

エネルギーライフログDBを活用した負荷平準化のための 局所的エネルギーバランスに関するデータマネジメント

渡辺 隆史[†] 深野 巧也[†] 小池 風樹[†] 石田 卓也[†] 飯田 淳子^{††}

本藤 祐樹^{†††} 富井 尚志^{†††}

[†] 横浜国立大学大学院環境情報学府情報環境専攻 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

^{††} 横浜国立大学理工学部数物・電子情報系学科 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

^{†††} 横浜国立大学大学院環境情報研究院 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

E-mail: †{watanabe-takashi-rz,fukano-takuya-jh,koike-fuki-dn,ishida-takuya-ry,iida-junko-kg}@ynu.jp,
††{hondo,tommy}@ynu.ac.jp

あらまし 我々は先行研究で、エネルギー使用に関するライフログ（エネルギーライフログ）に対して情報検索ができるデータベースシステムであるエネルギーライフログDB（ELLDB）を構築し、その活用事例を積み上げてきた。本研究では、ELLDBを活用して小規模な電力消費単位（ナノセル）内を流れる電力の供給元とその用途の対応関係をシミュレーションし、ナノセルごとに負荷平準化できることを示す。ナノセルには再生可能エネルギーの発電設備と必要な時に充給電ができるバッテリーがあることを想定する。その場所固有のエネルギーライフログを活用したシミュレーションの結果より、EV1台程度のバッテリー容量でナノセルの負荷平準化ができることを示した。

キーワード サイバーフィジカルシステム、ライフログデータベース、エネルギーライフログ、スマートグリッド、負荷平準化、バッテリー、電気自動車、VGI

1 はじめに

センサ技術やストレージ技術の発達により、実世界の膨大かつ多様なデータ（ビッグデータ）を取得・蓄積することが可能になった [1]。中でもスマートフォンなどのスマートデバイスやIoT（Internet of Things）の普及により、ヒトの生活に関する記録である「ライフログ」が容易に利用できるようになった。また、地方公共団体などによるオープンデータ化が進み、気象データなどの場所固有の様々なデータが利用できるようになった。このような状況下で、経済産業省は『新産業構造ビジョン』をとりまとめ、リアルデータを利活用するためのプラットフォーム構築の重要性を述べている [2]。しかし、ライフログやオープンデータは多量でかつ多様であるという性質からその扱いが難しく、その管理方法や応用先が模索されている。ライフログやオープンデータの重要な応用先の一つとして、持続可能な社会の実現が挙げられる [1]。その中でも、持続可能なエネルギー利用のためにビッグデータを活用する研究が数多く行われている。

近年のエネルギー問題として、温室効果ガスの一つであるCO₂排出を抑えつつ、効率的にエネルギーを利用していくことが求められている [3]。その方法の一つに、化石燃料由来の消費電力量を削減するために再生可能エネルギーによる発電電力を導入することが挙げられる。再生可能エネルギーは気象や季節に依存し発電電力が不安定なため、需要電力に一致させること（需給マッチング）が難しい。そこで、消費しきれずに余ってしまった発電電力（発電余剰電力）をバッテリーに充電し、発電

が少ない時間帯に給電することで（電力の時間移動）、不安定な再生可能エネルギーを有効利用することができる。さらに、今後の普及が期待される電気自動車（EV: Electric Vehicle）をバッテリーとして活用することもできる。バッテリーを搭載したEVは非走行時に電力系統との間で電力の融通を行うこと（VGI: Vehicle Grid Integration）ができ、EVが移動することで電力の空間移動も行われる。そのため、再生可能エネルギーやEVバッテリーを導入したスマートグリッドに関する研究や実証実験が数多く行われている [4]。しかし、電力消費や再生可能エネルギーの発電電力、EVの利用形態はその場所や人により異なるので、画一的な方法で全体最適化をすることが困難である。

この問題に対して我々は、エネルギー使用に関するライフログ（エネルギーライフログ）を用いることで、場所ごとにエネルギー利用を効率化することを目指す。未来のスマートグリッド環境では、大規模ビルや工場などの電力消費単位ごとにエネルギーの管理をすることを想定し、そのようなスマートグリッドの構成要素をマイクログリッドと呼ぶことにする。我々は先行研究で、マイクログリッドにおけるエネルギー利用をシミュレーションするために、エネルギーライフログやオープンデータに対して情報検索ができるデータベースシステムであるエネルギーライフログDB（ELLDB: Energy Life-Log DataBase）を構築した [5]。ELLDBを用いることで、再生可能エネルギーやEVの導入量に応じたスマートグリッドのシミュレーションをし、発電余剰電力量の削減量やピークカットのために必要なバッテリーの空き容量について評価できるようになった。しかし、再生可能エネルギーの導入が進むと、再生可能エネルギー

による発電電力の時間変動により非再生可能エネルギー由来の需要電力に急激な時間変動を引き起こしてしまうダックカーブ現象という問題が生じることが懸念されている [6]。ダックカーブ現象はピークカットでは抑制することができないため、期間全体において電力需要の時間変動を縮小させる負荷平準化を行う必要がある。

そこで本研究では、オフィス 1 部屋・再生可能エネルギーの発電設備・必要な時に充電ができるバッテリーから構成される電力消費の最小単位を想定する。このようなマイクログリッドの構成要素を、消費電力がマイクログリッドの千分の一程度であると想定することから、ナノセルと呼ぶことにする。その上で、非再生可能エネルギー由来の需要電力の時間変動を抑えるために、ナノセルの外部から供給される電力（外部電力）の時間変動を抑えて負荷平準化させる。ナノセルごとに負荷平準化を行うことは、行動パターンが類似しやすい都市部において大規模な電力網の負荷平準化にもつながると考えられるために有効である可能性がある。

本稿では、ELLDB を活用してナノセル内を流れる電力の供給元とその用途の対応関係に関するシミュレーションを行い、バッテリーの充電によりナノセルごとに負荷平準化できることを示す。ナノセル内のバッテリーは据え置きバッテリーと EV バッテリーから成ることを想定し、負荷平準化を行うために十分な容量があるバッテリー集合（バッテリープール）とする。なお、EV が他のナノセルとの間で移動することで、ナノセル内のバッテリープールの容量やバッテリープール内に蓄電されている電力量が変化することを想定するが、具体的なバッテリー容量を決める問題は本論文の対象外とする。

