

オープンデータとライフログを活用したVGIスマートグリッドにおける有効な電力負荷平準化プランニング

村上太一朗[†] 飯田 惇子[†] 石毛 大貴[†] 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: [†]{murakami-taichiro-ng,iida-junko-kg,ishige-taiki-nx}@ynu.jp, ^{††}{hondo,tommy}@ynu.ac.jp

あらまし 本研究では、再生可能エネルギーとEVバッテリーを活用した外部電力の負荷平準化シミュレーションを行う。この負荷平準化を実現するための定式化とアルゴリズムの設計を行った。負荷平準化を実現するためのオープンデータとライフログを組み合わせたデータベースを活用し、負荷平準化を行う際、様々な条件でシミュレーションを行い、様々な評価指標のもとで定量化・可視化を行った。

キーワード ライフログ, 負荷平準化, スマートグリッド, VGI: Vehicle-Grid Integration, 再生可能エネルギー, 電気自動車, オープンデータ

1 はじめに

センサ技術やストレージ技術の発達により、実世界の膨大なデータを取得・蓄積でき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、生活の記録である「ライフログ」が容易に利用できるようになった。また、国や地方公共団体がオープンデータに関する取り組みを進めたことにより、気象データなどの様々な場所固有のデータが利用できるようになった。これらのライフログやオープンデータを充分に活用するためには、適切なデータマネジメントが重要である[2]。

一方で、持続可能なエネルギー利用のために、温室効果ガス的一种であるCO₂の排出を抑えつつ、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][4]。この問題の対策に一例として、化石燃料由来の電力消費を抑えるために再生可能エネルギーを導入することが挙げられる。特に近年、太陽光発電設備が多く導入され、世界規模で大きく普及が進んでいる。しかし、太陽光発電による発電量は季節や気象に依存し不安定である(図1(a))。そのため、需要電力を発電電力に一致させること(エネルギーマッチング)が難しく、消費しきれずに余ってしまう「発電余剰電力」が生じることがある。そのうえ、再生可能エネルギーの発電パターンは他の近隣施設でも同様であるため発電余剰電力をそれらに送電(売電)することは難しい。したがって、再生可能エネルギーの出力抑制を行う必要が生じてしまい、発電電力を充分に有効活用できない可能性がある。さらに、太陽光発電の導入量が増えると、発電する時間帯としない時間帯で、電力供給側に対する実質需要電力(需要・発電電力差、3章以降は外部電力と定義する)に急激な変動が起り(ダックカーブ現象)、電力供給側の発電効率に悪影響を及ぼすことが懸念される[5]。

これらの問題に対して、再生可能エネルギーを地産地消に

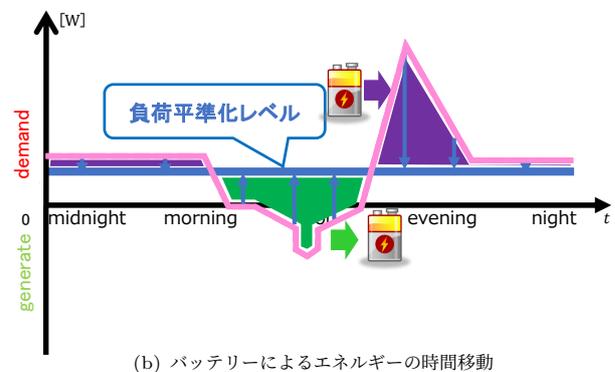
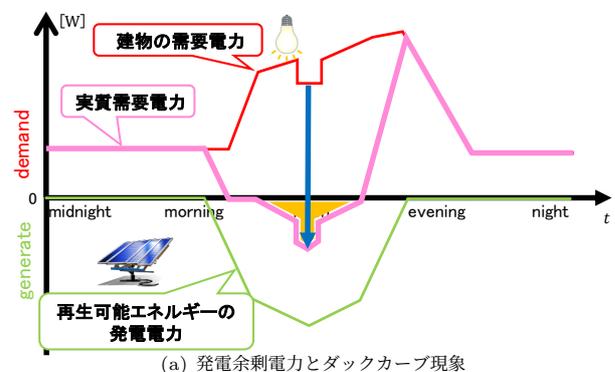


図1 太陽光発電導入時の実質需要電力と負荷平準化

よって有効活用しつつ実質需要電力の変動を抑えること、すなわち需要側による負荷平準化[4]を行うスマートグリッドが解決策として考えられる。需要側による負荷平準化を実現するためには、電力の一時的な蓄積のためにバッテリーが必要となる。このバッテリーとして電気自動車(EV: Electric Vehicle)をバッテリーとみなすVGI (Vehicle-Grid Integration) が期待されている[6]。また、再生可能エネルギーによる発電余剰電力をEVのバッテリーに充電し、電力需要が高い時間帯には給電する。これによって、再生可能エネルギーを有効活用し、なおかつダックカーブ現象を解消(負荷平準化)できると考えら

