

ライフログデータベースを用いた 負荷平準化を実現する VGI の定式化

石毛 大貴^{1,a)} 飯田 惇子^{1,b)} 村上 太一朗^{1,c)} 水野 龍之介^{2,d)} 本藤 祐樹^{3,e)} 富井 尚志^{3,f)}

概要：本研究では、再生可能エネルギーと EV バッテリーを活用するためのライフログデータベースを構築した。また、負荷平準化を実現する VGI の定式化を行った。そして、再生可能エネルギーと EV バッテリーを活用するためのライフログデータベースと、負荷平準化を実現する VGI のアルゴリズムを用いて、エネルギーフローシミュレーションの結果を比較することにより、VGI の実現可能性に関する定量評価ができることを示した。

1. はじめに

センサ技術やストレージ技術の発達により、実世界の膨大で多様なデータを取得・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、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となる [2]。

一方で、持続可能なエネルギー利用のために、温室効果ガスの一種である 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]。この問題の対策の一例として、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気象や季節に依存し不安定である。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、発電パターンは他の近隣設備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、出力抑制を行う必要が生じてしまい、発電電力を十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、発電できる時間帯とできない時間帯で、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）に急激な変動が起こり（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有効活用しつつ、実質需要電力の変動を縮小させること、すなわち負荷平準化 [4] を行うことが解決策として考えられる。これらのことから、据え置きバッテリーに加えて、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]。しかし、EV は個別に使用状況が異なるため、適切な充給電を行うことが難しい。そのため、再生可能エネルギーと EV を活用する負荷平準化を実現するためには、電力需要やバッテリーの状態をはじめとする様々なデータが必要になる。データを蓄積・運用する仕組みを構築し、データによって負荷平準化の実現可能性の検討を行うことが課題である。

そこで本研究では、電力需要、再生可能エネルギー、EV に関するライフログを蓄積できるデータベースを構築し、想定するスマートグリッドにおける負荷平準化の実現可能性を検討する。まず、本研究で想定する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小型電力網を形成することを想定し、そこでのエネルギーフローの定義を行う（3.1 節）。次に、想定するスマートグリッド環境

¹ 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

² 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

³ 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

a) ishige-taiki-nx@ynu.jp

b) iida-junko-kg@ynu.jp

c) murakami-taichiro-ng@ynu.jp

d) mizuno-ryunosuke-xr@ynu.jp

e) hondo@ynu.ac.jp

f) tommy@ynu.ac.jp

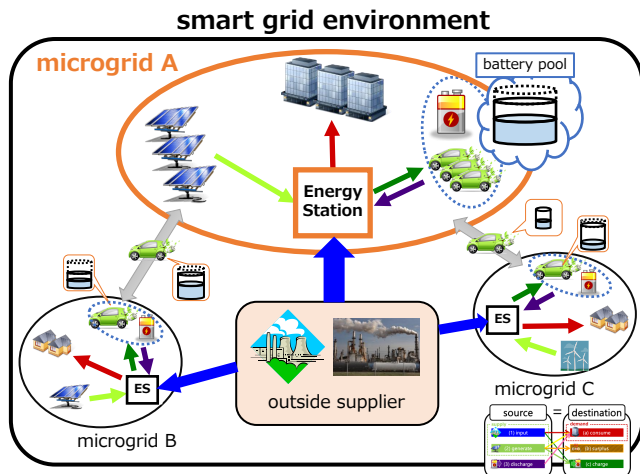


図 1 本研究で想定するスマートグリッド環境

に対して行う負荷平準化の定式化 (3.2 節) を行う。そして、提案するデータベースにより、再生可能エネルギーと EV バッテリーを組み合わせたスマートグリッド環境の負荷平準化を行い、(1) 再生可能エネルギーの発電余剰電力を出さず、(2) EV を協調させて、(3) ピークを抑制・平準化し、(4) 実質需要電力の急激な変化を抑えられることを示す。

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 [7] 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。

また、電力システムの安定化や高いエネルギー効率の維持のために、電力の負荷平準化は重要な課題である。Hong ら [8] は、電力の負荷平準化を目的に、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。

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) が可能である。V2G の導入効果の検討として Kempton ら [9] 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。

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、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. ライフログデータベースを用いた負荷平準化を実現する VGI の定式化

