

エネルギーライフログDBを用いた EVの動的充放電計画の実証実験

石田 卓也[†] 茨木 隆兵^{††} 小池 風樹[†] 猪谷 悠^{†††} 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

^{††} 横浜国立大学大学院 環境情報学府 情報メディア環境学専攻 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

^{†††} 横浜国立大学工学部 数物・電子情報系学科 〒240-8501 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: †{ishida-takuya-vt,ibaraki-ryuhei-gh,koike-fuki-xy,itani-yu-hf}@ynu.jp, ††tommy@ynu.ac.jp

あらまし 我々は先行研究として、スマートグリッドにおいて日ごとにEVの充放電のタイミングを動的に変更する「動的充放電計画」を提案した。「動的充放電計画」を行うことにより、日ごとのエネルギーバランスが改善されることをシミュレーションにより示した。本研究では、実環境でスマートグリッドを構成し、動的充放電計画の実証実験を行う。実験環境として、グリッドの最小構成単位としてオフィス1部屋とEV1台およびPVを用い、一般公開される天気予報をもとに充放電計画を立て実験を行った。結果としてエネルギーバランスの観点から動的充放電計画の有用性を示した。

キーワード V2G, スマートグリッド, エネルギーライフログ, 電気自動車, EV, データベース, サイバーフィジカルシステム

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]。

一方で、近年、各国がCO₂排出削減を掲げ、様々な取り組みがなされ[2]、CO₂排出を抑制しつつエネルギー消費を行う「持続可能な社会」の実現が求められている。具体的な方法の1つとして、再生可能エネルギーを有効活用することが挙げられる。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であるため、既存の電力系統への影響を考慮することも重要である。これらのことから電力の需要と供給をバランスさせることの重要性が高まっている。これに対して、建物と再生可能エネルギーを構成要素として地域内で電力の地産地消をするスマートグリッドの導入と実証実験が各地で行われている。また、エネルギーバランスを実現する媒体として電気自動車(EV: Electric Vehicle)が注目を集めている。EVは非走行時に電力系統との間でエネルギーを融通すること(V2G: Vehicle to Grid)ができる。例えば不安定な再生可能エネルギーの発電電力量を充電することで電力の地産地消に貢献し、充電した電力を社会の中で最も需要の高いピーク時に給電することでピークカットに貢献できる。このようにV2G技術は、車での通勤を行うようなスマートグリッドに応用することが可能である。

そこで我々は、ライフログとオープンデータを組み合わせて、スマートグリッド社会の予想に役立てられるようなデータベ

スを構築し、これをエネルギーライフログDBと名付けた。グリッドの需要電力や発電電力、社会的な電力需要はその場所の人の動きや気象状況によって日々異なる。そのため、汎用的なDBモデルでの分析は難しい。そこで、エネルギーライフログDBを用いることで、「そこだけ」に特化した分析が行える。我々は、建物と再生可能エネルギーに加え、EVを有効活用するスマートグリッドを想定環境とした。この環境において、エネルギーライフログDBを用いることで、スマートグリッドの導入効果のシミュレーションを行えることを確認した。

また我々は、日々変動する気象に合わせ、事前にEVがオフィスに到着する時点でのバッテリー残量や、EVの充放電時間を動的にコントロールする「動的充放電計画」を提案した。動的充放電計画により、電力の地産地消とピークカットをより効果的に行うことができる。これを、エネルギーライフログDBを用いて動的充放電計画のシミュレーションを行い、有用性を示した[3]。

本稿では、マイクログリッド環境の最小単位であるオフィス内の1部屋とEV1台、および太陽光発電(PV: PhotoVoltaic)という環境を実際に実装し、電力の地産地消として余剰電力削減、およびピークカットを目標に、エネルギーライフログDBに基づいてEVのバッテリー残量、充放電時間をコントロールし、動的充放電計画を実運用する。それにより手に入る実データを用い、どれくらいピークカットができたのか、どのくらい余剰電力を削減できたのかを示す。また、これにより我々のシミュレーションの妥当性を検証する。

2 研究背景

2.1 関連研究

エネルギーのバランスは社会的な課題となっており、様々な取り組みがされている。特に、エネルギーバランスへの貢献が期待されているスマートグリッドは社会的に注目されている [4]. Huang ら [5] は PV と蓄電池を持つ複数の家庭で構成されるスマートグリッドを提案し、スマートグリッド内で発生する余剰電力を家庭間でやりとりすることで、電力供給元からの電力コストを 20%以上削減できることを示した。馬場ら [6] 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。Simm ら [7] は再生可能エネルギーの発電電力と需要電力をバランス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。

また近年、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電力網 (Grid : V2G) 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 [8] 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 [9] は複数の EV 群を 1 つの仮想的な発電所としてみならず 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 [10] 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。Lam ら [11] 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。日本国内の V2G 関連の研究に目を向けると、横浜市・豊田市・けいはんな・北九州市の 4 都市では、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 [12]。また岡山県立大学では、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 [13]。

また、交通網における走行ルートの最適化や運転者へのフィードバックによって、走行時の消費電力をさらに省電力化可能であることが示されている [14] [15]。中でも Kurtulus ら [16] は、EV の走行経路の最適化によって、消費エネルギーだけでなくバッテリーの損耗の削減も果たした。こういったことから、V2G 利用可能な電力量は今後も増加することが考えられる。

2.2 想定環境

本研究で想定するスマートグリッド、マイクログリッドの概略を図 1 に示す。家庭のマイクログリッド (Microgrid at Home)

