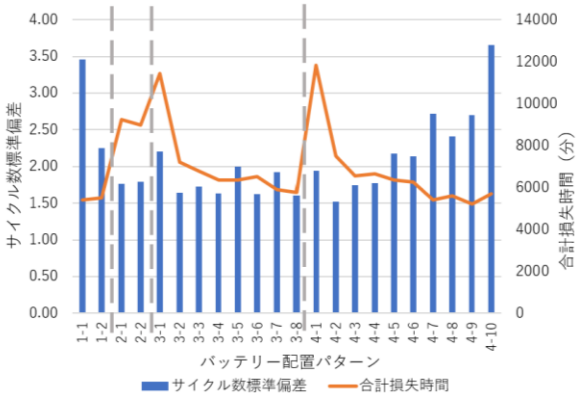


図-8　バッテリー配置パターンによる結果

「3. 一部BSS傾斜配置方針」「4. 一部BSS均等配置方針」に共通してみられる傾向としてBSの数が増加するほど合計損失時間が小さくなる傾向が読み取れる．一方でサイクル数の標準偏差について，「4. 一部BSS均等配置方針」はBSの数が増加するほどサイクル数の標準偏差も増大するのに対し「3. 一部BSS傾斜配置方針」はあまり増大しない傾向にある．この結果から需要の少ないBSに必要以上の個数のバッテリーを配置するとバッテリーが滞留しバッテリーの使用状況に偏りが生じるが，BSの需要に合わせて配置するバッテリーの個数を変化させることによって滞留を防ぎ，バッテリー利用状況を平準化させることができると考えられる．

以上の結果より，合計損失時間はユーザーにとって負の効用であるため，バッテリー利用状況の平準化とユーザーの移動に関する効用は一般的にトレードオフの関係にある．ただし，BS利用頻度に応じた適切なバッテリー配置によってトレードオフの関係の緩和が期待できることが考察された．

(3)　トリップ発生頻度による電池利用の平準化への影響

トリップ発生頻度を変更した場合のシミュレーションを実行し，サイクル数の最大値，最小値，データ範囲，標準偏差を算出し，**表-6**に示した．結果より，1次近似式の傾きが40から30の間ではサイクル数のデータ範囲・標準偏差ともに減少している．しかし，傾きが30より小さい場合のサイクル数のデータ範囲の減少量は小さくなっており，標準偏差はほぼ横ばいとなっている．これらの結果からトリップの発生頻度の偏りが大きい場合，バ

表-6　1次近似の傾き毎のサイクル数に関する結果

傾き	最大値(回)	最小値(回)	データ範囲(回)	標準偏差
40	20.52	6.03	14.49	3.29
30	19.75	8.00	11.74	2.65
20	18.83	7.74	11.09	2.75
10	18.87	7.40	11.47	2.51
0	18.94	7.93	11.01	2.49

表-7　SOC閾値毎のシミュレーション結果

SOC閾値(%)	サイクル数				合計損失時間(分)
	最大値(回)	最小値(回)	データ範囲(回)	標準偏差	
28	22.45	1.38	21.08	4.23	4005
36	19.19	4.67	14.52	3.40	4363
48	20.50	6.70	13.80	3.27	5706
58	20.42	8.36	12.06	2.82	7592
66	18.49	10.11	8.38	2.15	9279

ッテリーの利用状況に偏りが生じることが考察される．また実証実験の1次近似式の傾きは42であり，本シナリオで扱った傾きよりも大きい値であるためトリップ発生頻度の偏りがバッテリーの利用状況を偏らせていたものと考えられる．

(4)　バッテリー交換時のSOC閾値による影響

SOC閾値を28,36,48,58,66 (%)と5通りで設定し，ユーザーに対して一律に与えた場合のシミュレーションを実施し，サイクル数の最大値，最小値，データ範囲，標準偏差を算出した．また全トリップ・全ユーザーの損失時間を合計した合計損失時間も合わせて算出し，**表-7**に示した．また横軸にSOC閾値を，棒グラフでサイクル数の標準偏差を，折れ線グラフで合計損失時間を表したグラフを**図-9**とする．結果としてバッテリー交換時のSOC閾値が大きいほどサイクル数の標準偏差が小さくなる一方で合計損失時間が増大した．即ち，こまめにバッテリー交換を行うことによってバッテリーの利用状況を平準化することができるが，同時にBSでのバッテリー交換回数が増加するためユーザーに負の効用をもたらすことが考察された．ここで，BSを街中の様々な施設等に配置し，BSを目的地化するなどの方法によってユーザーのバッテリー交換にインセンティブを付与することが出来る．こうしてユーザーの移動に関する負の効用を小さくし，こまめなバッテリー交換を奨励することがバッテリーの使用状況を平準化させることに繋がると考えられる．