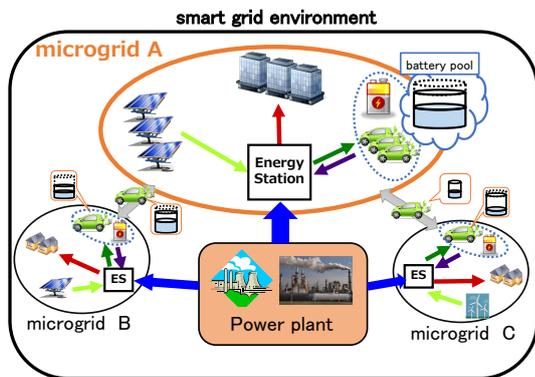


図2 本研究で想定するスマートグリッド環境

れる (図1(b): バッテリーによるエネルギーの時間移動)。ところが、EVは個別に使用状況が異なるため、エネルギーの時間移動を行うために適切な充電を行うことが難しい。また、バッテリーの充電に伴い、エネルギー変換ロスが生じたり、バッテリーの損耗が加速したりすることが知られている[7]。以上より、再生可能エネルギーとEVを活用する需要側の負荷平準化の実現可能性に関して、現実的なデータによる評価を行うことが大きな課題である。

そこで本研究では、再生可能エネルギーとEVバッテリーを活用した負荷平準化シミュレーションを行う。まず、本研究で想定するスマートグリッド環境を定義し、そこでのエネルギーフローや実行する負荷平準化の定式化を行う。また、実際に負荷平準化を行うためには、外部電源からどの程度の一定電力の供給を受けるか(負荷平準化レベル)と、どの時間帯に電力の供給を受けるか(負荷平準化時間帯)の二つを定める必要がある。本研究ではこれらを定めるアルゴリズムとして複数の観点に基づく方法を提案し、オープンデータと実際のライフログを組み合わせたデータベースを活用し、様々な評価指標のもとで定量化・可視化を行った。

2 関連研究

再生可能エネルギーとバッテリー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。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離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。以上のようにスマートグリッドは、電力供給側の立場から設計する方法と電力需要側から設計する方法が見られる。電力供給側の立場からは大規模な需要変動に

対して周波数変動を抑制することに主眼が置かれることが多い。一方、需要側の立場からは節電などの方法によって需要抑制することに主眼が置かれることが多い。よって本研究では、需要側の立場から不安定な再生可能エネルギーを地産地消しつつ、実質需要電力を平準化して供給側の負担を減らす方法をとる。

さらに、EVは非走行時に電力を電力網に供給すること(V2G: Vehicle to Grid)ができる。V2Gの導入効果の検討としてKemptonら[12]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[13]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が果たす役割について論じた。Itoら[14]は、家庭内消費電力の予測に基づくEVの充電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[15]は、家庭のコストの最小化を目的としたEVの充電電計画を提案し、実データによるシミュレーションを行った。Amamraら[16]は、スマートグリッドでEVを用いて電圧と周波数サポートを行うことを提案し、バッテリーのコストを最小化しつつグリッドとEV所有者の利益を最適化するような手法を構築した。

これらの研究に対し、本研究は再生可能エネルギーとEVのデータを統合するライフログデータベースを構築し、需要側の立場からVGIの実現可能性に関する総合的な定量評価ができることを示す。

3 負荷平準化を実現するスマートグリッドにおける定式化

3.1 想定環境

本研究での需要側の立場に基づくスマートグリッド環境として、オフィスビル群や集合住宅ごとに、電力需要設備、再生可能エネルギー発電設備、バッテリー、及び充電設備(ES: Energy Station)を構成要素とする地域電力網(マイクログリッド)を形成することを想定する(図2)。マイクログリッド内には複数の電力需要設備と、マイクログリッドに接続される複数の再生可能エネルギー発電設備が存在している。また、マイクログリッド外には「大規模発電所」が存在し、マイクログリッドに対して電力を供給している。バッテリーはマイクログリッド内の充電設備に常に存在する「定置型バッテリー」と、常に存在するとは限らない「EVバッテリー」の2種類がある。ここで、この2種類のバッテリーによりそのマイクログリッドの「バッテリープール」が構成されると定義する。バッテリープールの満充電容量(FCC: full charge capacity)とSOC(state of charge: 充電率)[17]はバッテリーの充電電やEVのマイクログリッドへの出入りによって常に変化する。

3.2 マイクログリッドのエネルギーフロー

マイクログリッドを流れる電力の共有元(source)と供給先(destination)に関する概念図を図3に示す。また、マイクログリッド環境に定義における各変数を表1に示す。一つのマイクログリッドにおいて、供給元からの電力と供給先への電力の

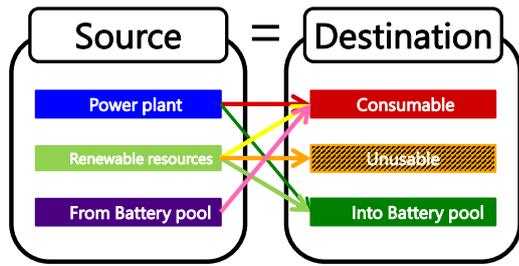


図3 マイクログリッドのエネルギーフロー

総量は一致するものとする。電力の供給元と供給先の内訳としてそれぞれ3つを定義する。

電力の供給元の内訳 (source)

- (1) 外部電力 (Power plant) $Source_{pp}(t)$: マイクログリッド外部 (外部電源) から供給される電力
- (2) 内部発電電力 (Renewable resources) $Source_{rr}(t)$: マイクログリッド内部の再生可能エネルギー発電設備が発電する電力
- (3) 給電電力 (From Battery pool) $Source_{bp}(t)$: バッテリープールから給電する電力