2 関連研究

再生可能エネルギーと蓄電池を組み合わせたスマートグリッドに関する研究は現在盛んに行われている [7]。Sintov ら [8] は、スマートグリッドに行動科学の知見を導入し、スマートグリッドの導入の促進や、運用の効率化を図った。Simm ら [9] は再生可能エネルギーの発電電力と需要電力を同期させることを目的に、ユーザの電力消費意識を改善させるシステムを提案し、電力系統が独立した島で実証実験を行った。日本国内の研究に目を向けると、馬場ら [10] は家庭内の IoT 化された電化製品を中央制御することで発電電力量を有効活用する手法を提案し、発電余剰電力量を約 10.4% 緩和可能であることをシミュレーションから示した。横浜市・豊田市・けいはんな・北九州市の 4 都市 [11] では、産官学が一体となってスマートシティに関する評価実験を行った。また岡山県立大学 [12] では、電力変換を極力減らした「スマート PV & EV システム」を提案し、EV を使用したことによる CO₂ の削減効果をシミュレーションで確認した。

様々なエネルギー貯蔵システムが存在する中、省エネルギー実現の媒体として EV が注目されており、EV を活用したエネルギー分野への取り組みがなされている。EV は空間的、時間的に移動するバッテリーとしての役割を生かし、非走行時に

バッテリーに充電した電力をグリッドに提供することができる。V2G の導入効果の検討として Kempton ら [13] は、V2G をアメリカの電力市場に投入した際にどの程度の効果と利益が得られるのかの検証を行った。Jansen ら [14] は複数の EV 群を 1 つの仮想的な発電所としてみなす EV-VPP を提案し、V2G を投入した際に V2G が果たす役割について論じた。これらを根拠として V2G 技術を活用した様々な研究が行われている。Brush ら [15] は、社会的に電力削減要求の高いピーク時間に、15 家庭分の実車 EV を用いてピークシフトをした時の経済効果のシミュレーションを行い、月平均 \$13.58 の電気代が節約可能であることを示した。Ito ら [16] は、家庭内消費電力の予測に基づく EV の充放電計画の提案を行い、スマートグリッドを模した環境を構築し実験を行った。Kikusato ら [17] は、家庭のコストの最小化を目的に、PV の出力抑制を考慮に入れた EV の充放電計画を提案し、実データによるシミュレーションを行った。Lam ら [18] は EV を用いることで地方の大規模な風力発電所の余剰電力を都市部へ電力移動させる手法を提案し、シミュレーションから実現可能であることを示した。Huang ら [19] は、風力発電の発電電力を EV に充電するロバスタなスケジューリングアルゴリズムを提案し、実データによるシミュレーションを行った。このように、スマートグリッドにおける EV を用いた V2G は多く研究されているものの、実車の EV を用いた実験による評価を含む研究はされていない。

電力系統の安定化や、高いエネルギー効率の維持のためには負荷平準化は重要な課題である。Hong ら [20] は、電力の負荷平準化を目的に、グリッド内の電化製品の使用時間の計画を立てるシミュレーションを行った。Xu ら [21] は、異なるタイプの建物を組み合わせてエネルギーの負荷平準化を達成するためのシミュレーションが行えるシステムを提案した。Karfopoulos ら [22] は、個々の EV が充電の料金の最小化を行うことで、負荷平準化が達成されることをシミュレーションにより示した。このように、電力の負荷平準化の手法については研究されているものの、それらの実現可能性についての評価や議論は充分ではない。

3 負荷平準化の定式化

3.1 問題設定

外部電力と負荷平準化直線の差分に合わせてバッテリーの充電を行うことにより、ナノセル内の消費電力を変えずに負荷平準化を達成することができると考えられる。しかし、ナノセルごとに消費電力の傾向は異なり、現実のバッテリーの容量には限界がある。そのため、ナノセル固有のライフログを用いて実現可能性を定量的に評価する必要がある。本稿では、ELLDB を活用したシミュレーションを行うことで、次の二点を示す。

- バッテリーだけでナノセルの外部電力の負荷平準化ができるのか。
- ナノセルの負荷平準化のためにはどのくらいのバッテリー容量が必要なのか。

本章では、3.2 節でナノセル内を流れる電力を定式化し、3.3

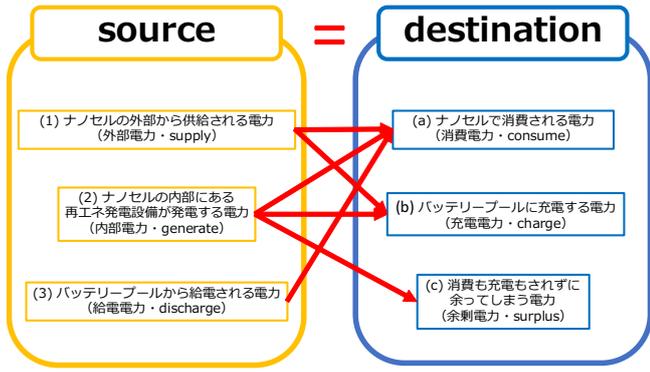


図1 ナノセル内を流れる電力のエネルギーフローモデル

節で負荷平準化直線を定義した上で、3.4節で負荷平準化のためのバッテリー充電電アルゴリズムを示す。

3.2 ナノセル内のエネルギーフローモデル

ナノセル内を流れる電力の供給元 (source) とその用途 (destination) の概念図を図1に示す。供給元は(1)~(3)の3つに、用途は(a)~(c)の3つにそれぞれ分類することができる。

- 電力の供給元 (source) についての分類

- ナノセルの外部から供給される電力 (外部電力)
- ナノセルの内部にある再生可能エネルギーの発電設備が発電する電力 (内部電力)
- バッテリープールから給電される電力 (給電電力)

- 電力の用途 (destination) についての分類

- ナノセルで消費される電力 (消費電力)
- バッテリープールに充電する電力 (充電電力)
- 消費も充電もされずに余ってしまう電力 (余剰電力)