本章では、ライフログデータベースを構築するためのデータモデリングとその定式化について述べる。

3.1 想定環境

未来のスマートグリッド環境として、オフィスビル群

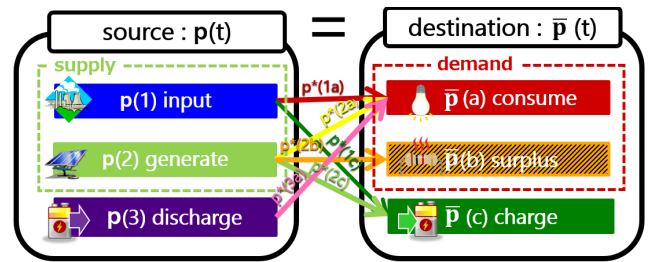


図 2 マイクログリッドのエネルギーフロー

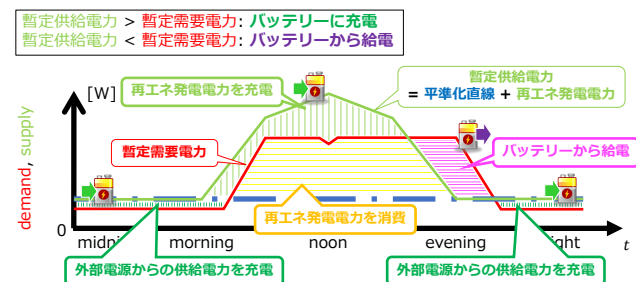


図 3 再エネと EV のバッテリーを活用する負荷平準化 (連続)

や集合住宅ごとに、電力需要設備、再生可能エネルギーの発電設備、バッテリー、および充給電設備 (ES: Energy Station) を構成要素とする小型電力網 (マイクログリッド) を形成することを想定する (図 1)。マイクログリッド外には「大規模発電所」が存在し、マイクログリッド内の設備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給電設備に常に存在する「据置きバッテリー」と、常に存在するとは限らない「EV」の 2 種類がある。また、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) [10] は、充給電や EV のマイクログリッド内外への移動によって常に変化する。

マイクログリッドを流れる電力の供給元 (source) と供給先 (destination) に関する概念図を図 2 に示す。また、マイクログリッド環境の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総量は常に一致するものとする。電力の供給元の内訳として (1)~(3) の 3 つを、供給先の内訳として (a)~(c) の 3 つをそれぞれ定義する。

電力の供給元の内訳 (source)

- (1) 外部電力 $p_{(1)}(t)$: マイクログリッドの外部 (外部電源) から供給される電力
- (2) 内部発電電力 $p_{(2)}(t)$: マイクログリッドの内部の再生可能エネルギーの発電設備が発電する電力
- (3) 給電電力 $p_{(3)}(t)$: 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 $\bar{p}_{(a)}(t)$: 電力需要設備が消費する電力
(b) 余剰電力 $\bar{p}_{(b)}(t)$: 供給されたが消費しきれない電力
(c) 充電電力 $\bar{p}_{(c)}(t)$: バッテリープールに充電する電力
その上で、マイクログリッドレベルで見た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2の矢印で示される次の6通りのみであると定義する。

エネルギーフロー (energy flow)

- (1) → (a) $p_{(1a)}^*(t)$: 外部電力を直接消費
(1) → (c) $p_{(1c)}^*(t)$: 外部電力をバッテリーへ充電
(2) → (a) $p_{(2a)}^*(t)$: 内部発電電力を直接消費
(2) → (b) $p_{(2b)}^*(t)$: 内部発電電力のうち消費・充電しきれない余剰
(2) → (c) $p_{(2c)}^*(t)$: 内部発電電力をバッテリーへ充電
(3) → (a) $p_{(3a)}^*(t)$: 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電電時には一定のエネルギー変換ロス（充電ロス）が生じるものと定義する。