電力の供給先の内訳 (destination)

- (a) 消費電力 (Consumable) $Destination_c(t)$: 電力需要設備が消費する電力
- (b) 余剰電力 (Unusable) $Destination_y(t)$: 供給されたが消費しきれない電力
- (c) 充電電力 (Into Battery pool) $Destination_{bp}(t)$: バッテリープールに充電する電力

電力の供給元と供給先の組み合わせ (マイクログリッドのエネルギーフロー) は図3の矢印で示される6通りであると定義する。

エネルギーフロー (energy flow)

$P_{pp,c}$ (赤色の矢印): 外部電力を直接消費

$P_{pp,bp}$ (緑色の矢印): 外部電力をバッテリーへ充電

$P_{rr,c}$ (黄色の矢印): 内部発電電力を直接消費

$P_{rr,u}$ (オレンジ色の矢印): 内部発電電力のうち消費・充電しきれない余剰電力

$P_{rr,bp}$ (黄緑色の矢印): 内部発電電力をバッテリーへ充電

$P_{bp,c}$ (桃色の矢印): バッテリーからの給電電力を直接消費

そして、任意時点 t の各供給元からの電力はいずれかの供給先へ流れるものとする。また、バッテリープールの充給電時には一定のエネルギー変換ロス (充給電ロス) が生じるものと定義する。

4 負荷平準化レベルとその決定アルゴリズム

4.1 負荷平準化

3.2節で定義したエネルギーフローに基づいて、電力の需要と

表1 マイクログリッド環境の定義

変数	単位	説明
t	s	観測時点
T_{step}	hour	観測粒度 (1時間)
T	なし	全観測時間
T_{start}	hour	負荷平準化開始時刻
T_{end}	hour	負荷平準化終了時刻
$L(t)$	kWh/h	負荷平準化レベルの高さ
$BP_{capacity}$	kWh/h	バッテリープール容量
n	なし	全期間を観測粒度で分割したブロック数

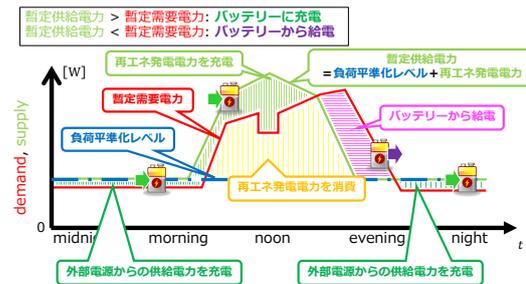


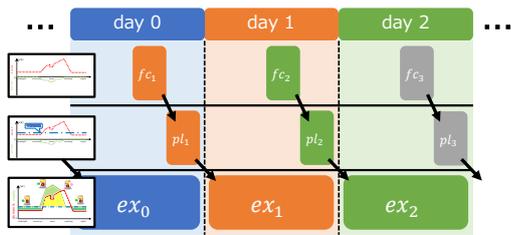
図4 再エネとEVバッテリーを活用する負荷平準化

供給のマッチングを考える。本研究では、外部電力 $Source_{pp}(t)$ が1日を通して一定になることを理想とする。このような状態は、外部電源にとっての負荷が変動しないことから「負荷平準化」と呼ばれる [4]。図4に負荷平準化の概念図を示す。まず建物の需要電力を暫定需要電力と定義する。次に外部電力からの一定電力の供給を考えると、供給される電力は外部電源から供給される電力と再生可能エネルギー発電電力を足し合わせたものになる。これを暫定供給電力と呼ぶ。ここで、暫定供給電力と暫定需要電力を比較し、暫定供給電力が暫定需要電力を上回る時間帯ではバッテリーに充電し、反対に暫定需要電力が暫定供給電力を上回る時間帯ではバッテリーから給電することで、外部電源から供給される電力は一定である負荷平準化を達成することが出来る。負荷平準化を達成するための電力の充給電を行うためには、事前に電力需要や再生可能エネルギー発電電力、EVの動きによるバッテリープール容量の変動の予測を行い、電力の充給電の計画を立てる必要がある。負荷平準化のサイクル概念図を図5に示す。

また、負荷平準化における電力の充給電を行う際、どの電力レベルで負荷平準化を行うか、負荷平準化を実行する時間帯を決定する必要がある。この負荷平準化の高さ (負荷平準化レベル) と負荷平準化を行う時間 (負荷平準化時間帯) の決め方は複数考えられ、本論文ではそれぞれの方法の組み合わせでシミュレーションを行い、いくつかの評価指標のもとで考察を行う。

4.2 負荷平準化時間帯の決定

負荷平準化を行う際、バッテリーに充電する電力量がバッテ



予測 f_{c_d} : day d の消費電力や再生エネルギー発電電力を予測 (day $d-1$ に実施)
 計画 pl_d : 予測 f_{c_d} に基づき、day d の平準化直線を決定 (day $d-1$ に実施)
 実行 ex_d : 計画 pl_d に基づき、day d の充電電を実行 (day d に実施)