各供給元からの電力は必ずいずれかの用途に割り当てられるものとし、図1の赤色の矢印で示される6通りの電力の供給元と用途の対応関係 (エネルギーフロー) を定義する。このとき、タイムスロットごとの各エネルギーフローは e を、対象期間全体の各エネルギーフローは E をそれぞれ用いて表した各エネルギーフローの変数を表1に示す。ただし、各変数に用いる上付きの添え字と下付きの添え字はそれぞれエネルギーフローの供給元と用途の分類を意味する。また、以降の定式化の際に用いる変数を表2に示し、各変数は以下に示す制約式(1)~(21)を満たすものとする。図2に示される概念図のように、バッテリープールの蓄電電力量は充電・給電・EVの移動のみにより変動するものとする (式(14)~(16))。ただし、本稿ではバッテリー容量を決める問題を対象外とするため、EVの移動によるバッテリー容量および蓄電電力量の変動は考えず、負荷平準化のために不足する電力量を不足蓄電電力量として扱う。なお、バッテリー充電時にはエネルギー変換効率のみが使えるものとし、残りはエネルギー変換時のロスとして失われるものとする (式(19)~(21))。

- エネルギーは保存される。

$$\begin{aligned} e_{\text{all}}^{\text{supply}} + e_{\text{all}}^{\text{generate}} + e_{\text{all}}^{\text{discharge}} \\ = e_{\text{consume}}^{\text{all}} + e_{\text{charge}}^{\text{all}} + e_{\text{surplus}}^{\text{all}} \end{aligned} \quad (1)$$

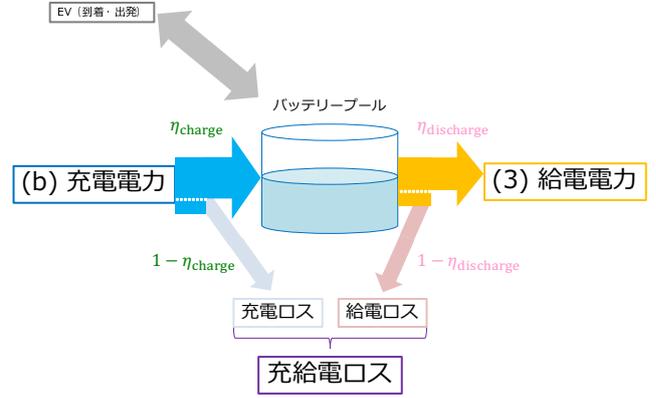


図2 バッテリー充電時におけるエネルギーフロー

- 外部電力の用途は消費するかバッテリーに充電するかのいずれかである。

$$e_{\text{all}}^{\text{supply}} = e_{\text{consume}}^{\text{supply}} + e_{\text{charge}}^{\text{supply}} \quad (2)$$

- 内部電力の用途は消費するかバッテリーに充電するか、あるいは余ってしまうかのいずれかである。

$$e_{\text{all}}^{\text{generate}} = e_{\text{consume}}^{\text{generate}} + e_{\text{charge}}^{\text{generate}} + e_{\text{surplus}}^{\text{generate}} \quad (3)$$

- 給電電力は必ず消費する (充電と給電を同時に行わない)。

$$e_{\text{all}}^{\text{discharge}} = e_{\text{consume}}^{\text{discharge}} \quad (4)$$

- 消費電力の供給元は外部電力か内部電力か給電電力のいずれかである。

$$e_{\text{consume}}^{\text{all}} = e_{\text{consume}}^{\text{supply}} + e_{\text{consume}}^{\text{generate}} + e_{\text{consume}}^{\text{discharge}} \quad (5)$$

- 充電電力の供給元は外部電力か内部電力のいずれかである。

$$e_{\text{charge}}^{\text{all}} = e_{\text{charge}}^{\text{supply}} + e_{\text{charge}}^{\text{generate}} \quad (6)$$

- 余剰電力の供給元は内部電力である。

$$e_{\text{surplus}}^{\text{all}} = e_{\text{surplus}}^{\text{generate}} \quad (7)$$

- 対象期間全体の各エネルギーフローはタイムスロットごとのエネルギーフローの積算値で表す。

$$E_{\text{consume}}^{\text{supply}} = \sum_{t=0}^n e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t) \quad (8)$$

$$E_{\text{charge}}^{\text{supply}} = \sum_{t=0}^n e_{\text{charge}}^{\text{supply}}(t) \quad (9)$$

$$E_{\text{consume}}^{\text{generate}} = \sum_{t=0}^n e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t) \quad (10)$$

$$E_{\text{charge}}^{\text{generate}} = \sum_{t=0}^n e_{\text{charge}}^{\text{generate}}(t) \quad (11)$$

$$E_{\text{surplus}}^{\text{generate}} = \sum_{t=0}^n e_{\text{surplus}}^{\text{generate}}(t) \quad (12)$$

$$E_{\text{consume}}^{\text{discharge}} = \sum_{t=0}^n e_{\text{consume}}^{\text{discharge}}(t) \quad (13)$$

- バッテリー充電効率は充電電力量に対する蓄電電力量の変化量の比である。

$$\eta_{\text{charge}} = \frac{\Delta b_{\text{stored}}^{\text{charge}}}{e_{\text{charge}}^{\text{all}}} \quad (14)$$

$$\text{where } e_{\text{charge}}^{\text{all}} > 0, \Delta b_{\text{stored}}^{\text{charge}} > 0$$

- バッテリー給電効率は蓄電電力量の変化量の絶対値に対する充電電力量の比である。

$$\eta_{\text{discharge}} = \frac{e_{\text{all}}^{\text{discharge}}}{|\Delta b_{\text{stored}}^{\text{discharge}}|} \quad (15)$$

$$\text{where } e_{\text{all}}^{\text{discharge}} > 0, \Delta b_{\text{stored}}^{\text{discharge}} < 0$$

- タイムスロット $t+1$ の開始時点の蓄電電力量は、 t の開始時点の蓄電電力量に充電/給電による変化量および EV の移動による変化量を加えた値である。

$$\begin{aligned} b_{\text{stored}}(t+1) \\ = b_{\text{stored}}(t) + \Delta b_{\text{stored}}^{\text{charge}}(t) + \Delta b_{\text{stored}}^{\text{discharge}}(t) + \Delta b_{\text{stored}}^{\text{EV}}(t) \end{aligned} \quad (16)$$

- 必要蓄電容量は対象期間内の蓄電電力量の最大値と最小値の差で計算する。

$$B_{\text{required}} = \max_t \{b_{\text{stored}}(t)\} - \min_t \{b_{\text{stored}}(t)\} \quad (17)$$