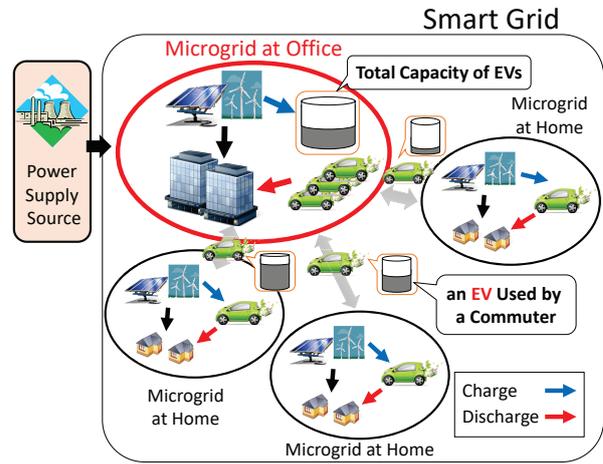


図 1 想定スマートグリッド環境

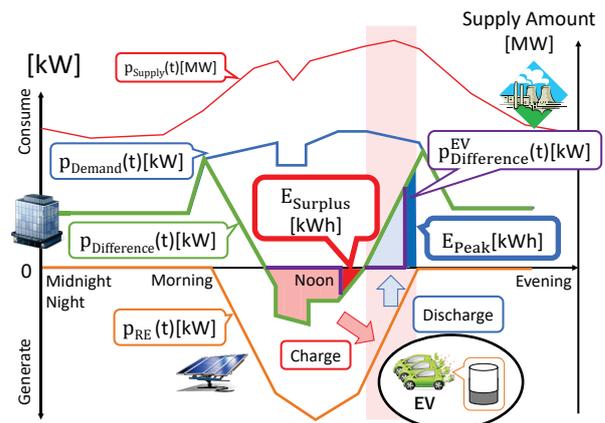


図 2 マイクログリッドの 1 日の電力推移

には EV が備えられており、日常の通勤を EV で行うことを前提とする。EV は日中には通勤のために事業所のマイクログリッド (Microgrid at Office) に集まる。EV による通勤先である事業所のマイクログリッドには、電力負荷としての建物と PV や風力発電などの再生可能エネルギー発電施設を備えている。また、事業所には V2B (Vehicle to Building) 設備が備わっており、駐車している EV をバッテリーとして利用し充電 (Charge) や給電 (Discharge) が可能である。EV は空間を移動するバッテリーの役割を持つだけでなく、夜間から昼間へ、のようにエネルギーを時間的にも移動させる役割を持つ。EV にピーク時間外に充電したエネルギーを昼間の時間帯には需要側に給電することによって、EV はエネルギー消費のピークシフトに貢献する。加えて、天候に依存し不安定な再生可能エネルギーが需要を上回って発電したときに、EV は発電電力の一時預かりに寄与する。これを実現するためには、電気エネルギーの料金制度や売買手法など、スマートグリッド社会に対して新たな制度の制定を必要とするが、これは本研究では対象外とする。

次に、事業所のスマートグリッドにおける建物の 1 日の需要電力と再生可能エネルギーによる発電電力、EV バッテリーの電力推移をを図 2 に示す。図中の文字の説明は表 1 に示す。この想定環境の特徴は、再生可能エネルギーを送電網に流さず、マイクログリッド内で消費することにある (エネルギーの地産地消)。このような意図から需要電力を正值 ($p_{Demand}(t) \geq 0$),

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
$p_i(t)$	W	マイクログリッドにおける電化製品 i の時点 t における電力 ($1 \leq i \leq m$)
$p_{Demand}(t) = \sum_{i=1}^m p_i(t)$	W	マイクログリッドの時点 t における需要電力 ($p_{Demand}(t) \geq 0$) (図 2 青線)
$p_{RE}(t)$	W	時点 t における再生可能エネルギーの発電電力 ($p_{RE}(t) \leq 0$) (図 2 橙線)
$p_{Supply}(t)$	W	時点 t における電力供給元の供給電力 (図 2 赤線)
$p_{Difference}(t) = p_{Demand}(t) + p_{RE}(t)$	W	時点 t における需要・発電差 (図 2 緑線)
$p_{Difference}^{EV}(t)$	W	時点 t における EV 導入後の需要・発電差 (図 2 紫線)
$T_{RESurplus} = \{t p_{Difference}(t) < 0\}$		再生可能エネルギーの余剰電力が発生する時間集合
T_{Peak}		電力ピーク時間帯の時間集合
$E_{Surplus}$	Wh	EV 導入後の再生可能エネルギー余剰電力量
E_{Peak}	Wh	再生可能エネルギー・EV 導入後のピーク時間帯のマイクログリッドの需要電力量
$p_{RE}^{Supply}(t)$	W	時点 t における再生可能エネルギーの発電電力の建物への供給電力
$p_{EV}^{Discharge}(t)$	W	時点 t における EV から建物への給電電力

再生可能エネルギーによる発電電力を負値 ($p_{RE}(t) \leq 0$) に設定した。この環境において、EV は「移動するバッテリー」の役割を担う。

仮に再生可能エネルギーのみを導入した場合、再生可能エネルギーによる発電電力 (橙線) を建物に給電することでマイクログリッド内の需要電力 (青線) は需要・発電差 (緑線) に変化する。再生可能エネルギーは天候により発電量が変動するため、需要・発電差は時間によって正にも負にもなり得る。

