

EV を用いた再生可能エネルギーの マッチングシミュレーションと実データによる評価

小池 風樹[†] 石田 卓也[†] 深野 巧也[†] 渡辺 隆史[†] 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 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 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

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

あらまし IoT 技術の発達により、再生可能エネルギーの発電ログ、建物の需要電力、および、自動車の走行ログなどのエネルギーに関する記録 (エネルギーライフログ) を容易に取得することが可能となった。本研究では、これらのライフログを蓄積するエネルギーライフログ DB を構築し、電気自動車 (Electric Vehicle:EV) の充放電による再生可能エネルギーのマッチングシミュレーションを行う。また、EV の補助として据え置き型バッテリーの利用を想定し同様にシミュレーションを行う。評価には実データを用いることで、日ごとや年単位での詳細な分析を可能とした。結果として、負荷平準化のために EV の充給電が貢献することが示された。

キーワード 再生可能エネルギー、電気自動車、V2G、エネルギーライフログ

1 はじめに

近年、IoT の推進やストレージ価格の低下により、日常生活の中から収集されるあらゆるデータ、すなわちライフログを容易に収集・活用できるようになった。また自治体の取り組みなどによってオープンデータ化が進み、公共情報について多様なデータを扱えるようになった [1]。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特性から扱いが難しく、これらを管理する「リアルデータのプラットフォーム」を創出・発展させることが重要視されている [2]。

一方で、地球温暖化対策のために世界的に CO₂ 排出削減が課題となっている [3]。特に電力消費由来の CO₂ 排出量は全 CO₂ 排出量の 39% に達しており、ゼロエミッション電源として再生可能エネルギーの導入が世界的に進められている。しかし、再生可能エネルギーの発電は気象に依存し不安定なため電力系統への統合は影響が大きく、発電した電力をその場で消費する分散型エネルギー社会への移行が求められている。

また運輸部門における CO₂ 排出削減として電化が必要とされており、ヨーロッパ・中国を中心としてガソリン車から電気自動車 (EV:Electric Vehicle) へのシフトが進んでいる。EV は走行時に CO₂ を排出しないだけでなく、EV が搭載するリチウムイオンバッテリーは蓄電技術としてエネルギー密度やパワー密度に優れ [4]、電力系統との間で双方向の電力の融通 (V2G:Vehicle to Grid) ができる。これによりピークカットや負荷平準化、無効電力補償、再生可能エネルギーの補助など電力系統に様々なサービスを提供可能である [5]。

このような再生可能エネルギーの発電システムや EV などの

バッテリーと情報通信技術を組み合わせた小規模電力系統として、マイクログリッドが注目されている [6]。マイクログリッドでは再生可能エネルギーによる発電電力の変動をバッテリーにより吸収するなどの需要・発電電力の制御・管理を需要側が積極的に行う。またマイクログリッド同士が双方向に接続され電力の融通をするような「次世代電力網」としてスマートグリッドという概念も提案されている。

しかしマイクログリッドを導入する際、再生可能エネルギーの発電電力やバッテリーとの充給電量を事前に推定し予想することは難しく、以下のような問題がある。(1) 発電電力をバッテリーと融通する場合は発電電力の増減に合わせて充給電を行う必要があるため、1日や1時間ごとなどの詳細な発電出力の変化を知る必要がある。しかし特定の地域に実際に再生可能エネルギーによる発電システムを導入した際にどれほど発電電力を得られるのかは、月間や年間などの概算でしか推定することができない [7] [8]。(2) EV をバッテリーとして利用する場合、EV はモビリティとして利用可能なため、特定の地域に存在する EV の台数は時間により変化する。そのため V2G に利用可能なバッテリー容量は時間により変動する。(3) バッテリーは利用に伴い劣化することが知られており、容量が次第に減少していく。

これらの問題点に対し、本研究ではライフログとオープンデータを組み合わせてマイクログリッド導入効果の推定や分析を詳細に行えるようなデータベースを構築した。気象データをもとに再生可能エネルギーの発電電力を推定し、EV を用いたエネルギーのマッチングシミュレーションを行う。シミュレーションでは充給電に伴う電力の損失量や、バッテリー容量の変化を考慮する。有用性の評価として負荷平準化というエネル

ギーマッチングのシナリオでシミュレーションを行い、実環境の電力や気象の実データを用いて日ごとや年ごとに定量的に評価する。

2 研究背景

2.1 関連研究

スマートグリッド・マイクログリッドは分散型電源技術や情報通信技術を組合せた「次世代電力網」として期待されている [6]。これらのグリッドにおける電源として再生可能エネルギーを利用する際は、その不安定さからグリッド内での電力バランスをとることが重要になる。再生可能エネルギーの発電電力は気象条件に大きく左右されるため、システムの設置前に気象データから発電量の推定を行う手法が存在する。太陽光発電 (PV:photovoltaic) の月間発電量推定手法が日本工業規格に制定されており [7]、「太陽電池アレイ出力」、「日射量」、「気温」から導出することができる。また風力発電は [8] から「風速」と風車の「出力曲線」から算出可能である。「日射量」・「気温」・「風速」などの気象データは現在オープンデータとして公開されているため、そのデータから再生可能エネルギーによる発電電力量を推定することができる。しかしこれらの推定は月間や年間などの長期にわたる概算である。本研究ではこれらの手法をもとに 1 時間単位での詳細な発電電力量の推定を行う。