表1 マイクログリッド環境の定義における変数

変数	単位	説明
t	s	観測時点
Δt	hour	観測粒度（1時間）
t_d	hour	t から $t+\Delta t$ の時間帯
T	なし	全観測時間
start_time	hour	人の活動開始時間帯
end_time	hour	人の活動終了時間帯
leveling_line(t_d)	kWh/h	一定期間中の負荷平準化直線の高さ
$p_{(1a)}^*(t_d)$	kWh/h	一定期間に外部電力が消費された量
$p_{(1c)}^*(t_d)$	kWh/h	一定期間に外部電力がバッテリーに充電された量
$p_{(2a)}^*(t_d)$	kWh/h	一定期間に内部発電電力が消費された量
$p_{(2b)}^*(t_d)$	kWh/h	一定期間に内部発電電力が利用されずに余った量
$p_{(2c)}^*(t_d)$	kWh/h	一定期間に内部発電電力がバッテリーに充電された量
$p_{(3a)}^*(t_d)$	kWh/h	一定期間にバッテリーから供給された電力が消費された量
$p_{(1)}(t_d)$	kWh/h	$p_{(1a)}^*(t_d) + p_{(1c)}^*(t_d)$ 一定期間の外部電力量
$p_{(2)}(t_d)$	kWh/h	$p_{(2a)}^*(t_d) + p_{(2b)}^*(t_d) + p_{(2c)}^*(t_d)$ 一定期間の内部発電電力量
$\bar{p}_{(a)}(t_d)$	kWh/h	$p_{(1a)}^*(t_d) + p_{(2a)}^*(t_d) + p_{(3a)}^*(t_d)$ 一定期間の消費電力量

3.2 負荷平準化を実現する VGI の定式化

3.1 節で定義したエネルギーフローに基づいて、電力の需要と供給のマッチングを考える。本研究では、外部電力 $p_{(1)}(t)$ 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化しないことから「負荷平準化」と呼ばれる[4]。図3に負荷平準化の概念図を示す。図3において、すべてのエネルギーフローが連続値として扱われている。しかし、実際にはサンプリング間隔 Δt が存在するので、 $p(t)$ を離散値として扱う方が都合が良い。ここで、連続値の時間 t と区別するために離散値の時間を t_d とし、 t_d は t から $t+\Delta t$ だけの幅を持つとする(図4)。

負荷平準化の対象時間に関して、図3及び先行研究[11]では1日のうちすべての時間を対象としていた。一方で本稿では、電力需要の高い人の活動時間帯のみに対して負荷平準化を行うことで実現性の向上をはかる。電力需要が低く外部電源の負荷が少ないそれ以外の時間帯（バッファ時間帯）は、負荷平準化を行わずバッテリーのRC(remaining charge: 電荷残量[10])を調整する時間帯とする。この調整とは、次の活動時間帯でバッテリーが負荷平準化できる状態になるよう充電電をする事を指す。ここで、1章と先行研究[11]より、以下を達成することを本稿の目標とする。

- マイクログリッドで発電した再生可能エネルギーの余剰が生じないようにする

$$p_{(2b)}^*(t_d) = 0 \quad (\forall t \in T) \quad (1)$$

- 人の活動時間帯を定義し、その時間帯を対象に外部電力を一定にする(図3: 負荷平準化)
- バッファ時間帯で据え置きバッテリーのRCを調整する

負荷平準化を次の手順で行う。

- 前日から見て翌日の $p_{(2)}(t)$ と $\bar{p}_{(a)}(t)$ と EV の入退構は既知とする
- 負荷平準化前にマイクログリッドのエネルギーフロー6種は決まっていない
- 翌日の負荷平準化直線の高さ(=人の活動時間帯の外部電力)を式(2)に則り前日に定める
- 人の活動時間帯を対象に負荷平準化を行い、バッテリーへの充電電量などマイクログリッドのエネルギーフロー6種が確定する

本稿では、負荷平準化直線の高さを、活動時間帯とそれ以外の時間帯の境界で差異が最小になるように定める。

$$\begin{aligned} & |p_{(1)}(\text{end_time} + \Delta t) - \text{leveling_line}(t_d)| * (1 - x) \\ & + |p_{(1)}(\text{start_time} - \Delta t) - \text{leveling_line}(t_d)| * x \quad (2) \\ & \rightarrow \min \quad (0 < x < 1) \end{aligned}$$