マイクログリッド内で発電された電力は、エネルギーの移動コストや外部送電網の維持コストを考慮すると可能な限りマイクログリッド内で消費するのが望ましい。また社会的には、電力ピーク時間帯に系統から供給される電力を下げるのが要求されている。

そこで需要・発電差が負の場合は EV へ充電し、ピーク時間帯には余剰電力および通勤では使用しなかった EV の電力を給電する。EV と電力をやり取りすると、需要・発電差は紫線に変化する。このとき EV のバッテリーでは受け入れることができずに余剰電力量 (赤で塗り潰した領域) が発生してしまう場合や、EV のバッテリー残量ではピーク時需要電力量を削減しきれない (青で塗り潰した領域) 場合も存在する。このように本研究では、余剰電力量と、ピーク時需要電力量をできるだけ減らすことを目標とする。

2.3 エネルギーライフログ DB

エネルギーライフログ DB には以下のログを蓄積する。

- マイクログリッドの需要電力ログ

我々の先行研究である SEE-Con [17] によって、図 3 の下段のように電化製品 1 台ごとの電力を「有効」、「無駄」に色分けすることが可能となった。これをマイクログリッドを構成する全ての部屋に実装し集約することで、マイクログリッド全体で仕事に使われた需要電力量のみを求めることができる。なお、サンプリング間隔は 1 分とした。

- EV のエネルギー消費推定ログ

我々の先行研究である ECOLOG [18] により、既存のガソリン車にスマートフォンのような簡易なセンサーを搭載すること

で、走行時の GPS ログや加速度ログからもし EV に置き換えた場合のエネルギー消費を推定することができるようになった。図 4 に ECOLOG の全体像を示す。ECOLOG により、マイクログリッドに所属している自動車を EV に置き換えた場合、いつ、どの車が、どれくらいのバッテリー残量なのか、帰宅するためにどれくらいの電力を残す必要があるのかを計算しておくことができる。エネルギー計算を簡単にするため、サンプリング間隔は 1 秒とした。

- 再生可能エネルギーの発電推定ログ

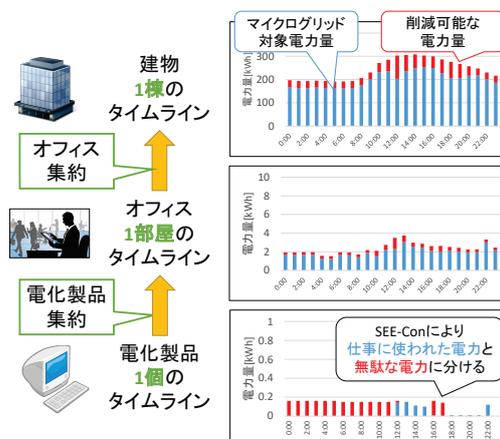


図 3 マイクログリッドの需要電力量

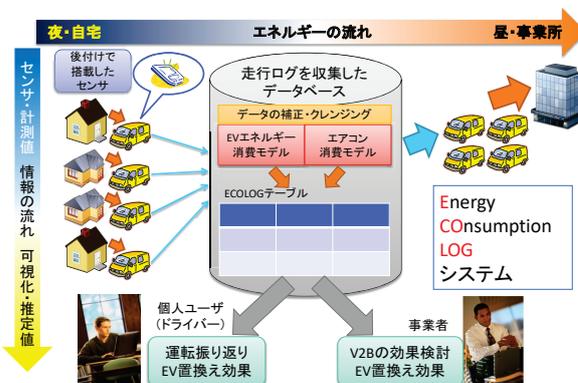


図 4 ECOLOG の全体像

再生可能エネルギーは太陽光、風力、水力、地熱、バイオマスなどが挙げられるが、マイクログリッドにおける再生可能エネルギーとしては、太陽光や風力が比較的容易に設置可能である。本研究では、諸外国に比べて地形が複雑な日本でも導入が進んでいる PV を再生可能エネルギー源として発電量を予想する。PV の月間発電量推定については日本工業企画で推定方法が定められており、「アレイ出力」、「日射量」、「気温」から求めることができる [19]。

- 気象ログ

日本の気象に関しては、気象庁により公開されている。[21] 本研究においては、3.3 で述べる動的充放電計画の「計画」に前日時点での気象予報を用いる。

マイクログリッドの導入効果を導出するためには、相殺差分電力の導出やピーク時間帯の決定が必要である。しかし、前述した4つのログはサンプリング間隔が様々である。そのためエネルギーライフログ DB ではこれらのログのサンプリング間隔に対して、最小公倍数となる時間（1時間）で粒度を揃えた。

3 動的充放電計画

3.1 動的充放電計画

マイクログリッドにおいて季節や天候によってグリッドの需要電力や再生可能エネルギーの発電電力は大きく変動する。そのため年間を通して需要と供給を平衡させることは難しい。そこで我々は、余剰電力量の削減、ピークカットを効果的に行うために充放電時間を変えることができる EV に着目した。例えばピーク時需要が大きい場合、夜間に EV を満充電にしておき、ピーク時間帯に事業所に供給する。また、昼の余剰電力が大きい場合、その電力を受け取るために家庭では EV に出勤に必要な最低限の量だけ充電して出勤し、バッテリーの空き容量を確保しておいて、昼に充電する。このように、家庭の出発時のバッテリー充電率を変化させるだけで、柔軟な電力のやり取りが可能となる。さらにグリッドにおいて、余剰電力が出るタイミングや電力供給元のピーク時間帯での各 EV の充電計画、給電計画を正しく行うことができれば、より効果的に余剰電力量の削減、ピークカットを行える。