またユーザー毎に個別にSOC閾値を設定した場合のシミュレーションも実施した．**図-10**は横軸をユーザーに固有なSOC閾値，縦軸をユーザー毎の損失時間の合計とした散布図であり，SOC閾値と損失時間の関係をユーザー単位で表している．図中の回帰直線はデータの1次近似であり，分布が右肩上がりであることが読み取れる．即ちユーザー間におけるSOC閾値の違いによってもユーザーの移動に関する効用に差が生じ，こまめにバッテリー交換を行う傾向があるユーザーほど効用は小さくなることが明らかとなった．

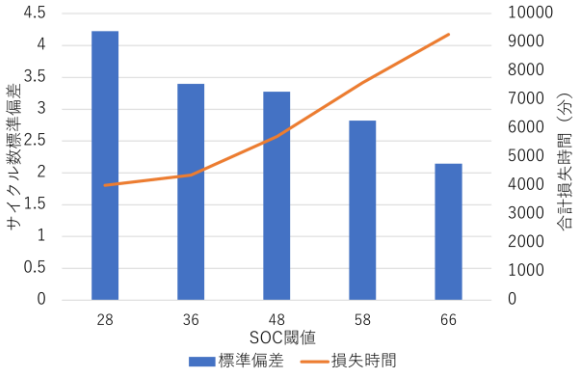


図-9　一律設定されたSOC閾値毎のシミュレーション結果

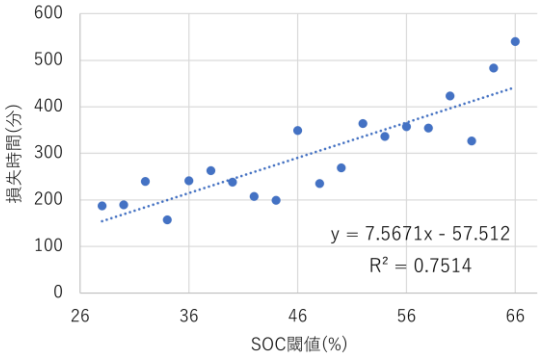


図-10　ユーザー単位のSOC閾値と損失時間の関係

6.　結論

本研究ではバッテリー交換型2輪EVを用いた実証実験で得られたデータを元に，小型電動モビリティのバッテリーシェアリングのモデルを構築し，電池利用の平準化という観点から考察を行った．

まずモデル化対象地域・BSの配置を設定したのち，移動によるバッテリー消費とバッテリー交換の両方を記述するバッテリー消費・交換行動モデルを構築した．このモデルの構築にあたって，車両数・バッテリー数等の基本条件に加え，トリップ発生頻度・SOC閾値・最大航続距離の決定の際に実証実験で得られたデータを用いた．またモデルで用いるトリップチェーンについても実証実験で得られた移動データを元に確率的に生成した．

次に構築したモデルのアウトプットを実証実験のもの

と比較することにより，モデルの再現性を確認した．このモデルを使用しシナリオを立てシミュレーションを実施したところ，バッテリーの利用状況を平準化することとユーザーの移動に関する効用の間には一般的にトレードオフの関係が存在することが明らかとなった．またこのトレードオフを緩和する方法としてバッテリー配置をBSの需要に合わせることが有効であると明らかになった．また，ユーザーの移動に関する負の効用を小さくしこまめなバッテリー交換を奨励するために，BSを目的地化するなどの手法によりバッテリー交換に対しインセンティブを付与する仕組みが重要であると示唆された．

一方，本研究で構築したモデルで用いたトリップ数は時間的な尺度ではなく単純な回数である．時間的な尺度を取り入れることによってバッテリーの充電にかかる時間や時刻によるトリップの発生量の変化などを分析し，街中におけるBSの最適配置について考察することが今後の課題である．

謝辞：本研究はJSPS科研費22K14338の助成を受けたものである．本研究で用いたデータは，バッテリー交換型2輪EV実証実験「eやんOSAKA」の下で収集された．本実験の実施者である（一社）日本自動車工業会，大阪府へ謝意を表する．また，本研究は東京大学CSIS共同研究(No.1056)による成果である．