スマートグリッド・マイクログリッドを構成する要素として EV は注目されており、負荷平準化や再生可能エネルギーの有効利用のための手段として V2G は期待されている。V2G の導入効果の検討として Kempton ら [9], [10] 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。また、Jansen ら [11] 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、大量の EV を導入した際に 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。特にグリッドの負荷平準化や電気料金の最小化を目的として、EV の充給電スケジューリングを線形計画問題や整数計画問題として定式化し解くことで V2G の有用性を論じている。Yifen ら [12] は、電力需要に応じて電気料金を変更し、個々の EV が充給電コストを最小化することでグリッド全体の負荷平準化の達成に近づくことを示した。他にも充給電コストなどの電気料金の最小化 [13], [14], [15] や発電電力の売電金額の最大化 [16], PHEV のガソリン代の料金の最小化 [17] などがある。これらは充放電アルゴリズムの提案を目的とし、現実の環境を想定した評価は行っているものの、1 日などの短期間での実現可能性しか論じおらず V2G による長期的な影響の考察がなされていない。我々はライフログの活用を目的として実データを蓄積しているため、実際の環境の様々な状況に対する V2G の効果をシミュレーションし定量化して分析することが可能である。またその期間も日ごとや年単位での分析が可能であり、より詳細に V2G を利用した場合の影響を評価できる。

また V2G のデメリットの一つとしてリチウムイオンバッテリーの劣化があげられる [5], [18]。そのためリチウムイオ

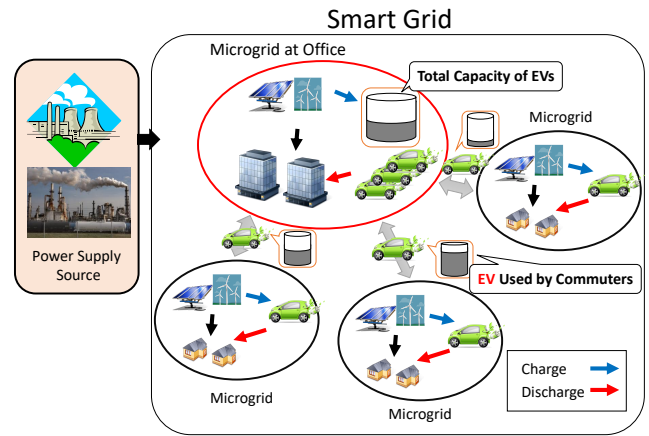


図 1 想定するスマートグリッド概略図

ンバッテリーの劣化を実験的に定式化する研究が行われている [19], [20]。Wang ら [21] は、[19] の定式化をもとに V2G サービスの提供に伴う EV のバッテリー劣化をシミュレーションし定量化した。しかしバッテリーの劣化には注目しているが、V2G によってグリッドの電力バランスがどのように変化したのかという点での評価はされていない。本研究では実際の EV のバッテリーの劣化のログをもとに定式化を行いシミュレーションに利用する。またグリッド全体での V2G エネルギーマッチングとそれによる EV バッテリーの劣化をどちらも評価する。

2.2 本研究の想定環境

本研究で想定するスマートグリッド、事業所・家庭のマイクログリッドの概略を図 1 に示す。マイクログリッドは電力負荷としての建物や再生可能エネルギーの発電設備、EV や据え置き型バッテリーなどの蓄電設備からなる。EV は通勤に利用され、日中は家庭から事業所に集まる。本研究では事業所のマイクログリッドを想定する。以下にその特徴を示す。

- 建物

マイクログリッドにおいて電力消費が行われる場所である。電力推移の特徴として夜から朝にかけては消費が少なくほぼ一定であり、朝方から昼頃にかけて活動が行われるにつれて増加する。日中は比較的高い状態にあり、その後夕方から活動が終わるにつれ徐々に消費が少なくなっていく。

- 再生可能エネルギーの発電設備

小規模分散型の発電設備として再生可能エネルギーの発電設備が導入されている。発電された電力は発電されたマイクログリッド内でできるだけ利用する。本研究では導入が比較的容易な太陽光発電を屋上に設置することを考える。

- 蓄電設備

蓄電設備として EV と据え置き型バッテリーが存在している。マイクログリッドには V2G 設備が備わっており、駐車中の EV は充給電を行うことができる。EV は通勤に使用されるためマイクログリッド間を移動するが、据え置き型バッテリーは移動せず常に利用可能である。

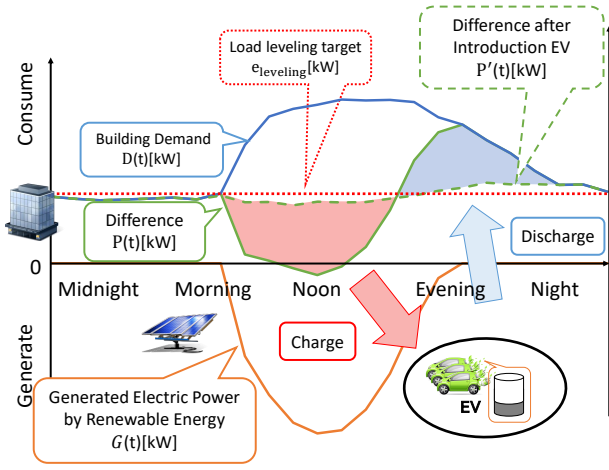


図2 負荷平準化を目的としたマイクログリッドの1日の電力推移

2.3 研究課題

マイクログリッドにおいて再生可能エネルギーの導入が進むと、発電出力が天候に依存することから様々な問題が発生する。特に太陽光発電では昼に発電のピークを迎えその後出力が減るため、需要電力から発電電力を差し引いた正味の需要電力が夕方急激に上昇してしまうダックカーブ現象の発生が懸念されている[22]。このダックカーブ現象により、正味の需要電力の時間変動に発電所の出力変動が追いつかず停電が引き起こされてしまう恐れがある。この対策の一つとして蓄電技術を用いて正味の需要電力をなるべく平らにする負荷平準化が考えられる。この負荷平準化はスマートグリッドなどの大きな電力網で行うことが必要とされるが、そのスマートグリッド内のマイクログリッドごとに個別に負荷平準化を達成することでスマートグリッドの負荷平準化につながると考えられる。そこで本研究ではマイクログリッドにおける負荷平準化のシミュレーションを行う。シミュレーションからEVによる負荷平準化の効果と、負荷平準化を完全に達成するために必要な据え置き型バッテリーの容量を定量的に示す。