図5 負荷平準化の運用サイクルの例

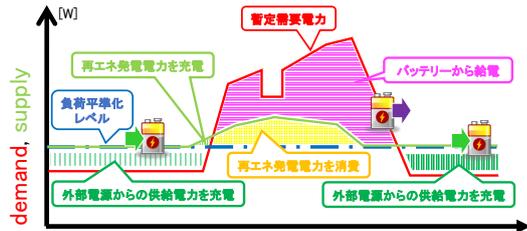


図6 バッテリー供給電力>バッテリー充電電力となる負荷平準化

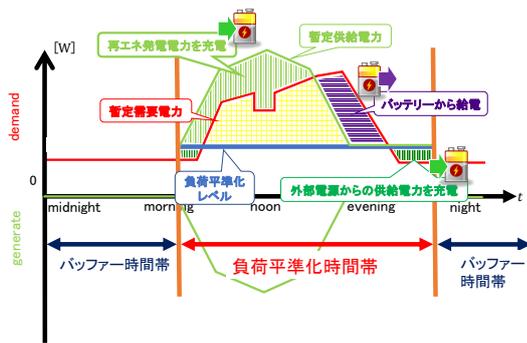


図7 負荷平準化時間帯とバッファ時間帯

リーから放電する電力量を大きく超える日が続いた場合、バッテリーに蓄えられている電力量の残量が不足し、負荷平準化を達成できないことが考えられる。図6にその例を示す。図6の紫色の横線部分はバッテリーから給電、緑色の縦線部分はバッテリーに充電を表しており、このバッテリー充電電量のバランスが損なわれるとバッテリー電力が不足したり、バッテリー電力が溢れることが考えられる。そのような事態を防ぐため、1日中外部電力の負荷平準化するのではなく、バッテリーの残充電量を調整する時間帯を設けることを考えた。図7に概念図を示す。1日の中で負荷平準化を目指す「負荷平準化時間帯」と、バッテリーの残充電量を調整する「バッファ時間帯」の2つの時間帯に分けることで、無理なく負荷平準化が達成できることを示す。

本稿では、スマートグリッドにおける太陽光発電電力の地産地消を考え、負荷平準化開始時刻を太陽光発電が行われる時刻とした。また負荷平準化終了時刻として、需要電力が少なくなった時間に設定するような簡易な方法として、20時~23時までの4時間をパラメータとして設定した。

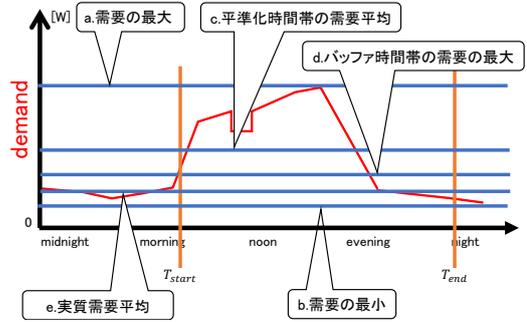


図8 負荷平準化レベルの決定方法

$$T_{start} = \min\{t \in T, Source_{rr}(t) > 0\}$$

$$T_{end} = \{20, 21, 22, 23\}$$

4.3 負荷平準化レベルの決定

4.1節で負荷平準化を行う電力レベルの決定方法は複数考えられると述べた。そこで本稿では、複数の負荷平準化レベルの決定方法を考え、それぞれの決定方法について評価を行う。

a. 需要の最大

$$L(t) = \max_{t \in T} Destination_c(t)$$

b. 需要の最低

$$L(t) = \min_{t \in T} Destination_c(t)$$

c. 平準化時間帯の需要電力の平均

$$L(t) = \frac{1}{T_{end} - T_{start}} \sum_{t=T_{start}}^{T_{end}} Destination_c(t)$$

d. バッファ時間帯の需要の最大

$$L(t) = \max_{t < T_{start}, T_{end} < t} Destination_c(t)$$

e. 実質需要電力の平均

$$L(t) = \frac{1}{T_{end} - T_{start}} \sum_{t=T_{start}}^{T_{end}} (Destination_c(t) - Source_{rr}(t))$$

それぞれの決定方法の概念図を図8に示す。aの需要の最大を負荷平準化レベルとする方法は、負荷平準化時間帯においてバッテリーに充電し続けるような設定方法のため、バッテリーが溢れ、発電余剰電力が発生することが予想される。次に、bの需要の最小を負荷平準化レベルとする方法は、aと反対にバッテリーから給電し続けるような方法のため、バッテリーからの給電が足りなくなることが予想される。負荷平準化レベルはこのaとbの間のレベルで行うことが自然であると考えられ、本稿ではaとbの他にc~eの決定方法を考えた。再生可能エネルギー発電電力の地産地消を考えるスマートグリッド環境において、手法eの実質需要電力の平均とする決定方法が負荷平準化において有効であることを示す。

4.4 負荷平準化の評価指標

概要で、「負荷平準化を行う際、様々な条件でシミュレーションを行い、様々な評価指標のもとで定量化」と述べた。以下に、異なるシミュレーション間を定量化するための評価指標を示す。