付録　BS 別バッテリー交換回数

モデルの再現性の検証に用いたBS別バッテリー交換回数を以下に示す．

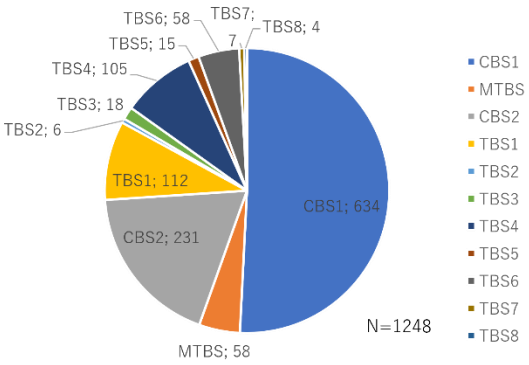


図-A　実証実験のBS別バッテリー交換回数（回）

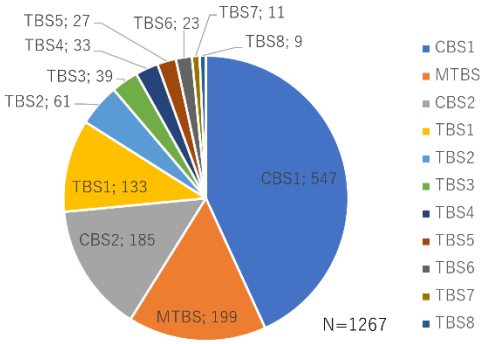


図-B　本モデル結果のBS別バッテリー交換回数（回）

REFERENCES

1) 外務省　JAPAN SDGs Action Platform，https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/statistics/goal12.html（アクセス：2022 年 10 月 13 日）
2) 鳶島真一：次世代自動車用　リチウムイオン電池の設計法，科学技術出版株式会社，2013
3) ENEOS バッテリー循環社会実現に向けた協業開始について～BaaS プラットフォームの構築～，https://www.hd.eneos.co.jp/news-release/20210519_01_01_2011378.pdf（アクセス：2022 年 10 月 13 日）
4) 中国 EV で進行する「車体と電池の分離」　電池交換式は EV の流れを変えるか，https://media.dglab.com/2022/03/01-ev-battery-01/（アクセス：2022 年 10 月 13 日）
5) M. Ban, J. Yu, Z. Li, D. Guo and J. Ge: Battery Swapping: An aggressive approach to transportation electrification, *IEEE Electrification Magazine. vol.7, no.3, pp. 44-54*, 2019
6) H. Wu: A Survey of Battery Swapping Stations for Electric Vehicles: Operation Modes and Decision Scenarios, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 23, no. 8, pp. 10163-10185*, 2022
7) Wu Y, Zhuge S, Han G, Xie W.: Economics of Battery Swapping for Electric Vehicles—Simulation-Based Analysis, *Energies,15(5):1714*, 2022
8) Liu Z, Ma X, Liu X, Correia GHdA, Shi R, Shang W.: Optimizing Electric Taxi Battery Swapping Stations Featuring Modular Battery Swapping: A Data-Driven Approach. *Applied Sciences,13(3):1984*, 2023
9) S. Wang, C. Shao, C. Zhuge, M. Sun, P. Wang, and X. Yang.: Deploying Battery Swap Stations for Electric Freight Vehicles Based on Trajectory Data Analysis, *IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 3, pp. 3782-3800*, 2022
10) Hof. J, Schneider. M and Goeke. D: Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an AVNS algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops. *Transportation Research Part B: Methodological. 97. 102-112.* 2017
11) M. O. Tarar, N. U. Hassan, I. H. Naqvi and M. Pecht, Techno-Economic Framework for Electric Vehicle Battery Swapping Stations, *IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 9, no. 3, pp. 4458-4473*, 2023
12) Alejandro. U, Mauricio. F, Jhon. V, Gilberto. O, Alejandro. M: Discrete event simulation for battery-swapping station

sizing for hybrid and electric motorcycles, *Journal of Cleaner Production, Volume 390, 136155*, 2023
13) 山本高広, 天辰公史郎, 住吉大輔：シミュレーションによる2世帯での燃料電池共有効果の推計　集合住宅における家庭用燃料電池の効率的な運用に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 83巻746号, 2018

A STUDY ON BATTERY LOAD LEVELING BY BATTERY SHARING FOR SMALL ELECTRIC VEHICLES

Shotaro HIROKAWA, Kento YOH, Chun-Chen CHOU and Kenji DOI

Battery sharing, in which the batteries of small electric vehicles are shared and can be swapped for fully charged ones at battery stations around town, is attracting attention. In addition, it is becoming increasingly important to collectively level battery load from the viewpoint of battery management and energy saving. In this study, we constructed a battery consumption and swap behavior model based on data acquired from a demonstration experiment of a battery-swappable electric two-wheeled vehicle. Furthermore, the study clarified the influence of battery allocations among swap stations and differences in battery use on load leveling and monitor's utility.