そこで我々は、余剰電力の削減、ピークカットを効果的に行うために、EV1 台ごとの「出発時のバッテリー充電率量」、「時点ごとの充電量」、「時点ごとの給電量」の3つを事前に計画することを「動的充放電計画」と定義する。

ある1日の動的充放電計画の例を図5に示す。上部のグラフは1時間ごとの PV や EV と電力のやり取りを行った場合の電力量を示す。下部は同じ日のある EV のバッテリー残量の推移を表す。黄色線は家庭を満充電で出勤した場合を表す。紫色の線は出勤に必要な分のみを家庭で充電し出勤した場合を表す。これらとともに1時間ごとの充放電量の計画は立てずに電力のやり取りを行ったものとする。赤線は動的充放電計画を行った場合を表す。この日は、この EV の出勤後にマイクログリッドにおいて余剰電力が発生し、EV への充電が行われる。このとき動的充放電計画においては、余剰電力を受け取り満充電と

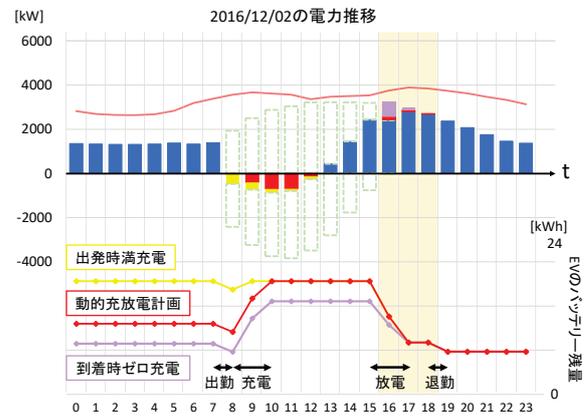


図5 ある1日の動的充放電計画の例

なった。黄色線はバッテリーの空き容量が少なく余剰電力を十分に受け取り切れず、上部の黄色部分しか受け取れなかった。一方で、紫色線は余剰電力を受け取ってなおバッテリーに空き容量があった。続いてピーク時間になると、EV からマイクログリッドへと給電を行う。この時、動的充放電計画と黄色線は満充電になっているため、十分な量の給電を行えた。一方で、紫色線は満充電になっておらず、放電量が少なく、上部の紫色部分しか削減できていない。

このように、動的充放電計画では、出発時のバッテリー充電率と時点ごとの充電量・放電量を計画することにより、可能な限りの余剰電力の削減とピークカットを同時に達成することができる。

3.2 動的充放電計画の実行

動的充放電計画を実行するにあたり、実行手順は次の3つのステップに分かれる。

(1) 天気予報の入手

動的充放電計画において、事前に需要および発電の電力推移を把握する必要がある。発電の電力推移は天気に大きく影響を受ける。そこで、前日の段階で次の日の電力推移を予測するために「天気予報の入手」を行う。本研究における実証実験では、「天気予報の入手」に気象庁が公開している天気予報 [21] を用いた。

(2) EV の運用計画

入手した予報に基づいて「EV の運用計画」を立て、EV の出発時のバッテリー残量、時点における充放電量を決定する。なお本研究において、翌日の EV の出発時のバッテリー残量、時点における充放電量を出力とする「動的充放電計画モデル」を我々は構築し、「EV の運用計画」に用いた。モデルの構築については、3.3 章にて述べる。

(3) 動的充放電計画の実行 2 で立てた計画に基づき、当日実際に「動的充放電計画の実行」を行う。本研究における充放電の制御などは、4.1 で述べる。

3.3 動的充放電計画モデル

「動的充放電計画モデル」は翌日の「天気」、「季節」、「EV の出退勤時刻」、「EV の出退勤時消費電力量」、「EV のバッテリー

健全度」を入力とし、翌日の「家庭出発時の EV のバッテリー充電率」を出力とする。

モデルの構築は次の 2 つの工程からなる。

(1) 過去データから「天気」と「季節」の組み合わせに対応する電力推移の代表を決定する。

(2) 入力「天気」と「季節」における電力推移において、入力「EV の出退勤時刻」、「EV の出退勤時消費電力量」、「EV のバッテリー健全度」で EV を運用する時に、余剰電力量とピーク時需要電力量を最大限削減できる「家庭出発時の EV のバッテリー充電率」を算出する。

まず、「天気」と「季節」の組み合わせに対応する電力推移の代表を決定について述べる。今回は過去データとして、2013 年 5 月 16 日から 2017 年 12 月 31 日のうちの 1103 件の電力推移データを用いた。まず、データを「天気」と「季節」の組み合わせごとに分ける。ここで「天気」は、「晴」、「晴一曇」、「晴一雨」、「曇」、「曇一晴」、「曇一雨」、「雨」、「雨一晴」、「雨一曇」の 9 つに分類した。「晴一曇」は「晴のち曇」や「晴時々曇」などに該当する。また「季節」は、「春(3-5月)」、「夏(6-8月)」、「秋(9-11月)」、「冬(12-2月)」の 4 つに分類した。すなわち、「天気」と「季節」の組み合わせは 36 パターン存在する。