3 定式化

マイクログリッドの電力推移に関する各文字式を表1に、EVの充電に関する各文字式を表2に示す。

3.1 電力推移モデル

事業所のマイクログリッドにおける建物の1日の需要電力 $D(t)$ と再生可能エネルギーによる発電電力 $G(t)$ 、EVの充電電による電力推移を図2に示す。時点 t におけるマイクログリッドの需要電力 $D(t)$ はグリッドの外部の大型電力系統から供給される電力を利用するが、グリッド内で再生可能エネルギーの発電電力 $G(t)$ が発生している場合はグリッド内に優先的に供給する。これによりグリッド全体での電力需要は以下の相殺差分電力 $P(t)$ として表わされる。

$$P(t) = D(t) + G(t) \quad (1)$$

$P(t)$ は正と負の両方の値をとり、負の場合は発電電力が需要電力を上回り発電の余剰電力が発生している状態である。この $P(t)$ の正の値はこのグリッドの正味の電力負荷であり、外部の大型電源から供給される電力である。これを正味の需要電力 $D_{Net}(t)$ と呼び、以下のように表す。

$$D_{Net}(t) = \begin{cases} P(t) & (P(t) > 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

3.2 EVバッテリーモデル

グリッドに存在するEVは、V2G設備を利用することでグリッドに対して充電を行うことができる。時点 t における j 番目のEVのバッテリー残量を $E_{EV,j}(t)$ 、充電電力を $E_{EV,j}^{Charge}(t)$ 、給電電力を $E_{EV,j}^{Discharge}(t)$ と表すとき、グリッド全体のEVのバッテリー残量の総量は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J E_{EV,j}(t) \\ &= \sum_{j=1}^J E_{EV,j}(t-1) + \sum_{j=1}^J E_{EV,j}^{Charge}(t) - \sum_{j=1}^J E_{EV,j}^{Discharge}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

また、グリッド全体におけるEVの充電後の相殺差分電力 $P'(t)$ は以下のように表される。

$$P'(t) = P(t) + \sum_{j=1}^J E_{EV,j}^{Charge}(t) - \sum_{j=1}^J E_{EV,j}^{Discharge}(t) \quad (4)$$

このときEVの充電電力量に関して以下の制約を満たす。バッテリー上限を超える充電は行われない。

$$E_{EV,j}(t-1) + E_{EV,j}^{Charge}(t) < E_{EV,Max,j} \quad (5)$$

バッテリー下限を下回る給電はしない。

$$E_{EV,j}(t-1) - E_{EV,j}^{Discharge}(t) > E_{EV,Min,j} \quad (6)$$

最大充電速度を上回る充電は行われない。

$$(p_{EV,Charge,Max} - E_{EV,j}^{Charge}(t)) \geq 0 \quad (7)$$

$$(p_{EV,Discharge,Max} - E_{EV,j}^{Discharge}(t)) \geq 0 \quad (8)$$

充電と給電は同時に行われない。

$$E_{EV,j}^{Charge}(t) \cdot E_{EV,j}^{Discharge}(t) = 0 \quad (9)$$

3.3 据え置き型バッテリーモデル

グリッドに存在する据え置き型バッテリーはグリッドに対して充電を行うことができる。本研究では充電を行うために必要十分なバッテリー容量を持ち、充電可能な時間や充電速度に制約のない理想的なバッテリーを考える。つまり時点ごとのバッテリー残量 $E_{Battery}(t)$ 、充電量 $E_{Battery}^{Charge}(t)$ 、給電量 $E_{Battery}^{Discharge}(t)$ のみを考え、以下のように表わす。

$$E_{Battery}(t) = E_{Battery}(t-1) + E_{Battery}^{Charge}(t) - E_{Battery}^{Discharge}(t) \quad (10)$$

表 1 マイクログリッドに関する各文字式の説明

文字式	単位	意味
τ	sec	サンプリング間隔
$D(t)$	W	マイクログリッドの時点 t における需要電力 ($D(t) \geq 0$) (図 2 青色実線)
$G(t)$	W	時点 t における再生可能エネルギーの発電電力 ($G(t) \leq 0$) (図 2 橙実線)
$P_{Supply}(t)$	W	時点 t における電力供給元の供給電力
$P(t) = D(t) + G(t)$	W	時点 t における需要・発電の相殺差分電力 (図 2 緑実線)
$P'(t)$	W	時点 t における EV 導入後の相殺差分電力 (図 2 緑破線)
$D_{Net}(t)$	W	時点 t における正味の需要電力
$G_{Surplus}(t)$	W	時点 t における余剰電力
$e_{leveling}$	W	1 日の負荷平準化直線の電力 ($1/T \sum_{t=0}^T P(t) (P(t) > 0)$)