- 不足蓄電電力量は対象期間内の蓄電電力量の最小値が負の値のときのその値の絶対値。

$$\begin{aligned} B_{\text{insufficient}} \\ = \begin{cases} |\min_t \{b_{\text{stored}}(t)\}| & \min_t \{b_{\text{stored}}(t)\} < 0 \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

- 充電ロス 1 から充電効率を引いた値と総充電電力の積和で計算する。

$$\text{loss}_{\text{charge}} = \sum_{t=0}^n (1 - \eta_{\text{charge}}) \times e_{\text{charge}}^{\text{all}}(t) \quad (19)$$

- 給電ロスは 1 から充電効率を引いた値と給電による蓄電電力量の変化量の絶対値の積和で計算する。

$$\text{loss}_{\text{discharge}} = \sum_{t=0}^n (1 - \eta_{\text{discharge}}) \times |\Delta b_{\text{stored}}^{\text{discharge}}(t)| \quad (20)$$

- 充給電ロスは充電ロスと給電ロスの和で計算する。

$$\text{loss}_{\text{all}} = \text{loss}_{\text{charge}} + \text{loss}_{\text{discharge}} \quad (21)$$

3.3 負荷平準化直線

理想的な負荷平準化の状態は、外部電力の時間変動が全くなく、外部電力の変動を表す曲線が時間軸に平行であるときである。本稿では外部電力を負荷平準化させることを目指すので、タイムスロットごとの外部電力量（負荷平準化直線の高さ） e_{leveling} を元の外部電力量の平均値で定義する（式 (22)）。

$$e_{\text{leveling}} = \frac{E_{\text{all}}^{\text{supply}}}{n} \quad (22)$$

$$\text{where } E_{\text{all}}^{\text{supply}} = E_{\text{consume}}^{\text{supply}} + E_{\text{charge}}^{\text{supply}}$$

3.4 負荷平準化のためのバッテリー充給電アルゴリズム

外部電力の時間変動を抑えるためには、外部電力が負荷平準化直線を下回っているときはバッテリーへの充電を、上回っているときはバッテリーからの給電をそれぞれ行えばよい。負荷平準化のためのバッテリー充給電アルゴリズムを Algorithm 1 に示す。なお、事前のバッテリー充給電計画のために本アルゴリズムを実行することを想定している。そのため実運用の際には、本アルゴリズムの入力である各電力ログを適切に予測する必要があるが、それは本論文の対象外とする。

4 シミュレーション設定

ナノセルに見立てた後述の実装環境の消費電力ログに対して、Algorithm 1 に基づいてバッテリー充給電による負荷平準化シミュレーションを行う。

4.1 データ取得のための実装環境

実装環境は広さ 164m^2 の 1 室で、情報工学に関する研究活動を行うオフィス空間である。以下に実装環境の概要を示す。

- ユーザ: 13 名
- 電気機器: 46 個
- 各ユーザが PC やその付属機器が備えられた個人デスクを所有している。
- 2019 年における 1 日当たり総消費電力量の平均値は 38.6 kWh であった。
- 実装環境は、地上 7 階建ての研究施設の建物の一室である。

4.2 シミュレーションの入出力

本シミュレーションの入出力は以下の通りである。

- 入力
 - 消費電力ログ $e_{\text{consume}}^{\text{all}}$
 スマートタップにより取得した実装環境内の電気機器の消費電力ログを 1 時間ごとに足し合わせたもの。ELLDB に蓄積している。
 - 内部電力ログ $e_{\text{all}}^{\text{generate}}$
- 「JIS C8907:2005」¹ で定められた式にオープンデータ化されている日射量ログ² と実装環境が含まれる建物の屋上および駐車場の面積を代入したものを ELLDB に蓄積している。本シミュレーションでは、上記のデータに対してナノセルで使用可能な内部電力量の割合を掛けたものを用いる。

– バッテリー充電効率 η_{charge}
パラメータ。本稿では、 $\eta_{\text{charge}} = 0.9$ とする³。

– バッテリー給電効率 $\eta_{\text{discharge}}$
パラメータ。本稿では、 $\eta_{\text{discharge}} = 0.85$ とする。

- 出力

1: 日本工業標準調査会, “JIS C8907:2005 太陽光発電システムの発電電力量推定方法”。

2: 横浜市環境創造局, “横浜市 環境監視センター”, http://cgi.city.yokohama.lg.jp/kankyousaigai/data/it_00_25_01.html

3: <https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/536403.html>

表 1 ナノセル内のエネルギーフローの定式化に用いる変数

変数	意味
n	対象期間内のタイムスロット数.
$e_{consume}^{supply}(t)$	タイムスロット t に消費する外部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (1) と (a) を結ぶ矢印に対応.
$e_{charge}^{supply}(t)$	タイムスロット t にバッテリーに充電する外部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (1) と (b) を結ぶ矢印に対応.
$e_{consume}^{generate}(t)$	タイムスロット t に消費する内部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (2) と (a) を結ぶ矢印に対応.
$e_{charge}^{generate}(t)$	タイムスロット t にバッテリーに充電する内部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (2) と (b) を結ぶ矢印に対応.
$e_{surplus}^{generate}(t)$	タイムスロット t に余ってしまう内部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (2) と (c) を結ぶ矢印に対応.
$e_{consume}^{discharge}(t)$	タイムスロット t に消費する給電電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (3) と (a) を結ぶ矢印に対応.
$E_{consume}^{supply}$	対象期間に消費する外部電力量.
E_{charge}^{supply}	対象期間にバッテリーに充電する外部電力量.
$E_{consume}^{generate}$	対象期間に消費する内部電力量.
$E_{charge}^{generate}$	対象期間にバッテリーに充電する内部電力量.
$E_{surplus}^{generate}$	対象期間に余ってしまう内部電力量.
$E_{consume}^{discharge}$	対象期間に消費する給電電力量.