過去データを 36 パターンに分類した後に、それぞれのパターンごとに、1 時間毎の需要・発電差をプロットし、その中央値を電力推移の代表とした。

続いて、代表の電力推移を基に、余剰電力量とピーク時需要電力量を最大限削減できる「家庭出発時の EV のバッテリー充電率」を算出する。

動的充放電計画において、最大限余剰電力量、ピーク時需要電力量を減らす「家庭出発時の EV のバッテリー充電率」は複数存在する。その解は、 β_{Upper} および β_{Under} で絞り込むことができる。 β_{Upper} 、 β_{Under} について図 5 に示す。上部のグラフは 1 時間ごとの PV や EV と電力のやり取りを行った場合の電力量を示す。下部は同じ日のある EV のバッテリー残量の推移を表す。緑色線は家庭をバッテリー残量が E_{Upper} [Wh] で出発した際のバッテリー推移を表す。また、紫色線は家庭をバッテリー残量 E_{Under} [Wh] で出発した際のバッテリー推移を表す。なお、 E_{Upper} は $E_{Upper} = E_{EVCapacity} * \beta_{Under}$ 、 E_{Under} は $E_{Under} = E_{EVCapacity} * \beta_{Under}$ を満たす。緑色線、紫色線は共に、余剰電力の削減に最大限貢献し、ピークカットに最大限貢献している。緑色線で出発した場合、充電が終了した時点で満充電となり、給電終了後に最大限ゆとりをもって家庭へ帰ることができる。紫色線で出発した場合、家庭に到着した際にバッテリーが空になり、家庭での充電量を最小限に抑えることができる。このように、バッテリー残量が E_{Upper} と E_{Under} の間の状態で出発すれば、最大限余剰電力量、ピーク時需要電力量を減らすことができる。

次に、 E_{Upper} および E_{Under} を求めるための式を示す。

まず、「天気」「季節」から、正の需要・発電差 $p_{DemandPlus}(t)$ [W]、負の需要・発電差 $p_{DemandMinus}(t)$ [W] を求める。

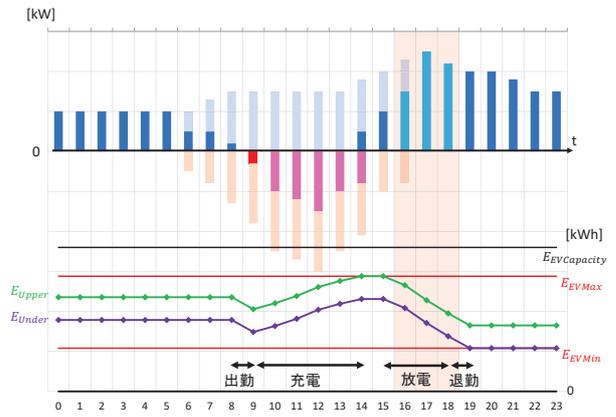


図 6 ある 1 日の動的充放電計画を行った際のエネルギー推移

$$p_{DemandPlus}(t) = \begin{cases} p_{Demand}(t) & (p_{Demand}(t) > 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases}$$

$$p_{DemandMinus}(t) = \begin{cases} -p_{Demand}(t) & (p_{Demand}(t) < 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases}$$

次に、EV がオフィスにいる間に発生する負の需要・発電差の合計電力量 $E_{ChargeAble}$ [Wh]、およびピーク時間かつ EV がオフィスにいる間の需要電力量の合計 $E_{DischargeAble}$ [Wh] を求める。

$$E_{ChargeAble} = \sum_{t=T_{EVArrive}}^{T_{EVDeparture}} p_{DemandMinus}(t) * \tau * \eta_{EVCharge}$$

$$E_{DischargeAble} = \sum_{t=T_{EVArrive}}^{T_{EVDeparture}} p_{DemandPlus}(t) * \tau / \eta_{EVDischarge}$$

$(t \in T_{Peak})$

これを基に、EV がオフィスを出発する際のバッテリー残量の上限 E_{Upper} 、および下限 E_{Under} を求める。

$$E_{Upper} = \begin{cases} E_{EVMax} & (E_{ChargeAble} < E_{Outward}) \\ E_{EVMin} + E_{Outward} & (E_{ChargeAble} > (E_{EVMax} - E_{EVMin})) \\ E_{EVMax} - E_{ChargeAble} + E_{Outward} & (otherwise) \end{cases}$$

$$E_{Under} = \begin{cases} E_{EVmax} \\ (E_{DischargeAble} > \\ (E_{EVMax} - E_{Outward} + E_{ChargeAble} - E_{EVMin}) \\ \wedge E_{ChargeAble} < E_{Outward}) \\ E_{EVmin} + E_{Outward} \\ (E_{ChargeAble} > (E_{EVMax} - E_{EVMin}) \vee \\ E_{DischargeAble} < (E_{ChargeAble} - E_{EVHomeward})) \\ E_{EVmax} - E_{ChargeAble} + E_{Outward} \\ (E_{Outward} < E_{ChargeAble} < (E_{EVMax} - E_{EVMin}) \wedge \\ E_{DischargeAble} > (E_{EVMax} - E_{EVMin} + E_{Homeward})) \\ E_{EVMin} + E_{Outward} + E_{Homeward} \\ + E_{DischargeAble} - E_{ChargeAble} \\ (otherwise) \end{cases}$$