α. 余剰電力 (Unusable) の総和

$$\sum_{t \in T} P_{rru}(t)$$

β. 外部電力の変化量

表 2 使用したデータ

項目	種類	説明
電力需要	実データ	横浜国立大学の電力データ ¹
太陽光パネル面積	仮想データ	横浜国立大学の建物の屋上面積の 14 %
太陽光発電	実データに基づく仮想データ	日射量のオープンデータから算出 ²
車の入退構	実データ (一部仮想データ)	駐車場の映像から測定 (欠損日は同じ曜日のデータを使用)
EV のバッテリー容量	仮想データ	100kWh/台
EV の SOC	仮想データ	入構時点ですべて SOC50 %

$$\frac{1}{n} \sum_{t \in T} |Source_{pp}(t+1) - Source_{pp}(t)|$$

γ. 外部電力の最大値

$$\max_{t \in T} Source_{pp}(t)$$

δ. 外部電力の総供給量

$$\sum_{t \in T} Source_{pp}(t)$$

ε. 再生可能エネルギーの EV バッテリーへの総充電量

$$\sum_{t \in T} P_{rr-EVB}(t)$$

5 実験環境における評価

5.1 評価に用いたデータ

使用したデータ一覧を表 2 に示す。本稿では、実験環境を横浜国立大学の研究棟 3 棟とし、評価を行った。なお、評価対象日は 2020 年 1 月 1 日～2020 年 12 月 31 日のうち、土日祝日や年末年始の休業日及びデータ欠損日を除いた 223 日で、サンプリング間隔は 1 時間で合わせた。また、実験環境の再生可能エネルギーの発電設備として太陽光発電のみを用いた。

5.2 シナリオ説明

本稿で述べた負荷平準化アルゴリズムを分かりやすくするために、異なる 3 つのシナリオを考える。

シナリオ 0 (太陽光パネルなし・バッテリーなしシナリオ) : “baseline”

マイクログリッド内に太陽光パネル・バッテリーがないシナリオ。 $p_{(2)}(t) = 0$, $stationary_capacity(t) = 0$, $EV_capacity(t) = 0$ ($\forall t \in T$)。負荷平準化はしない (できない)。

シナリオ 1 (太陽光パネルあり・バッテリーなしシナリオ) : “renewable”

マイクログリッド内に太陽光パネルはあるが、バッテリーがないシナリオ。 $stationary_capacity(t) = 0$, $EV_capacity(t)$

表 3 負荷平準化レベルと負荷平準化終了時刻の組み合わせ結果一覧

$L(t)$	T_{end}			
	20	21	22	23
a	α :220	α :220	α :220	α :220
	β :14.8	β :15.1	β :15.6	β :16.3
	γ :516	γ :516	γ :516	γ :516
	δ :1424	δ :1441	δ :1459	δ :1476
	ϵ :459	ϵ :459	ϵ :459	ϵ :459
b	α :0	α :0	α :0	α :0
	β :5.68	β :4.53	β :3.72	β :3.34
	γ :366	γ :353	γ :346	γ :337
	δ :1064	δ :1056	δ :1051	δ :1050
	ϵ :312	ϵ :312	ϵ :312	ϵ :312
c	α :0	α :0	α :0	α :0
	β :9.8	β :9.75	β :9.66	β :9.60
	γ :406	γ :399	γ :391	γ :383
	δ :1299	δ :1300	δ :1301	δ :1302
	ϵ :420	ϵ :417	ϵ :413	ϵ :409
d	α :0	α :0	α :0	α :0
	β :6.26	β :4.67	β :3.40	β :2.7
	γ :349	γ :335	γ :326	γ :317
	δ :1208	δ :1164	δ :1128	δ :1105
	ϵ :378	ϵ :360	ϵ :344	ϵ :335
e	α :0	α :0	α :0	α :0
	β :7.43	β :6.25	β :5.44	β :5.14
	γ :353	γ :336	γ :324	γ :319
	δ :1020	δ :1010	δ :1003	δ :1000
	ϵ :276	ϵ :276	ϵ :276	ϵ :276

= 0 ($\forall t \in T$)。負荷平準化はしない (できない)。

シナリオ 2 (太陽光パネルあり・バッテリーありシナリオ) : “renewable-battery”

マイクログリッド内に太陽光パネル・バッテリーがあるシナリオ。負荷平準化を行う。

5.3 実データを用いた負荷平準化レベルと負荷平準化時間帯の組み合わせ評価

4 節において、負荷平準化実行サイクルで負荷平準化を行うためには事前に電力需要や再生可能エネルギー発電電力、EV の動きの予測を行う必要があるが、本節では事前実験としてこれらのデータを既知として年間を通して負荷平準化シミュレーションを行った。表 3 に負荷平準化レベルと負荷平準化終了時間帯においてそれぞれの組み合わせにおける年間シミュレーションにおける評価指標の結果を示す。なお、表内の α , β , γ の単位は kWh, δ , ϵ の単位は MWh である。

評価指標 α (発電余剰電力の総和) は再生可能エネルギーの有効活用の観点から発電余剰電力が発生しない、つまり $\alpha = 0$ となることが良いと考える。また、評価指標 β (外部電力の変化量) は負荷平準化において、外部電力の変化量が 0 であれば負荷平準化が達成できたことを表している。評価指標 γ (外部電力の最大値) に関しては年間シミュレーションのうち、ある 1 時間における外部電力からの最大供給量を表しており、電力ピー