表 2 EV の充放給に関する各文字式の説明

項目	説明
$E_{EV}Capacity_j$	EV j の最大バッテリー容量 ($0 \leq j \leq J$)
$E_{EV,j}(t)$	時刻 t における EV j のバッテリー残量
$t_{HomeDeparture,j}, t_{HomeArrival,j}$	EV j の家を出発, 家に到着した時刻
$t_{OfficeDeparture,j}, t_{OfficeArrival,j}$	EV j のオフィスを出発, オフィスに到着した時刻
$E_{EV}Outward,j, E_{EV}Homeward,j$	EV j の出勤, 退勤に使用した電力量
$\beta_{EV}Max, \beta_{EV}Min$	バッテリーの損耗を考慮したバッテリーの上限割合, 下限割合
$E_{EV}Max,j, E_{EV}Min,j$	$E_{EV}Battery,j \cdot \beta_{EV}Max, E_{EV}Battery,j \cdot \beta_{EV}Min$
$p_{EV}ChargeMax, p_{EV}DischargeMax$	EV の充放電装置の最大充電速度, 最大放電速度
$\eta_{EV}Charge, \eta_{EV}Discharge$	EV の充電効率, 放電効率
$P_{EV,j}^{Chargeable}, P_{EV,j}^{Dischargeable}$	EV j の充電可能電力, 放電可能電力
$E_{EV,j}^{Charge}(t), E_{EV,j}^{Discharge}(t)$	時刻 t における EV j の充電電力量, 放電電力量

4 負荷平準化のシミュレーション

4.1 負荷平準化の目標電力

この負荷平準化が完全に達成された状態は、マイクログリッドが外部から受け取る電力である正味の需要電力が常に一定の状態である。この一定の値を決め方はいくつか考えられるが、本研究では正味の需要電力の平均値をこの 1 日における負荷平準化の目標電力 $e_{leveling}$ とし、以下のように表す。

$$e_{leveling} = 1/T \sum_{t=0}^T D_{Net}(t) \quad (11)$$

4.2 EV による負荷平準化

負荷平準化を行うためには $D_{Net}(t)$ と $e_{leveling}$ を比較し、各時点 t において充給電のどちらを行うか決定する。すなわち $D_{Net}(t)$ が $e_{leveling}$ を下回っていれば EV に充電することで $D_{Net}(t)$ を増加させ、 $D_{Net}(t)$ が $e_{leveling}$ を上回っていれば EV から給電し $D_{Net}(t)$ を減少させることで $e_{leveling}$ と一致させる。このとき EV には 3.2 節で述べた制約があり負荷平準化を完全に達成することはできない。そのためデータの変動を表す一般的な指標として用いられる標準偏差 [27] を用いて $D_{Net}(t)$ がどれだけ平準化されているかを評価する。 $D_{Net}(t)$ の標準偏差は以下のように表わされる。

$$S_{Dnet} = \sqrt{1/T \sum_{t=0}^T (D_{Net}(t) - e_{leveling})^2} \quad (12)$$

4.3 据え置き型バッテリーによる負荷平準化

4.2 節と同様に $D_{Net}(t)$ と $e_{leveling}$ を比較し、各時点 t にお

いて充給電のどちらを行うか決定する。このとき据え置き型バッテリーは $D_{Net}(t)$ と $e_{leveling}$ が一致するように充給電を行う。これにより負荷平準化を完全に達成するために必要な据え置き型バッテリーの必要蓄電容量 $B_{required}$ を算出することができる。

$$B_{required} = \max_t \{E_{Battery}(t)\} - \min_t \{E_{Battery}(t)\} \quad (13)$$

4.4 EV の充電プラン

通勤に利用される EV を用いて V2G を行う場合、バッテリーの有効活用のためには夜間の充電量を管理することが重要である。本節では 2 種類のナイーブな充電プランである「出発時満充電」「到着時ゼロ充電」と我々の提案する「動的充放電計画」[28] を説明する。

• 出発時満充電

通勤に利用される EV は夜間に満充電状態となり ($E_{EV,j}(t_{HomeDeparture,j}) = E_{EV}Max,j$)、その後出勤する (図 3 の Full charging on departure)。事業所に駐車中の EV は必要に応じて発電電力の充電または事業所への給電を行う。そのためこの充電プランにおける EV への充電電力量と、EV からの放電電力量の最大値は以下で表される。

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^T E_{EV,j}^{Charge}(t) &\leq E_{EV}Outward,j \\ \sum_{t=0}^T E_{EV,j}^{Discharge}(t) &\leq E_{EV}Max,j - E_{EV}Outward,j + \\ &\sum_{t=0}^T E_{EV,j}^{Charge}(t) - E_{EV}Homeward,j \end{aligned}$$

• 到着時ゼロ充電

EV への充電電力量は夜間に EV に充電する電力を減らすことによって増加させることができる。このとき充電電力

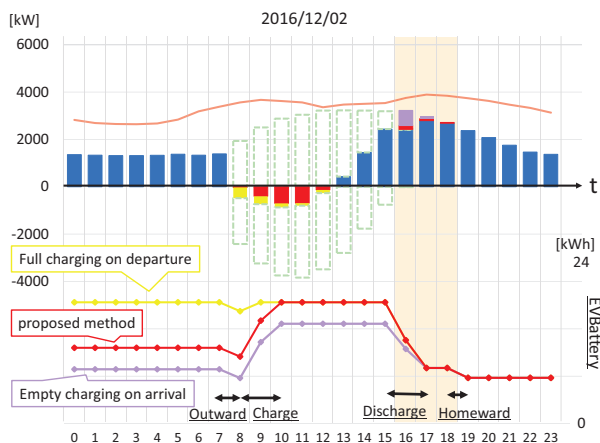


図3 ある1日の動的充放電計画の例

量が最大となるのは夜間充電電力を出勤に必要な電力のみ ($E_{EV,j}(t_{HomeDeparture,j}) = E_{EVMin,j} + E_{EVOutward,j}$) とする場合である (図3の Empty charging on arrival). そのためこの充電プランにおけるEVへの充電電力量と、EVからの放電電力量の最大値は以下で表される。

$$\sum_{t=0}^T E_{EV,j}^{Charge}(t) \leq E_{EVMax,j} - E_{EVMin,j}$$

$$\sum_{t=0}^T E_{EV,j}^{Discharge}(t) \leq \sum_{t=0}^T E_{EV,j}^{Charge}(t) - E_{EVHomeward,j}$$