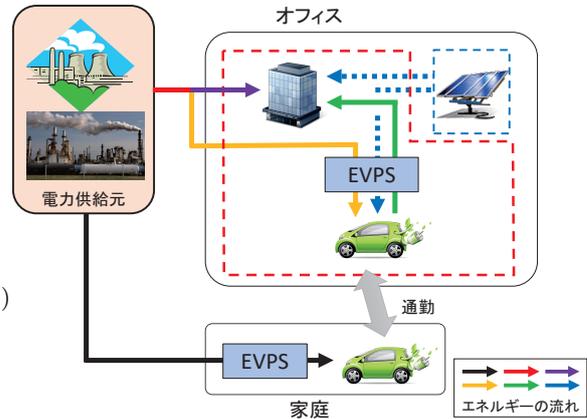


図7 実装したマイクログリッドの模式図

こととした。このとき、「オフィス1部屋の需要電力」は、実際には「電力供給元から供給される電力（紫色線）」と「EVから給電される電力（緑色線）」の和となるが、本実験では「PVによる発電電力（青色線）」が生じていた場合、「電力供給元から供給される電力（紫色線）」をこれに置き換えられるとし、計算した。「PVによる発電電力」をEVへ充電する際も同様である。構築したマイクログリッド環境の詳細を以下に示す。

- オフィス環境
 - － 実験場所：情報工学に関する研究を行うオフィス環境1室 (164m²)
 - － オフィス内活動人数：14名
 - － オフィス内電化製品：一覧を表3および表4に示す。表4に記載された電化製品のみ給電を行うことができる。EVから給電できる電力は表4にある電化製品の消費電力に依存する。
- EV
 - － 使用車：日産リーフ (ZAA-ZE0)¹
- 太陽光パネル

JIS規格による発電電力推定を用いることとした。なお、設置する太陽光パネルのサイズはオフィス環境がある建物の屋根面積2286m²の4%とした。

4.2 実験結果

本実験において、2つの期間で動充放電計画の実証実験を行った。1つ目の期間では、EVの出発時バッテリー残量を「出発時満充電」のみに固定し実験を行った。2つ目の期間では、動的充放電計画を行い、日々EVの出発時バッテリー充電率を変え実験を行った。1つ目の期間を「期間①」、2つ目の期間を「期間②」とする。以下に実験を行った期間の詳細を示す。

(I) 期間①—出発時満充電のみの期間 実験期間：2018/10/24～2018/12/05のうちの19日間

(II) 期間②—動的充放電計画を行った期間 実験期間：2017/10/26～2017/12/15のうちの19日間

動的充放電の計画には気象庁の発表する「神奈川県東部」の天気予報を用いた。また、どちらの期間においても充放電の時間の設定にも同様の天気予報を用いた。なお、期間②の集計に

1：“日産リーフ Web カタログ”，NISSAN, <http://history.nissan.co.jp/LEAF/ZE0/1012/>, 参照 (2018/02/16 アクセス)

これにより、過去のある日の β_{Upper} および β_{Under} を求まる。続いて、この正解データをもとに、実験環境における決定木を構築する。正解データには、2013年4月25日から2017年12月31日の平日856日に対しシミュレーションしたデータを用いた。本実験においては、「 $T_{EVArrive} = 10:00:00$ 」, 「 $T_{EVDeparture} = 19:00:00$ 」, 「 $\eta_{EVCharge} = 0.9$ 」, 「 $\eta_{EVDischarge} = 0.85$ 」, 「 $E_{EVCapacity} = 15.6kWh$ 」, 「 $\beta_{Max} = 1.0$ 」, 「 $\beta_{Min} = 0.3$ 」, 「 $E_{EVOutward} = E_{EVHomeward} = 3kWh$ 」としてシミュレーションを行った。今回は、対応する天気ごとに β_{Upper} および β_{Under} の中央値を算出し、それぞれの範囲を出力するものとした。

4 実験結果および考察

4.1 実験環境

本実験では、マイクログリッドの最小構成単位としてオフィス1部屋とEV1台という環境を実装した。これはマイクログリッドの最小構成での貢献を示すことができれば、単純にスケールすることでマイクログリッド全体としての貢献を示せるという考えに基づく。本研究では、マイクログリッドの最小構成で実験を行う。

実装したマイクログリッドの模式図を図7に示す。本実験において、実際に実装した環境は、赤色破線内のみである。オフィスのマイクログリッドには、需要の媒体としてオフィス1部屋があり、EVと、V2Bを実現するためのEVPSが設置されている。EVは家庭とオフィスを通勤のために行き来し、家庭のマイクログリッドでは、備えられたEVPSで電力供給元から電力を充電することのみできる。またオフィスのマイクログリッドでは、備えられたEVPSで電力供給元から電力を充電できるだけでなく、オフィス1部屋へと給電することができる。

また再生可能エネルギーによる発電設備としてPVが置かれていることを想定する。しかし、PVを実際に設置して、電力の授受を行う環境構築は行わず、本実験では、JIS規格による発電量推定を適用し、仮にPVを設置した時の発電量を用いる