表 2 負荷平準化およびバッテリー充給電アルゴリズムの定式化に用いる変数

変数	意味
$e_{all}^{supply}(t)$	タイムスロット t の総外部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (1) から出る 2 本の矢印に対応.
$e_{all}^{generate}(t)$	タイムスロット t の総内部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (2) から出る 3 本の矢印に対応.
$e_{all}^{discharge}(t)$	タイムスロット t の総給電電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (3) から出る 1 本の矢印に対応.
$e_{all}^{consume}(t)$	タイムスロット t の総消費電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (a) に入る 3 本の矢印に対応.
$e_{all}^{charge}(t)$	タイムスロット t の総充電電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (b) に入る 2 本の矢印に対応.
$e_{all}^{surplus}(t)$	タイムスロット t の総余剰電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$). 図 1 の (c) に入る 1 本の矢印に対応.
E_{all}^{supply}	対象期間の総外部電力量.
$E_{all}^{generate}$	対象期間の総内部電力量.
$E_{all}^{discharge}$	対象期間の総給電電力量.
$E_{all}^{consume}$	対象期間の総消費電力量.
E_{all}^{charge}	対象期間の総充電電力量.
$E_{all}^{surplus}$	対象期間の総余剰電力量.
$\Delta e_{leveling}(t)$	タイムスロット t の総外部電力量と負荷平準化直線の差分 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$).
$e_{consume}^{supply}(t)$	シミュレーション時のタイムスロット t に消費する外部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$).
$e_{charge}^{supply}(t)$	シミュレーション時のタイムスロット t にバッテリーに充電する外部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$).
$e_{consume}^{generate}(t)$	シミュレーション時のタイムスロット t に消費する内部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$).
$e_{charge}^{generate}(t)$	シミュレーション時のタイムスロット t にバッテリーに充電する内部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$).
$e_{surplus}^{generate}(t)$	シミュレーション時のタイムスロット t に余ってしまう内部電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$).
$e_{consume}^{discharge}(t)$	シミュレーション時のタイムスロット t に消費する給電電力量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$).
η_{charge}	バッテリー充電効率.
$\eta_{discharge}$	バッテリー給電効率.
$b_{stored}(t)$	タイムスロット t の開始時点でバッテリープール内に蓄電されている電力量 (蓄電電力量) ($t = 0, 1, 2, \dots, n$).
$\Delta b_{stored}^{charge}(t)$	タイムスロット t における充電による蓄電電力量の変化量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$).
$\Delta b_{stored}^{discharge}(t)$	タイムスロット t における給電による蓄電電力量の変化量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$).
$\Delta b_{stored}^{EV}(t)$	タイムスロット t における EV の移動による蓄電電力量の変化量 ($t = 0, 1, 2, \dots, n-1$).
$B_{required}$	対象期間の負荷平準化に必要なバッテリー容量 (必要蓄電容量). 図 5 の赤色の矢印に対応.
$B_{insufficient}$	対象期間の負荷平準化のために不足する蓄電電力量 (不足蓄電電力量). 図 5 の青色の矢印に対応.
$loss_{charge}$	対象期間のバッテリーへの充電時に生じるエネルギー変換ロス (充電ロス). 図 5 の紫色の矢印に対応.
$loss_{discharge}$	対象期間のバッテリーからの給電時に生じるエネルギー変換ロス (給電ロス). 図 5 の橙色の矢印に対応.
$loss_{all}$	対象期間のバッテリーの充給電時に生じる総エネルギー変換ロス (充給電ロス). 図 5 の紫色と橙色の矢印に対応.

– 負荷平準化直線 $e_{all}^{supply}(t) = e_{leveling}$
式 (22) に「消費電力ログ」・「内部電力ログ」から計算される対象期間の総外部電力量 E_{all}^{supply} を代入することで求められる直線.

– 充電電力ログ e_{charge}^{all}
Algorithm 1 より, バッテリープールを用いて負荷平準化をす

るために必要な充電電力量ログを仮想的に作成したもの.

– 給電電力ログ $e_{all}^{discharge}$
Algorithm 1 より, バッテリープールを用いて負荷平準化をす
るために必要な給電電力量ログを仮想的に作成したもの.

– 蓄電電力量ログ b_{stored}
式 (16) に「バッテリー充電電力量ログ」・「バッテリー給電電力

Algorithm 1 負荷平準化のためのバッテリー充電アルゴリズム

Require: $n, e_{\text{leveling}}, \eta_{\text{charge}}, \eta_{\text{discharge}}, e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t), e_{\text{charge}}^{\text{supply}}(t), e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t), e_{\text{charge}}^{\text{generate}}(t), e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t), e_{\text{charge}}^{\text{supply}}(t), e_{\text{consume}}^{\text{discharge}}(t)$
 $(t = 0, 1, 2, \dots, n-1)$

Ensure: $e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t), e_{\text{charge}}^{\text{supply}}(t), e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t), e_{\text{charge}}^{\text{generate}}(t), e_{\text{consume}}^{\text{discharge}}(t), e_{\text{charge}}^{\text{discharge}}(t), b_{\text{stored}}(t+1)$
 $(t = 0, 1, 2, \dots, n-1),$