- 動的充放電計画

「出発時満充電」ではEVからの放電電力量が最大となり「到着時ゼロ充電」ではEVへの充電電力量が最大となる。そのため事前にある1日の発電電力の値が予測可能な場合、その発電電力量からEVの夜間充電量を決定することで、EVへの充電電力量と、EVからの放電電力量のそれぞれを最大とすることが可能となる (図3の proposed method). そのためこの充電プランにおけるEVへの充電電力量と、EVからの放電電力量の最大値は以下で表される。

$$E_{EV,j}(t_{HomeDeparture,j}) = E_{EVMax,j} - \sum_{t=0}^T E_{EV,j}^{Charge}(t) \geq E_{EVMin,j} + E_{EVOutward,j}$$

$$\sum_{t=0}^T E_{EV,j}^{Charge}(t) \leq E_{EVMax,j} - E_{EVMin,j}$$

$$\sum_{t=0}^T E_{EV,j}^{Discharge}(t) \leq E_{EVMax,j} - E_{EVHomeward,j}$$

5 シミュレーション結果と評価

本章では、スマートグリッドにおける再生可能エネルギーのマッチングシミュレーションを行う。本稿では横浜国立大学の実データを用いて負荷平準化シミュレーションを日ごとや年間で行い評価を行う。5.2節ではEVのみによる充電電のシミュレーションを行う。EVのみでは負荷平準化を完全には達成できないため、標準偏差により評価する。5.3節では据え置き型バッテリーを用いた充電電のシミュレーションを行う。据え置き型バッテリーにより負荷平準化は完全に達成されるため、そ

のために必要となるバッテリー容量について評価する。

5.1 エネルギーライフログの取得

本節では、評価に用いるために実際に取得したエネルギーライフログについて述べる。集計対象は2017年の1年間の平日246日とした。

スマートグリッドの需要電力量ログ

横浜国立大学の学内限定で公開されている電力データを用いた¹。これは敷地を17区画に分割した電力データで、2011年10月以降継続的に収集されている。

EVのエネルギー消費推定ログ

我々は先行研究においてある被験者1名の通勤記録を取得している。今回は2016年11月4日の被験者の通勤ログからECOLOGによって出退勤エネルギーを推定した。また、同日において横浜国立大学のキャンパスを出入りする全ての普通乗用車の入退構時刻を記録した。この時の台数(559台)を本来の横浜国立大学に存在する車の80%程度と仮定し、出退勤エネルギーが仮定のEVセットを699台用意し、合計700台のシミュレーションを行う。想定するEVは日産LEAF(バッテリー容量:40kWh)とした。また、EVセットのその他のパラメータ設定を表3に示す。さらにEVの充電や給電を行う装置として日産LEAF to Home²を想定し、その仕様から充電速度と給電速度の上限を6.0kW、充電効率を90%、給電効率を85%とした。

再生可能エネルギーの発電ログ

日本工業規格により定められているPVの発電量推定を用いる。推定に必要なオープンデータの取得方法、システムの設定条件を表4に示す。またPVを設置する場所は横浜国立大学の建物の屋上(61355m²)とし、建物の屋上面積は横浜国立大学の公開している建物情報から取得した¹。

5.2 EVによる負荷平準化

EVによる負荷平準化の評価として「EV充給電なし」をベースラインとし、EVの充放電を2つの充電プラン「出発時満充電」「動的充放電計画」で行った場合と比較を行う。

図4はある1日のマイクログリッドの需要電力と発電電力の推移を表したものである。図5~図7はこの1日におけるEVを用いた充給電による電力推移の変化を示す。図5は負荷平準化の目標となる $e_{levelong}$ を表したものである。図5のグラフの青い棒グラフが正味の需要電力 $D_{Net}(t)$ であり、この平均値が $e_{levelong}$ である。このときの $D_{Net}(t)$ の標準偏差 S_{Dnet} は1150kWであった。マイクログリッド内のEVを用いてV2Gを行ったときの電力推移の様子を図6と図7に示す。図6は「出発時満充電」で負荷平準化を行った場合であり、8時から13時

1: 横浜国立大学施設部, 入手先:(<http://shisetsu.ynu.ac.jp/gakugai/shisetsu/>) (2018/07/30 アクセス).

2: 日産: LEAF to Home とは, 入手先: (<http://ev.nissan.co.jp/LEAFTOHOME/>) (2018/07/30 アクセス).