1: 横浜国立大学施設部, <http://shisetsu.ynu.ac.jp/gakugai/shisetsu/>

2: 横浜市環境創造局, <http://www.city.yokohama.lg.jp/kankyo/>

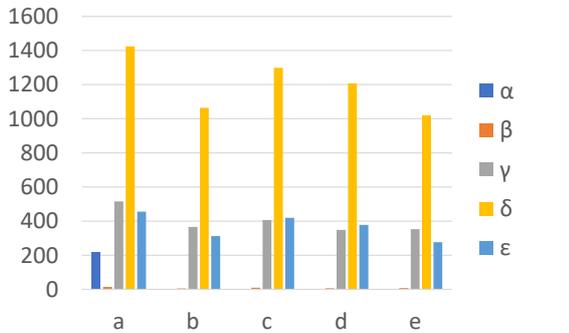


図9 負荷平準化年間シミュレーションにおける評価 ($T_{end} = 20$)

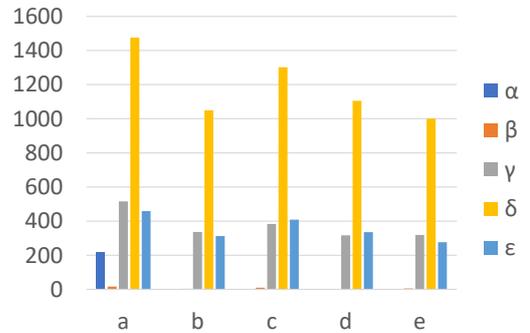


図12 負荷平準化年間シミュレーションにおける評価 ($T_{end} = 23$)

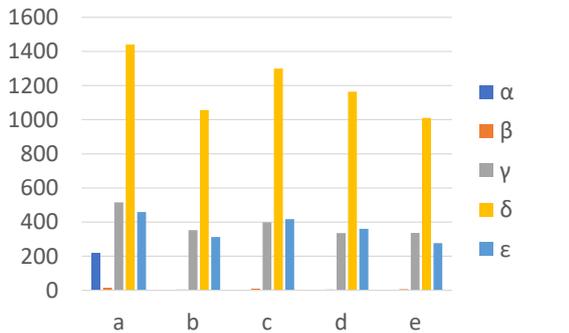


図10 負荷平準化年間シミュレーションにおける評価 ($T_{end} = 21$)

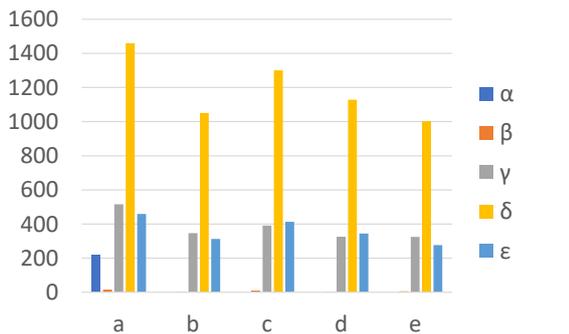


図11 負荷平準化年間シミュレーションにおける評価 ($T_{end} = 22$)

クにおける問題に対する参考値として評価指標に用いた。評価指標 δ (外部電力の総供給量) はこの値が少ないほど外部電力からの電力供給量を削減できたことを表す。ここで負荷平準化レベルの決定方法 e (実質需要電力の平均) に着目すると、他の手法に比べ外部電力からの供給量を削減できる手法であることがわかる。また、評価指標 ϵ (再生可能エネルギー発電電力のEVバッテリーへの総充電量) は、EVバッテリーに充電することでEVの走行で消費した電力が再生可能エネルギー由来であることを表している。この ϵ の値が大きいかほど再生可能エネルギーをEVの走行に対して有効活用できたことを示す。

図9～図12に表3を負荷平準化終了時刻別に棒グラフにしたものを示す。横軸は負荷平準化レベルの決定方法、縦軸は評価指標の値を表す。1時間ごとに負荷平準化時間終了時刻を遅らせていくと、負荷平準化する時間が長くなるため、外部電力供給量を削減することが出来た。

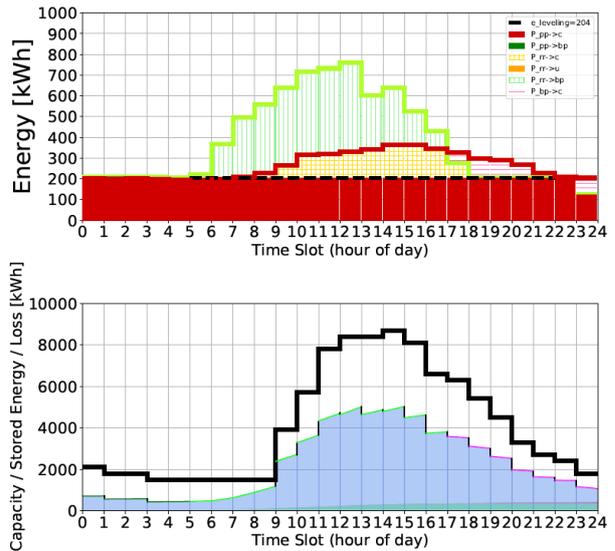


図13 負荷平準化を達成できた日の例

また、図13に負荷平準化を達成できた1日の例を示す。上のグラフは1日の電力の推移 (横軸は1日の時間、縦軸は電力量 [kWh])、下のグラフはその日のバッテリープールの容量および残電力量の推移を表す。図13の上のグラフにおいて、赤色の実線および黄緑色の実線がそれぞれ暫定需要電力量および暫定供給電力量である。なお、タイムスロットごとの外部電力からの供給電力量 (赤の棒グラフの高さ) が平準化直線 (黒色の破線) と一致しているときに、負荷平準化されていることを示している。