- 1: $t \leftarrow 0, b_{\text{stored}}(0) \leftarrow 0$
- 2: **while** $t < n$ **do**
- 3: $e_{\text{all}}^{\text{supply}}(t) \leftarrow e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t) + e_{\text{charge}}^{\text{supply}}(t)$
- 4: $\Delta e_{\text{leveling}}(t) \leftarrow e_{\text{all}}^{\text{supply}}(t) - e_{\text{leveling}}$
- 5: $e_{\text{consume}}^{\text{all}}(t) \leftarrow e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t) + e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t) + e_{\text{consume}}^{\text{discharge}}(t)$
- 6: **if** $\Delta e_{\text{leveling}}(t) < 0$ **then**
- 7: **if** $e_{\text{consume}}^{\text{all}}(t) > e_{\text{leveling}}$ **then**
- 8: $e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t) \leftarrow e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t) + |\Delta e_{\text{leveling}}(t)|$
- 9: $e_{\text{charge}}^{\text{supply}}(t) \leftarrow 0$
- 10: $e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t) \leftarrow e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t) - |\Delta e_{\text{leveling}}(t)|$
- 11: $e_{\text{charge}}^{\text{generate}}(t) \leftarrow e_{\text{charge}}^{\text{generate}}(t) + e_{\text{surplus}}^{\text{generate}}(t) + |\Delta e_{\text{leveling}}(t)|$
- 12: **else**
- 13: $e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t) \leftarrow e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t) + e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t)$
- 14: $e_{\text{charge}}^{\text{supply}}(t) \leftarrow |\Delta e_{\text{leveling}}(t)| - e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t)$
- 15: $e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t) \leftarrow 0$
- 16: $e_{\text{charge}}^{\text{generate}}(t) \leftarrow e_{\text{charge}}^{\text{generate}}(t) + e_{\text{surplus}}^{\text{generate}}(t) + e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t)$
- 17: **end if**
- 18: $e_{\text{consume}}^{\text{discharge}}(t) \leftarrow 0$
- 19: **else if** $\Delta e_{\text{leveling}}(t) > 0$ **then**
- 20: $e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t) \leftarrow e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t) - |\Delta e_{\text{leveling}}(t)|$
- 21: $e_{\text{charge}}^{\text{supply}}(t) \leftarrow 0$
- 22: $e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t) \leftarrow e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t)$
- 23: $e_{\text{charge}}^{\text{generate}}(t) \leftarrow 0$
- 24: $e_{\text{consume}}^{\text{discharge}}(t) \leftarrow e_{\text{consume}}^{\text{discharge}}(t) + |\Delta e_{\text{leveling}}(t)|$
- 25: **else**
- 26: $e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t) \leftarrow e_{\text{consume}}^{\text{supply}}(t)$
- 27: $e_{\text{charge}}^{\text{supply}}(t) \leftarrow e_{\text{charge}}^{\text{supply}}(t)$
- 28: $e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t) \leftarrow e_{\text{consume}}^{\text{generate}}(t)$
- 29: $e_{\text{charge}}^{\text{generate}}(t) \leftarrow e_{\text{charge}}^{\text{generate}}(t) + e_{\text{surplus}}^{\text{generate}}(t)$
- 30: $e_{\text{consume}}^{\text{discharge}}(t) \leftarrow e_{\text{consume}}^{\text{discharge}}(t)$
- 31: **end if**
- 32: $e_{\text{surplus}}^{\text{generate}}(t) \leftarrow 0$
- 33: $\Delta b_{\text{stored}}^{\text{charge}}(t) \leftarrow \eta_{\text{charge}} \times (e_{\text{charge}}^{\text{supply}}(t) + e_{\text{charge}}^{\text{generate}}(t))$
- 34: $\Delta b_{\text{stored}}^{\text{discharge}}(t) \leftarrow -e_{\text{all}}^{\text{discharge}}(t) / \eta_{\text{discharge}}$
- 35: $b_{\text{stored}}(t+1) \leftarrow b_{\text{stored}}(t) + \Delta b_{\text{stored}}^{\text{charge}}(t) + \Delta b_{\text{stored}}^{\text{discharge}}(t)$
- 36: $t \leftarrow t + 1$
- 37: **end while**

量ログ」から計算される充電/給電による蓄電電力量の変化量を代入したもの。

– 必要蓄電容量 B_{required}

式 (17) より計算したもの。

– 不足蓄電電力量 $B_{\text{insufficient}}$

式 (18) より計算したもの。

– 充電ロス $loss_{\text{all}}$

式 (19)~(21) より計算したもの。

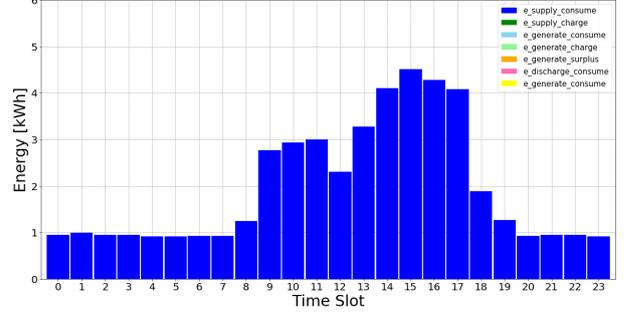


図 3 実装環境の 2019-2-1 における消費電力量の時間変動

4.3 シミュレーション想定

実装環境の 2019-2-1 における 1 時間ごとの消費電力を図 3 に示す。図 3 の横軸はタイムスロットを、縦軸は電力 [kWh] をそれぞれ表し、青色の棒グラフは 1 時間ごとの消費した外部電力量 $e_{\text{consume}}^{\text{supply}}$ を意味する (図 4, 5 の積み上げ棒グラフも同様)。シミュレーションの対象期間を 1 日、タイムスロット数 n を 24 とし、図 3 で示される消費電力ログに対して、次の二つの想定でシミュレーションを行う。

想定 (1) 実装環境の建物の屋上と駐車場に置いた太陽光パネルによる発電電力の 1% を実装環境で使えることを想定したとき (実装環境の消費電力が建物全体の消費電力の 1% 程度であるため)。負荷平準化を行わないため、「負荷平準化直線」のみを出力する。

想定 (2) 想定 (1) に対して、負荷平準化を行うために十分な容量があると仮定したバッテリープールを用いて、Algorithm 1 に基づいて負荷平準化を試みたとき。

5 シミュレーション結果

5.1 節には前章のシミュレーションをある一日について行ったとき、5.2 節にはそれを一年間に渡り一日ごと独立に行ったときの結果を示す。

5.1 一日のシミュレーション

4.3 節の想定に基づいたシミュレーション結果を図 4, 5 に示す。まず図 4 には、想定 (1) でシミュレーションを行ったときの各エネルギーフローの積み上げ棒グラフと式 (22) によって算出した負荷平準化直線 (赤色の破線) が可視化されている。縦軸の正の部分に積み上げられている棒グラフは消費電力 (消費側) を意味し、その包絡線は総消費電力量 $e_{\text{consume}}^{\text{all}}$ (図 3 の包絡線と一致) を意味する。縦軸の負の部分に積み上げられている棒グラフは内部電力 (発電側) を意味し、その包絡線は総内部電力量 $e_{\text{all}}^{\text{generate}}$ を意味する。内部電力をナノセル内で積極的に消費することを想定すると、消費電力と内部電力は相殺される。この相殺分をタイムスロットごとの消費した内部電力量 $e_{\text{consume}}^{\text{generate}}$ とし、消費側の相殺分を水色、発電側の相殺分を黄色の棒グラフで表す。図 4 において、タイムスロットごとの外部電力量 (青色の棒グラフの包絡線) と負荷平準化直線の差分