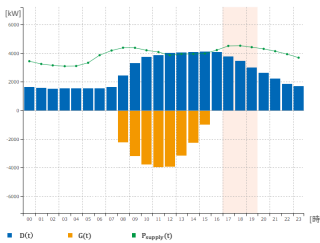


図4 マイクログリッドの需要電力と発電電力の推移

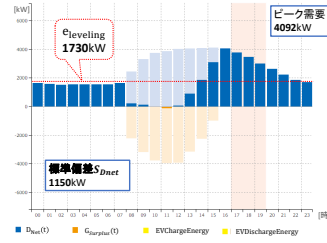


図5 正味の需要電力の推移と負荷平準化の目標電力 $e_{leveling}$

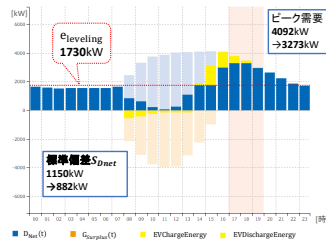


図6 「出発時満充電」でV2Gを行った場合の電力推移

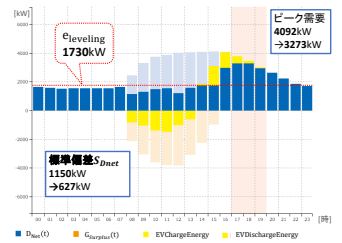


図7 「動的充放電計画」でV2Gを行った場合の電力推移

表3 自動車の消費電力ログに関するパラメータ設定

	台数	消費エネルギー	備考
実データ	1台	outward:3.55kWh, homeward:3.23kWh	消費エネルギーはECOLOG推定より導出
仮想データ	699台	0.69kWh~7.66kWh	一様乱数により割り当て

表4 PV発電量算出のための気象データの取得方法・システムの設定条件

項目	取得方法・設定条件
アレイ出力	系統連系形PVシステムを想定する。設置方法は架台設置型とし、アレイ素材には多結晶シリコンを選択した ³ 。
日射量	横浜市環境創造局のホームページから1時間あたりの水平面日射量を取得 ⁴ 。NEDOの日射量データベース ⁵ と同様の手法を用いてPVの設置方位を真南、傾斜角30として傾斜面日射量を推定。
気温	気象庁のホームページ ⁶ より取得。

までEVに充電を行い、14時から20時まで給電を行っている。このときの $D_{Net}(t)$ の標準偏差 S_{Dnet} は882kWとなり減少させることができた。図7は「動的充放電計画」で負荷平準化を行った場合であり、標準偏差 S_{Dnet} はさらに減少し627kWとなった。しかし16時から20時の電力需要は $e_{leveling}$ より高く、完全に負荷平準化が達成されているわけではない。これは今後EVのバッテリー容量の増加により解決できると考える。

前述のような負荷平準化のためのV2Gを日ごとに行った場合年間でのどのような変化が起こるのかをヒストグラムで示す。図8、図9ともに横軸は電力[kW]の区間、縦軸はそのような日があったのかを示す。図8は日ごとの最大消費電力、図9は日ごとの S_{Dnet} の充電プランごとのヒストグラムである。青色がPVのみ導入された「EV充給電なし」、黄緑色がEVを導入し「出発時満充電」、オレンジ色が「動的充放電計画」の場合を表す。図8より、「EV充給電なし」の場合と比較してEVを導入した「出発時満充電」、「動的充放電計画」でV2Gを行った場合の方がヒストグラムが左へ移動している。また「出発時満充電」と「動的充放電計画」では給電量が変わらないためヒストグラムの変化は見られない。図9は「EV充給電なし」の場合と比較してEVを導入し「出発時満充電」でV2Gを行った場合の方がヒストグラムが左へ移動している。また、「動的充

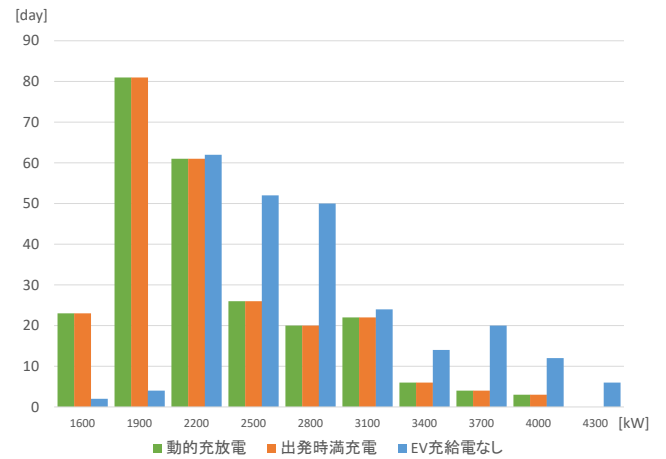


図8 充電プランごとの日ごとの最大消費電力のヒストグラム(2017年)

放電計画」の場合は「出発時満充電」と比較してさらにヒストグラムが左へ移動していることがわかる。これは「動的充放電計画」が「出発時満充電」よりも多くの再生可能エネルギーの発電電力を充電することができるからである。

5.3 据え置き型バッテリーを用いた負荷平準化

据え置き型バッテリーのみによる負荷平準化

据え置き型バッテリーのみで負荷平準化を完全に達成するために必要となる必要蓄電容量の年間の最大値を、太陽光パネルの屋上への設置割合ごとに示したグラフが図10である。グラフから、屋上への設置割合が70%までは徐々に減少し、80%からは増加していることがわかる。これは、必要蓄電容量が最大となる日が70%以下と80%以上で異なっているためである。70%以下では太陽光パネルの発電量が少ないために、負荷平準化のために給電電力が多く必要となる。80%以上では発電量が多いために、それを受け取るバッテリーの空き容量が多く必要となる。

3: 小西正暉, 鈴木竜宏, 蒲谷昌生: 太陽光発電システムがわかる本, オーム社出版(2011).

4: 横浜市環境創造局, 入手先:(<http://www.city.yokohama.lg.jp/kankyo/>)(2018/07/30 アクセス).

5: 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 日射量データベース, 入手先:(<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>)(2018/07/30 アクセス).

6: 気象庁, 入手先:(<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>)(2018/07/30 アクセス).