図13の下のグラフにおいて、水色のグラフがバッテリープールの残電力量の推移を示しており、その包絡線の色が上図の棒グラフの色 (充電中なら緑色、給電中なら桃色) に対応している。なお、充電はバッテリープールの総バッテリー容量 (黒色の実線) の範囲内で行われている。薄緑色と薄桃色の面グラフは、充電ロスと給電ロスをそれぞれ示している。

次に年間シミュレーションの結果として、図14に手法 e 、 $T_{end} = 23$ とした際の負荷平準化年間シミュレーションの電力収支積み上げグラフを示す。横軸が5.2で示した想定シナリオ、縦軸が電力量 [MWh] を表しており、シナリオごとに電力の供給量 (source: 左側の積み上げ棒グラフ) と供給先 (destination:

表 4 予測に用いたデータ

項目	説明
電力需要	直近 1 週間の同時刻電力需要の平均
太陽光発電	航空気象報データを用いた予測手法
EV の動きによる バッテリープールの変動	5 日間の実データ

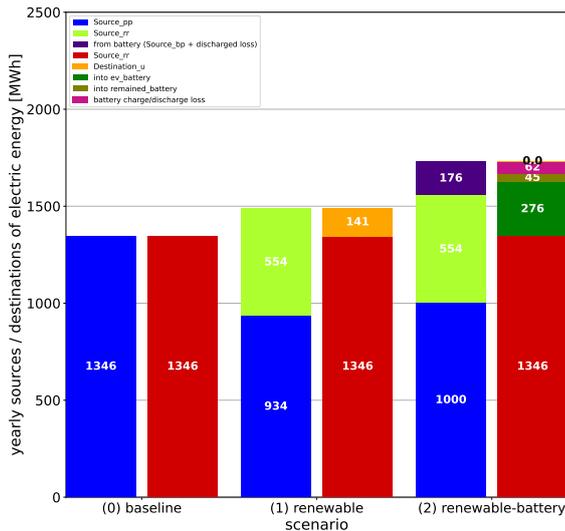


図 14 既知データを用いたシナリオごとのエネルギーフローの年間収支

右側の積み上げ棒グラフ)を並べた。この時、グリッド内のエネルギーフローの収支は一致するので、同一シナリオの供給元と供給先の棒グラフの高さは一致する。供給元の積み上げ棒グラフにおいて、各色は以下の意味をもつ。

- 青色: 総外部電力量の年間積算値
- 黄緑色: 総内部電力量の年間積算値
- 紫色: 総給電量 (総給電電力量と給電ロスの和) の年間積算値

供給先の積み上げ棒グラフにおいて、各色は以下の意味をもつ。

- 赤色: 総消費電力量の年間積算値
- 橙色: 総余剰電力量の年間積算値
- 緑色: EV バッテリーへの総充電量の年間積算値
- オリーブ色: 定置型バッテリーへの総充電量の年間積算値
- 赤紫色: 充給電ロスの年間積算値

図 14 のシナリオ 1 の橙色の部分である、発電余剰電力量に着目すると、太陽光パネルをただ置いただけでは年間で 141MWh の電力が発電余剰電力として使い切ることが出来なかった。その一方シナリオ 2 に着目すると、発電余剰電力は 0MWh であり、負荷平準化により太陽光発電電力を有効活用できたことを示す。負荷平準化を行う際にバッテリーへの充給電が行われるが、この充給電の際に生じる充給電ロスは 62MWh であり、先述の発電余剰電力である 141MWh に比べると小さい。そのため、バッテリーの充給電ロスを考えても、負荷平準化を行うことで太陽光発電電力を有効活用できたと考えられる。次に、シナリオ 2 の緑色の部分である、EV バッテリーへの総充電量に着目すると、1 年間で EV バッテリーに充電された電力量は 276MWh であった。また、表 3 の手法 e, $T_{end} = 23$ の評価指標 ϵ (再生可能エネルギー発電電力の EV バッテリーへの総充電電

量)の値は 276MWh である。これは EV バッテリーに充電された電力の由来が外部電力からではなく 100%再生可能エネルギーであることを表しており、再生可能エネルギーの有効活用を達成できているといえる。また、評価指標 β (外部電力の変化量)に着目すると、この値は十分に小さく負荷平準化が達成可能であるといえる。

これらのことから、負荷平準化を行うことで、再生可能エネルギーの有効活用しつつ、外部電力の供給電力を一定にする負荷平準化が達成できることが示された。

5.4 予測データを用いた負荷平準化シミュレーション

次に、5.3 節では既知としていた電力需要や再生可能エネルギー発電電力、EV の動きの予測を行い年間シミュレーションを行う。予測に用いたデータを表 4 に示す。電力需要については評価対象日が平日であり、実験環境が大学内施設であることから、需要電力パターンに大きな変動が起こらないと仮定し、直近 1 週間の同時刻電力需要の平均とした。太陽光発電については、太陽光発電は気象、特に雲の動きによって発電量が大きく変動することから、雲に関する情報を含む航空気象報を異目的活用し、予測を行った。EV の動きによるバッテリープール容量の変動についても電力需要と同じく評価対象日が平日であり、実験環境が大学内施設であることから、過去 5 日間の駐車場の映像から測定した実データとした。