表 2 過去に行うべき最適な動的充放電計画をシミュレーションの各パラメータ

パラメータ	単位	意味
$\beta_{Upper}, \beta_{Under}$		オフィス出発時の最適なバッテリー残量の上限と下限のパーセント
E_{Upper}, E_{Under}	Wh	オフィス出発時の最適なバッテリー残量の上限と下限充電量
$P_{DemandPlus}(t), P_{DemandMinus}(t)$	W	正, 負の需要・発電差
$E_{ChargeAble}$	Wh	EV がオフィスにいる間に発生する発電余剰の合計電力量
$E_{DischargeAble}$	Wh	ピーク時間かつ EV がオフィスにいる間の需要電力の合計
$T_{EVArrive}, T_{EVDeparture}$		EV がマイクログリッドに到着, 出発した時刻
T_{Peak}		ピーク時間の集合
$\eta_{EVCharge}, \eta_{EVDischarge}$		EV の充電, 給電効率
$E_{EVCapacity}$	Wh	EV のバッテリー容量
β_{Max}, β_{Min}		バッテリーの損耗を考慮した EV の最大充電率, 最小充電率
$E_{EVMax} = E_{EVCapacity} \times \beta_{Max}$	Wh	EV のバッテリーの損耗を考慮した最大充電量
$E_{EVMin} = E_{EVCapacity} \times \beta_{Min}$	Wh	EV のバッテリーの損耗を考慮した最小充電量
$E_{EVOutward}, E_{EVHomeward}$	Wh	EV の出勤, 退勤に使用した電力量

表 3 実装環境内の給電対象の電化製品

分類	電化製品 (機種)	個数
サーバ	研究室用サーバ (自作)	3 台
	データベースサーバ (自作)	4 台
	UPS (OMRON BU75RW)	2 台
個人デスク	PC1 台 (自作), モニタ 2-3 台 (I-O DATA LCD-MF221XWR など)	7 個

表 4 実装環境内の給電対象でない電化製品

分類	電化製品 (機種)	個数
換気扇	換気扇 (強・弱設定可能, 熱交換換気・普通換気設定可能)	2ヶ所
照明	天井蛍光灯 (32W*2 本*3ヶ所)	4 系統
	天井蛍光灯 (32W*2 本*5ヶ所)	2 系統
個人デスク	PC1 台 (自作), モニタ 2-3 台 (I-O DATA LCD-MF221XWR など)	7 個
給湯・調理器具	電子レンジ (三菱電機ホーム機器 RO-S21)	1 台
	冷蔵庫 (三菱 MR-P15S-S)	1 台
	電気ケトル (t-fal ジャスティン 1.2L)	1 台
	コーヒーマーカ (メリタ JCM-561)	1 台
会議用機器	プロジェクタ (EPSON EMP-1825)	1 台
	ノート PC (Latitude E6430 など)	4 台
空調	エアコン (三洋電機空調 ガスヒートポンプエアコン SGP-SH90J2)	2ヶ所
掃除機	コード付き掃除機 (Panasonic MC-PA20W)	1 台
プリンタ	インクジェットプリンタ (EPSON PX-605F, EPSON LP-V500)	2 台

は動的充放電計画モデルの出力に沿って実験が行えた日のみを用いた。

4.3 考察

期間②の実験において, 期間①と比べてどれくらい余剰電力量を減らせたか, どれくらいピーク時間帯需要電力量を減らせたかを評価していく。2つの期間での実験における余剰電力量, ピーク時間帯電力量の総量の比較を行う。

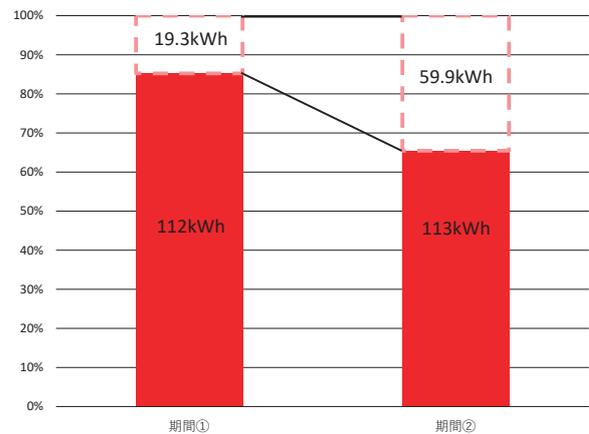


図 8 期間①と期間②の余剰電力量の比較

まず, 図 8 に, 期間①と期間②それぞれの余剰電力量の総量の比較を表す 100%積み上げグラフを示す。2つの実験結果を比較するにあたり, 気象や人の動きによりピーク時間帯需要電力は日ごとに変化する。そのため, 積み上げグラフではどれだけピークカットに貢献できたのかを明示しづらいため, 100%積み上げグラフで示す。図内の赤い実線が余剰電力量の合計, オレンジの破線が PV から EV へ充電された充電量の合計である。また, 赤い実線とオレンジの破線の合計が負の需要・発電差の電力量の合計である。

期間①は全体に対して 14.8%, 期間②は全体に対し 34.5%削減できている。すなわち, 期間①より期間②は 19.8 ポイント多く削減できている。期間②では, その日の天気に合わせて「到着時ゼロ充電」を行っているため, 期間①より大きく削減ができています。そのため, 動的充放電計画により余剰電力の受け取りは効果的に行えることが示された。

続いて, 図 9 に, 期間①と期間②それぞれのピーク時間帯需要電力量の総量の比較を表す 100%積み上げグラフを示す。図内の青い実線がピーク時間帯需要電力量の合計, 水色の破線が EV から建物へ給電された給電量の合計である。すなわち, 青い実線と水色の破線の合計がピーク時の正の需要・発電差の電力量の合計である。