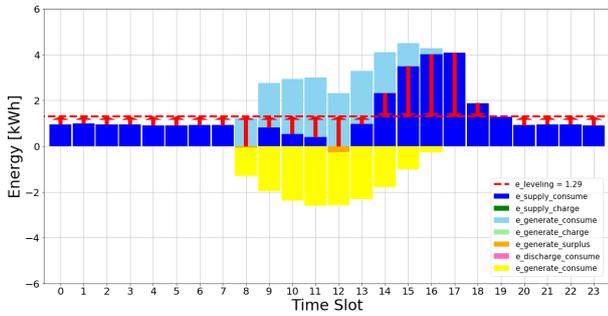


図 4 実装環境の 2019-2-1 における消費電力量と発電電力量の時間変動

$\Delta e_{leveling}$ (赤色の矢印) が負荷平準化を行うために外部電力量を変化させる必要がある電力量を意味し、上向きの矢印で表される部分はバッテリーに充電し、下向きの矢印で表される部分はバッテリーから給電することで負荷平準化を行うことができる。

想定 (2) に従ってバッテリー充電電のシミュレーションを行ったときの各エネルギーフロー (上の積み上げ棒グラフ) と蓄電電力量および累積バッテリー充電ロス (下の折れ線グラフ) の時間変動を図 5 に示す。

黄緑色・緑色・桃色の棒グラフはそれぞれ、タイムスロットごとのバッテリーに充電した内部電力量 $e_{charge}^{generate}$ ・タイムスロットごとのバッテリーに充電した外部電力量 e_{charge}^{supply} ・タイムスロットごとの消費した給電電力量 $e_{consume}^{discharge}$ を意味する。図 5 において、総外部電力 (上図の青色の棒グラフの包絡線) が負荷平準化直線 (上図の赤色の破線) と一致していることが完全に負荷平準化されていることを示している。蓄電電力量および累積バッテリー充電ロスの時間変動より、今回の対象期間で総消費電力量を変えずにバッテリー充電電のみで負荷平準化を試みることにに関して、次の 3 つのことが示された。

- (1) 少なくとも $B_{required} = 10.95$ kWh のバッテリー容量が必要である (赤色の矢印)。
- (2) 16~17 時台の給電電力量は 16 時以前の対象期間内の充電電力量だけでは $B_{insufficient} = 3.44$ kWh だけ不足しており、不足分を対象期間以前の充電電力量か EV バッテリーによりナノセルの外部から持ち込んだ電力量で補う必要がある (青色の矢印)。
- (3) 青色の面グラフと赤色の面グラフがそれぞれバッテリー充電時に生じる充電ロスと給電ロスを示しており、対象期間全体の合計で $loss_{all} = 2.61$ kWh であった (紫色の矢印)。

5.2 年間シミュレーションとその考察

本節では、2019-1-1 から 2019-12-31 のうちデータ欠損日を除いた 333 日間に対して、5.1 節のシミュレーションを行ったときの結果とその考察を示す。図 6 はバッテリープールの容量および蓄電電力量に関するシミュレーション結果の頻度分

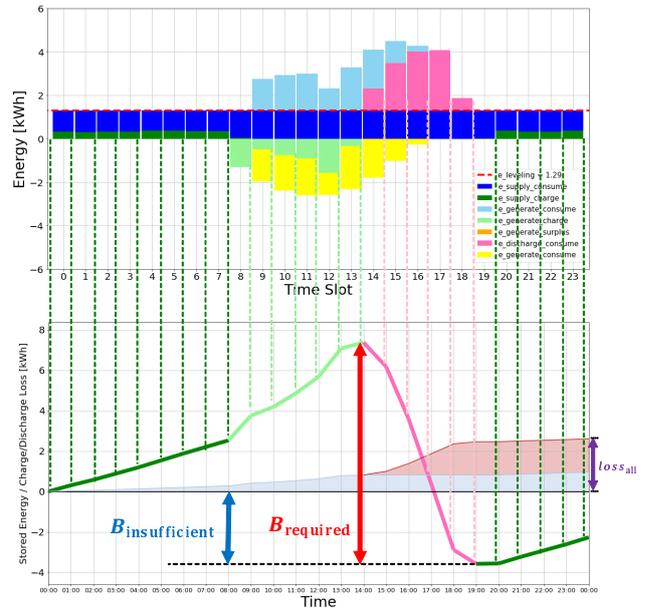


図 5 実装環境の 2019-2-1 における外部電力を負荷平準化させた場合の各エネルギーフロー (上の積み上げ棒グラフ) と蓄電電力量および累積バッテリー充電ロス (下の折れ線グラフ) の時間変動

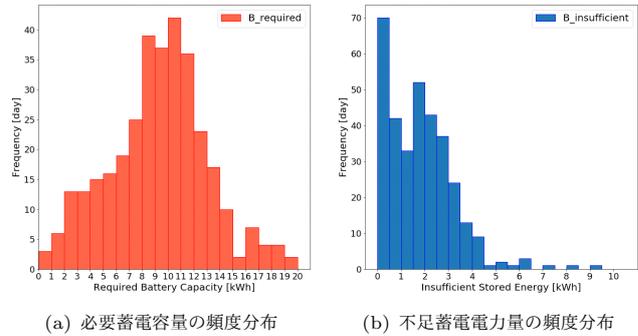


図 6 実装環境の 2019 年における外部電力を負荷平準化させた場合のバッテリー容量および蓄電電力量の頻度分布

布で、(a) が必要蓄電容量 $B_{required}$ を、(b) が不足蓄電電力量 $B_{insufficient}$ である。必要蓄電容量の最大値は 19.69 kWh で、これは EV1 台に搭載されているバッテリーの容量でナノセルの負荷平準化が行えることを示している。不足蓄電電力量の最大値は 9.07 kWh で、これは不足蓄電電力量を EV1 台に搭載されているバッテリーの容量で補うことができることを示している。

次に図 7 は充電ロス $loss_{all}$ に関する出力結果の頻度分布で、充電時に生じるエネルギー変換ロスは総消費電力量の 10 分の 1 程度であることを示している。本稿では、負荷平準化直線を簡易的に総外部電力の平均値で定義したが、充電効率と給電効率の非対称性を利用して、充電ロスを最小化するような負荷平準化直線を定義することもできると考えられる。