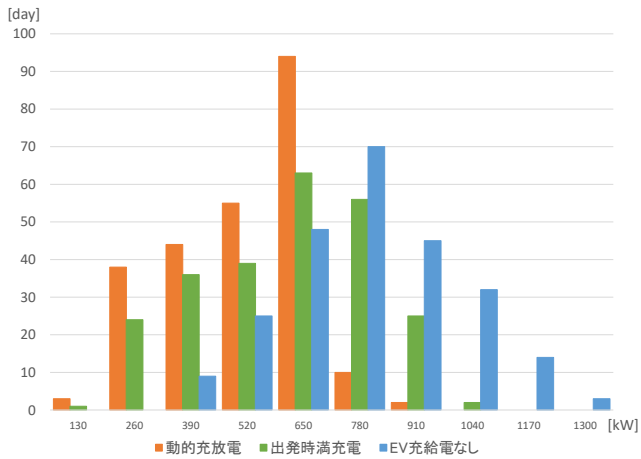


図9 充電プランごとの日ごとの S_{Dnet} のヒストグラム (2017年)

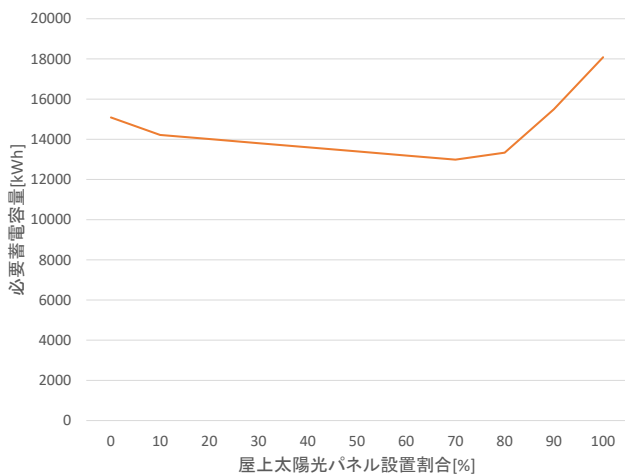


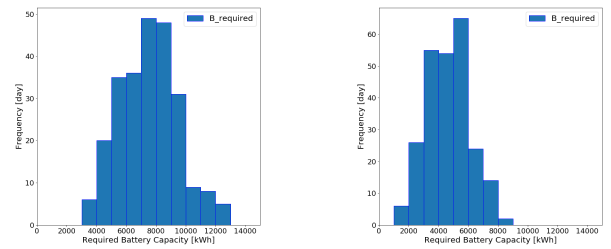
図10 屋上太陽光パネル設置割合毎の負荷平準化のために必要となる必要蓄電容量の年間の最大値

EV と据え置き型バッテリーによる負荷平準化

上記の結果から、EV と据え置き型バッテリーを組み合わせた際の据え置き型バッテリーの必要蓄電容量を算出する。以下では図10において必要蓄電容量が最も少なかった屋上太陽光パネル設置割合70%と最も必要蓄電容量が多かった100%について取り上げる。

図11は屋上太陽光パネル設置割合が70%のときの1日ごとの必要蓄電容量のヒストグラムであり、(a)が据え置き型バッテリーのみ、(b)がEV と据え置き型バッテリーを組み合わせたときのものである。図11(a)に比べ図11(b)のヒストグラムが全体的に左へと移動しており、最大値も減少していることがわかる。これは給電電力が必要のために必要蓄電容量が大きくなってしまっていたような日に対して、EV が給電を行うことによって据え置き型バッテリーの必要蓄電容量が減少したためと考えられる。図11(b)より必要蓄電容量の最大値は9000kWhである。これは日産 LEAF40kWh 型の225台分に相当する。

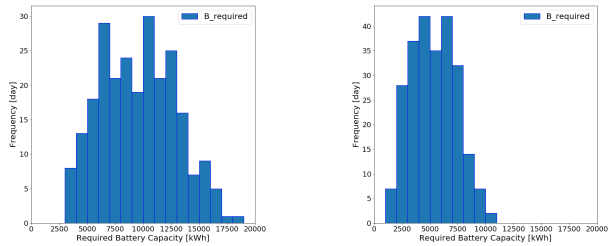
図12は屋上太陽光パネル設置割合が100%のときの1日ごとの必要蓄電容量のヒストグラムであり、(a)が据え置き型バッテリーのみ、(b)がEV と据え置き型バッテリーを組み合わせた



(a) 据え置き型バッテリーのみで負荷平準化を行った場合

(b) EV と据え置き型バッテリーで負荷平準化を行った場合

図11 必要蓄電容量のヒストグラム (設置割合70%)



(a) 据え置き型バッテリーのみで負荷平準化を行った場合

(b) EV と据え置き型バッテリーで負荷平準化を行った場合

図12 必要蓄電容量のヒストグラム (設置割合100%)

ときのものである。図11と同様図12(a)と比べ図12(b)のヒストグラムが左へと移動していることがわかる。これはバッテリーの空き容量が必要なために必要蓄電容量が大きくなってしまっていたような日に対して、EV が空き容量を提供したことによって据え置き型バッテリーの必要蓄電容量が減少したためと考えられる。図12(b)より必要蓄電容量の最大値は11000kWhである。これは日産 LEAF40kWh 型の275台分に相当する。

以上より、太陽光パネルの設置割合にかかわらず、700台のEVの充給電に加え、EV300台程度に相当する据え置き型バッテリーを利用することで、マイクログリッド全体の負荷平準化が達成できることが示された。

6 まとめと今後の課題

再生可能エネルギーの発電設備と蓄電設備を構成要素としたマイクログリッドに対して、エネルギーライフログDBを用いて再生可能エネルギーのマッチングシミュレーションを行った。EVの充給電に加え据え置き型バッテリーの利用を想定し、横浜国立大学の実データを用いて有用性を評価した。シミュレーションからマイクログリッドにおけるEVの充給電による貢献と、負荷平準化を達成するために必要となる据え置き型バッテリーの容量を算出した。