期間①は全体に対して 13%, 期間②は全体に対し 18.1%削減

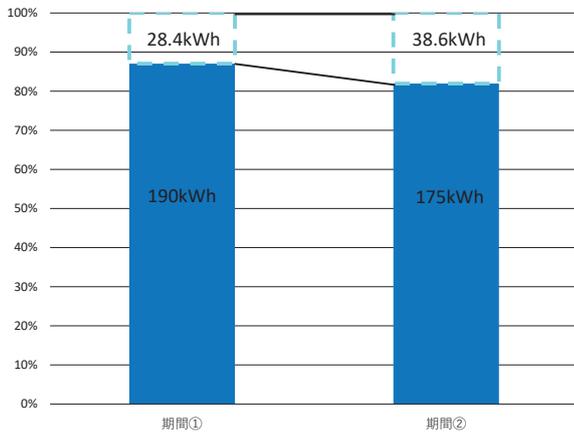


図9 期間①と期間②のピーク時帯需要電力量の比較

減ってきている。すなわち、期間①より期間②は5.1ポイント多く削減できている。本来であれば、すべての日において「出発時満充電」で実験を行った期間①の方がピークカットへの貢献は大きいはずである。この原因として、バッテリーの損耗の影響が考えられる。期間①ではバッテリー健全度が「62」であったのに対し、期間②ではバッテリー健全度が「67」である。このことから、バッテリーの損耗が充電に与える影響が大きいことが分かった。

以上のことから、動的充放電計画により余剰電力の受け取りとピークカットは効果的に行えたということが言える。

5 まとめと今後の課題

本稿では、マイクログリッド環境の最小単位であるオフィス内の1部屋とEV1台という環境を実装した。実装した環境にてEVの運用方法を日ごとに変えることで、余剰電力量を効果的に減らし、ピークカットも効果的に行えたことを実際に行った実験を通して示した。これにより、動的充放電計画の有用性を実際に確認することができた。

本研究では、動的充放電計画において「出発時満充電」と「到着時ゼロ充電」というおおまかなEVのバッテリー残量のコントロールしか行わなかった。今後の課題としては、相殺差分電力に合わせたEVのバッテリー残量コントロール、またEVの充電速度のコントロールを行うことで、余剰電力がどれくらいになるのか、ピークカットをどれくらいできるのかを検討する必要がある。また、今回はPVの発電電力は仮想で実験を行ったので、今後は実際のPVを用いることにより、マイクログリッドを実運用する必要がある。

謝辞 本研究の一部はJSPS科研費(課題番号18K11750)による。

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>, 2018/03/13
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁:平成29年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2018), http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018pdf/whitepaper2018pdf_2_1.pdf, 2018/07/17.
- [3] 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
- [4] 要を平衡させる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.
- [5] 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.
- [6] Z. Huang, T. Zhu, Y. Gu, D. Irwin, A. Mishra, P. Shenoy, “Minimizing Electricity Costs by Sharing Energy in Sustainable Microgrids”, Proc. of the 1st ACM Conf. on Embedded Systems for Energy-Efficient Buildings, pp. 120-129, 2014.
- [7] 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動変動電源の余剰発電抑制緩和策”, 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.
- [8] W. Simm, M. A. Ferrario, A. Friday, P. Newman, S. Forshaw, M. Hazas, A. Dix, “Tiree Energy Pulse: Exploring Renewable Energy Forecasts on the Edge of the Grid”, Proc. of the 33rd Annual ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems, pp.1965-1974, 2015.
- [9] W. Kempton, J. Tomic, “Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue”, Journal of Power Sources, Vol.144, Issue.1, pp.268-279, 2005.
- [10] 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.
- [11] A. J. B. Brush, J. Krumm, S. Gupta, S. Patel, “EVHome-Shifter: Evaluating Intelligent Techniques for Using Electrical Vehicle Batteries to Shift When Homes Draw Energy from the grid”, ACM Int'l Joint Conf. on Pervasive and Ubiquitous Computing, pp.1077-1088, 2015.
- [12] A. Y.S.Lam, Ka-Cheong Leung, Victor O.K. Li, “An Electric-Vehicle-based Supplementary Power Delivery System”, 2015 IEEE Int'l Conf SmartGridComm, pp.307-312
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] M. Henzler, A. Boller, M. Buchholz, K. Dietmayer, “Are Truck Drivers Ready to Save Fuel The Objective and Subjective Effectiveness of an Ecological Driver Assistance System”, IEEE 18th Int'l Conf. on Intelligent Transportation Systems, pp.2007-2012, 2015.
- [16] M. de Souza, M. Ritt, A.L. C. Bazzan, “A bi-objective method of traffic assignment for electric vehicles”, IEEE 19th Int'l Conf. on Intelligent Transportation Systems, pp. 2319-2324, 2016.
- [17] C.Kurtulus, G.Inalhan, “Model Based Route Guidance for Hybrid and Electric Vehicles”, IEEE 18th Int'l Conf. on Intelligent Transportation Systems, pp.1723-1728, 2015.
- [18] 藤原国久, 高橋慶多, 細澤直人, 高橋佳久, 西本直樹, 富井尚志, 本藤祐樹, “電力使用時の多様な状況組み合わせが可能なDBの構築と情報提示による評価”, 第6回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム(DEIM2014), E1-1, 2014.
- [19] T. Tomii, S. Hagimoto, N. Fueda, T. Deguchi, M. Idenawa, T. Hayashi, “Long-Term Experiment of the ECOLOG Database Capability of Estimating V2X Effect Replacing with EVs”, 20th ITS World Congress, Tokyo, 2013
- [20] 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”
- [21] 資源エネルギー庁:発電量シミュレーター:おひさまパワー!太陽光発電量, http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/ohisama_power/sim/, 2018/02/07.
- [22] 気象庁:天気予報, <https://www.jma.go.jp/jp/yoho/>, 2019/01/08.