6 まとめと今後の課題

本研究では、その場所固有のエネルギーライフログをナノセル内を流れる電力のエネルギーフローとして集約し、負荷平

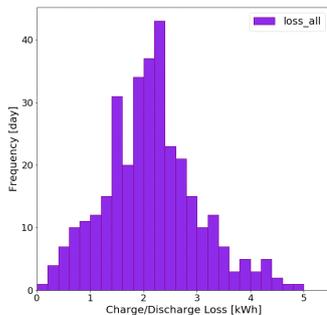


図7 実装環境の2019年における外部電力を負荷平準化させた場合の充給電ロスの頻度分布

準化のためのバッテリー充給電シミュレーションを行った。シミュレーション結果より、EV1台程度のバッテリー容量だけでナノセルの負荷平準化ができ、そのときの充給電ロスは1日当たり消費電力量の10分の1程度であることを示した。

今後の課題として、より規模の大きい建物や施設やより長い期間を対象にした負荷平準化シミュレーションを行う必要がある。そのためには、オープンデータ化されている建物の需要電力データを活用したり、バッテリーの劣化を考慮したりすることが重要であると考えられる。なお、本シミュレーションの妥当性を検証するため、4.1節の実装環境とEVのバッテリーを用いた実証実験を行う予定である。実証実験で得られたデータと過去の消費電力や内部電力が類似している日のデータを比較し、Xuらの文献[21]で用いられている評価基準等を用いてシミュレーションの妥当性を評価することができると考えられる。

謝辞 本研究の主要な部分はJSPS科研費(課題番号18K11750)の支援による。また、一部については横浜国立大学教育・研究改革推進事業「先端的な数理・情報手法に基づくビッグデータ解析技術の改革推進」の支援を受けた。

文 献

- 総務省. 令和元年版 情報通信白書. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r01/pdf/index.html>. Last accessed: 8 January 2020.
- 経済産業省. 新産業構造ビジョン. <https://www.meti.go.jp/press/2017/05/20170530007/20170530007-2.pdf>. Last accessed: 8 January 2020.
- 経済産業省資源エネルギー庁. 平成30年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2019). <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019pdf/>. Last accessed: 8 January 2020.
- 環境省. 環境省 再エネ加速化・最大化促進プログラム2018年版. <https://www.env.go.jp/earth/program.pdf>. Last accessed: 8 January 2020.
- 田中雄哉, 茨木隆兵, 本藤祐樹, 富井尚志. エネルギーライフログDBの構築とマイクログリッド導入意思決定のための情報提示. C7-5, pp. 1-8.
- 三菱総合研究所, 環境省. 平成27年度低炭素社会の実現に向けた中長期的再生可能エネルギー導入拡大方策検討調査委託業務報告書. https://www.env.go.jp/earth/report/h29-02/h27_all.pdf. Last accessed: 8 January 2020.
- 合田忠弘, 諸住哲. スマートグリッド教科書(インプレス標準教科書シリーズ). インプレスジャパン, 2011.
- Nicole D Sintov and P Schultz. Unlocking the potential of smart grid technologies with behavioral science. *Frontiers in psychology*, Vol. 6, p. 410, 2015.
- Will Simm, Maria Angela Ferrario, Adrian Friday, Peter Newman, Stephen Forshaw, Mike Hazas, and Alan Dix. Three energy pulse: exploring renewable energy forecasts on the edge of the grid. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1965-1974, 2015.
- 馬場博幸, 齊藤哲夫, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦, 宇田川佑介, 天津孝之, 増田浩. Iot化する家電機器を活用したデマンドレスポンスによる自然変動電源の余剰充電抑制緩和策. 電気学会論文誌C(電子・情報・システム部門誌), Vol. 137, No. 2, pp. 326-332, 2017.
- 池田伸太郎, 大岡龍三. 日本国内におけるスマートシティ・スマートコミュニティ実証事業の最新動向. 生産研究, Vol. 66, No. 1, pp. 69-77, 2014.
- 中川二彦, 満本祐太. Pvとevを用いた双方向エネルギーシステムの評価. 日本エネルギー学会誌, Vol. 93, No. 8, pp. 716-724, 2014.
- Willett Kempton and Jasna Tomić. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *Journal of power sources*, Vol. 144, No. 1, pp. 268-279, 2005.
- Bernhard Jansen, Carl Binding, Olle Sundstrom, and Dieter Gantenbein. Architecture and communication of an electric vehicle virtual power plant. In *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 149-154. IEEE, 2010.
- AJ Bernheim Brush, John Krumm, Sidhant Gupta, and Shwetak Patel. Evhomesifter: evaluating intelligent techniques for using electrical vehicle batteries to shift when homes draw energy from the grid. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp. 1077-1088, 2015.
- Akira Ito, Akihiko Kawashima, Tatsuya Suzuki, Shinkichi Inagaki, Takuma Yamaguchi, and Zhuomin Zhou. Model predictive charging control of in-vehicle batteries for home energy management based on vehicle state prediction. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 51-64, 2017.
- Hiroshi Kikusato, Kohei Mori, Shinya Yoshizawa, Yu Fujimoto, Hiroshi Asano, Yasuhiro Hayashi, Akihiko Kawashima, Shinkichi Inagaki, and Tatsuya Suzuki. Electric vehicle charge-discharge management for utilization of photovoltaic by coordination between home and grid energy management systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 10, No. 3, pp. 3186-3197, 2018.
- Albert YS Lam, Ka-Cheong Leung, and Victor OK Li. An electric-vehicle-based supplementary power delivery system. In *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 307-312. IEEE, 2015.
- Qilong Huang, Qing-Shan Jia, and Xiaohong Guan. Robust scheduling of ev charging load with uncertain wind power integration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 2, pp. 1043-1054, 2016.
- Yuan Hong, Shengbin Wang, and Ziyue Huang. Efficient energy consumption scheduling: Towards effective load leveling. *Energies*, Vol. 10, No. 1, p. 105, 2017.
- Lei Xu, Yiqun Pan, Meishun Lin, and Zhizhong Huang. Community load leveling for energy configuration optimization: Methodology and a case study. *Sustainable cities and society*, Vol. 35, pp. 94-106, 2017.
- Evangelos L Karfopoulos and Nikos D Hatzigiorgiou. Distributed coordination of electric vehicles providing v2g services. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, No. 1, pp. 329-338, 2015.