今後の課題としては、自動車の走行ログに関して、一部想定とは異なるデータを用いたため、これらを実際に収集したログで検討を行う必要がある。またシミュレーションの正確性の検討についての実証実験を行う。

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

- [1] 総務省. 平成 29 年度版情報通信白書. <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/pdf/index.html>. Last accessed: 8 January 2020.
- [2] 経済産業省. 新産業構造ビジョン. <http://www.meti.go.jp/press/2017/05/20170530007/20170530007-2.pdf>. Last accessed: 8 January 2020.
- [3] 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.
- [4] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation”, *Applied Energy*, Vol.137, pp.511-536, 2015.
- [5] Kang Miao Tan, Vigna K. Ramachandaramurthy, Jia Ying Yong, “Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.53, pp.720-732, 2016.
- [6] 合田忠弘, 諸住哲, “スマートグリッド教科書”, インプレスジャパン, 2011.
- [7] 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”.
- [8] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構. 風力発電導入ガイドブック. <https://www.nedo.go.jp/content/100079735.pdf>, Last accessed: 8 January 2020.
- [9] W. Kempton, J. Tomic, “Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue”, *Journal of Power Sources*, Vol.144, No.1, pp.268-279, 2005.
- [10] W. Kempton, J. Tomic, “Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy”, *Journal of Power Sources*, Vol.144, No.1, pp.280-294, 2005.
- [11] B. Jansen, C. Binding, O. Sundstrom, D. Gantenbein, “Architecture and Communication of an Electric Vehicle Virtual Power Plant”, *IEEE Int'l Conf. Smart Grid Communications*, pp.149-154, 2010.
- [12] Yifeng He, Bala Venkatesh and Ling Guan, “Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Electric Vehicles”, *IEEE Transaction on Smart Grid*, Vol.3, No.3, pp.1095-1105, 2012.
- [13] Evangelos L. Karfopoulos, Nikos Hatziaargyriou, “Distributed Coordination of Electric Vehicles Providing V2G Services”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.31, No.4, pp.2834-2846, 2015.
- [14] M. H. K. Tushar, C. Assi, M. Maier, M. F. Uddin, “Smart Microgrids: Optimal Joint Scheduling for Electric Vehicles and Home Appliances”, *IEEE Transaction on Smart Grid*, Vol.5, No.1, pp.239-250, 2014.
- [15] Huang Qilong, Qing-Shan Jia, 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, 2018.
- [16] Hiroshi Kikusato, Kohei Mori, Shinya Yoshizawa, Yu Fujimoto, Hiroshi Asano, Yasuhiro Hayashi, Akihiko Kawashima, Shinkichi Inagaki, 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, 2019.
- [17] A. Arikan, R. Jin, B. Wang, S. Han, K. Suh, P. Zhang, “Optimal Centralized Renewable Energy Transfer Scheduling for Electrical Vehicles”, *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp.247-252, 2015.
- [18] Ali Ahmadian, Mahdi Sedghi, Ali Elkamel, Michael Fowler, Masoud Aliakbar Golkara, “Plug-in electric vehicle batteries degradation modeling for smart grid studies Review assessment and conceptual framework”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.81, No.2, pp.2609-2624, 2018.
- [19] John Wang, Justin Purewal, Ping Liu, Jocelyn Hicks-Garner, Souren Soukiazian, Elena Sherman, Adam Sorenson, Luan Vu, Harshad Tataria, Mark W. Verbrugge, “Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickel-cobalt-manganese oxide + spinel manganese oxide positives Part 1, aging mechanisms and life estimation”, *Journal of Power Sources*, Vol.269, No.10, pp.937-948, 2014.
- [20] E. Sarasketa-Zaabala, I. Gandiaga, E. Martinez-Laserna, L.M. Rodriguez-Martinez, I. Villarreal, “Cycle ageing analysis of a LiFePO4/graphite cell with dynamic model validations: Towards realistic lifetime predictions”, *Journal of Power Sources*, Vol.275, No.1, pp.573-587, 2015.
- [21] D. Wang, J. Coignard, T. Zeng, C. Zhang, S. Saxena, “Quantifying electric vehicle battery degradation from driving vs. vehicle-to-grid services”, *Journal of Power Sources*, Vol.332, pp.193-203, 2016.
- [22] 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.
- [23] 廣田幸嗣, 船渡寛人, 三原耀儀, 出口欣高, 初田匡之. 電気自動車工学. 森北出版, 2017.
- [24] M. Eshani, Y. Gao, S. Gay, and A. Emadi. Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles 2nd. Edition. Power electronics and applications series, CRC press, 2010.
- [25] 出縄誠, 出口達, 富井尚志, “EV エネルギー消費ログ DB を用いた多様な可視化システムと運転状況に基づく情報の提示”, *日本データベース学会論文誌*, Vol.12, No.1, pp.127-132, 2013.
- [26] 資源エネルギー庁. “発電量シミュレータ: おひさまパワー! 太陽光発電”. http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/ohisama_power/sim/. Last accessed: 18 January 2017.
- [27] L.Xua, Y.Pana, M.Linb, Z.Huangc, “Community load leveling for energy configuration optimization: Methodology and a case study”, *Sustainable Cities and Society*, Vol.35, pp.94-106, 2017.
- [28] 茨木隆兵, 田中雄哉, 富井尚志, “エネルギーライフログデータベースと V2G 技術を用いた再生可能エネルギーとピーク需要を平衡させるシミュレーションシステム”, 第 15 回 ITS シンポジウム 2017, 3-B-10, 2017.