図 15 に表 4 に示した予測データを用いた年間の負荷平準化シミュレーションの電力収支積み上げグラフを示す。負荷平準化の際の負荷平準化レベルの手法は手法 e, $T_{end} = 23$ を用いた。また、評価指標の結果を以下に示す。 α, β, γ の単位は kWh, δ, ϵ の単位は MWh である。

- $\alpha: 0$
- $\beta: 9.76$
- $\gamma: 378$
- $\delta: 983$
- $\epsilon: 254$

ここで、予測データを用いた負荷平準化シミュレーションを行った結果、評価指標 α (発電余剰電力の総和)は 0 であり、再生可能エネルギーを使い切ることができ、 β (外部電力の変化量)は 9.76 と十分小さい値のため、負荷平準化は達成可能である。また、図 15 のシナリオ 2 の緑色の部分である、EV バッテリーへの総充電量に着目すると、1 年間で EV バッテリーに充電された電力量は 254MWh であり、評価指標 ϵ (再生可能エネルギー発電電力の EV バッテリーへの総充電量)の値は 254MWh である。このことから、再生可能エネルギーの有効活用の観点からも EV バッテリーに充電された電力が 100%再生可能エネ

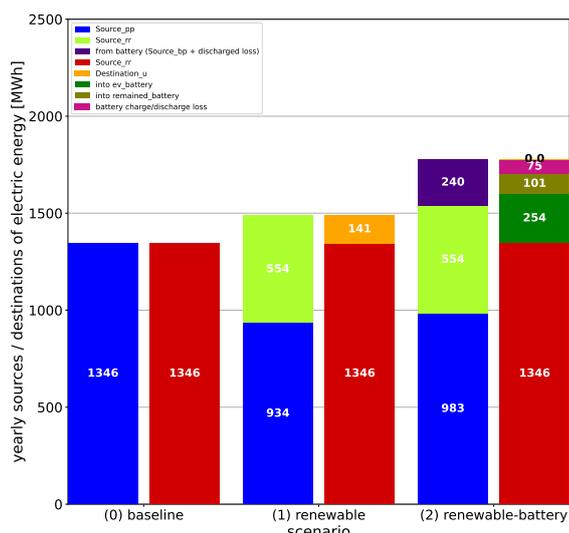


図 15 予測データを用いたシナリオごとのエネルギーフローの年間収支

ルギー由来であることから負荷平準化が有用であるといえる。

6 まとめと今後の課題

本稿では、想定するスマートグリッド環境とそのエネルギーフローを定義した。また、負荷平準化を実現する VGI の定式化とアルゴリズムの設計を行った。負荷平準化を行う際、外部電源からどの程度の一定電力の供給を受けるか (負荷平準化レベル) と、どの時間帯に電力の供給を受けるか (負荷平準化時間帯) を定める際、複数の観点に基づく方法を提案し、実際のライフログデータを用いて比較評価を行った。その結果、再生可能エネルギーを地産地消するアイデアに基づく実質需要電力から負荷平準化レベルを決定するアルゴリズムによって負荷平準化のメリットが十分に得られることがわかった。

今後は、我々の環境で取得・蓄積してきたライフログデータ以外の環境におけるシミュレーションを行うことで、負荷平準化アルゴリズムの検討や負荷平準化レベルや時間帯、評価指標の拡張を行い、負荷平準化アルゴリズムの有効性について検証していく。

謝 辞

本研究の一部は令和 3 年度横浜国立大学学長戦略経費の支援による。

文 献

[1] 総務省. 令和元年版 情報通信白書. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/eng/WP2019/2019-index.html>. Last accessed: 21 May 2020.

[2] 経済産業省. 新産業構造ビジョン. <https://www.meti.go.jp/press/2017/05/20170530007/20170530007.html>. Last accessed: 16 January 2021.

[3] 経済産業省資源エネルギー庁. 令和元年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2020). <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020pdf/>. Last accessed: 30 January 2021.

[4] 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, 初版, 2011.

[5] 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.

[6] Kang Miao Tan, Vigna K Ramachandaramurthy, and 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.

[7] Ali Ahmadian, Mahdi Sedghi, Ali Elkamel, et al. Plug-in electric vehicle batteries degradation modeling for smart grid studies: Review, assessment and conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 2609–2624, 2018.

[8] Nicole D Sintov and P Schultz. Unlocking the potential of smart grid technologies with behavioral science. *Frontiers in psychology*, Vol. 6, p. 410, 2015.

[9] Will Simm, Maria Angela Ferrario, Adrian Friday, et al. 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.

[10] 馬場博幸, 齊藤哲夫, 片岡和人ほか. 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Bernhard Jansen, Carl Binding, Olle Sundstrom, et al. 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.

[14] Akira Ito, Akihiko Kawashima, Tatsuya Suzuki, et al. 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.

[15] Hiroshi Kikusato, Kohei Mori, Shinya Yoshizawa, et al. 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.

[16] SID-ALI AMAMRA and JAMES MARCO. Vehicle-to-Grid aggregator to support power grid and reduce electric vehicle charging cost. *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 178528–178528, 2019.

[17] 小笠原悟司, 船渡寛人, 三原輝儀, 出口欣高, 初田匡之. 電気自動車工学. 森北出版, 初版, 2010.