図4に再生可能エネルギーとバッテリーを活用する負荷平準化のコンセプトを示す。マイクログリッドの「外部電

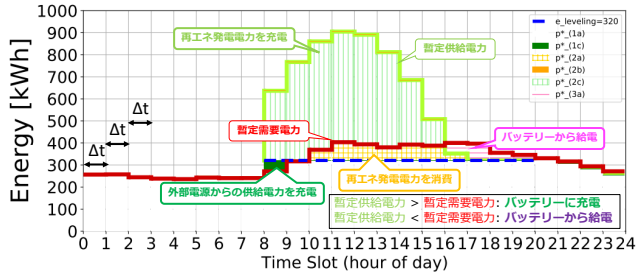


図 4 再エネと EV のバッテリーを活用する負荷平準化 (離散)

Algorithm 1 負荷平準化アルゴリズム

Require: leveling_line(t_d), $\bar{p}_{(a)}(t_d)$, $p_{(1)}(t_d)$, $p_{(2)}(t_d)$

Ensure: $p_{(1a)}^*(t_d)$, $p_{(1c)}^*(t_d)$, $p_{(2a)}^*(t_d)$, $p_{(2b)}^*(t_d)$, $p_{(2c)}^*(t_d)$, $p_{(3a)}^*(t_d)$

if $\bar{p}_{(a)}(t_d) > p_{(2)}(t_d)$ **then**

$p_{(1a)}^*(t_d) \leftarrow \bar{p}_{(a)}(t_d) - p_{(2)}(t_d)$

$p_{(2a)}^*(t_d) \leftarrow p_{(2)}(t_d)$

$p_{(2b)}^*(t_d) \leftarrow 0.0$

else

$p_{(1a)}^*(t_d) \leftarrow 0.0$

$p_{(2a)}^*(t_d) \leftarrow \bar{p}_{(a)}(t_d)$

$p_{(2b)}^*(t_d) \leftarrow p_{(2)}(t_d) - \bar{p}_{(a)}(t_d)$

end if

$\text{delta_leveling}(t_d) \leftarrow p_{(1a)}^*(t_d) - \text{leveling_line}(t_d)$

if $\text{delta_leveling} > 0$ **then**

$p_{(1a)}^*(t_d) \leftarrow \text{leveling_line}(t_d)$

$p_{(1c)}^*(t_d) \leftarrow 0.0$

$p_{(2b)}^*(t_d) \leftarrow 0.0$

$p_{(2c)}^*(t_d) \leftarrow 0.0$

$p_{(3a)}^*(t_d) \leftarrow \text{delta_leveling}$

else

if $\text{leveling_line}(t) < \bar{p}_{(a)}(t_d)$ **then**

$p_{(1a)}^*(t_d) \leftarrow \text{leveling_line}(t_d)$

$p_{(1c)}^*(t_d) \leftarrow 0.0$

$p_{(2a)}^*(t_d) \leftarrow p_{(2a)}^*(t_d) + \text{delta_leveling}$

$p_{(2c)}^*(t_d) \leftarrow p_{(2b)}^*(t_d) - \text{delta_leveling}$

$p_{(2b)}^*(t_d) \leftarrow 0.0$

$p_{(3a)}^*(t_d) \leftarrow 0.0$

else

$p_{(1a)}^*(t_d) \leftarrow p_{(1a)}^*(t_d) + p_{(2a)}^*(t_d)$

$p_{(1c)}^*(t_d) \leftarrow -p_{(2a)}^*(t_d) - \text{delta_leveling}$

$p_{(2c)}^*(t_d) \leftarrow p_{(2a)}^*(t_d) + p_{(2b)}^*(t_d)$

$p_{(2a)}^*(t_d) \leftarrow 0.0$

$p_{(2b)}^*(t_d) \leftarrow 0.0$

$p_{(3a)}^*(t_d) \leftarrow 0.0$

end if

end if

力 (=負荷平準化直線の高さ) と内部発電電力の和」を暫定供給電力、電力需要設備の消費電力を暫定需要電力と定義し、電力の供給と需要を比較する。暫定供給電力が暫定需要電力を上回る時間帯にバッテリーに充電し、暫定供給電力が暫定需要電力を下回る時間帯にバッテリープールから給電することにより、外部電源から供給される電力の負荷平準化を目指す。以上から、エネルギーフロー 6 種の電力を Algorithm 1 を用いて確定する。

これにより t_d でのバッテリープールに対する充給電量

表 2 バッテリーの定義

変数	単位	説明
$\text{stationary_FCC}(t_d)$	kWh	一定期間中の 据え置きバッテリーの FCC
$\text{stationary_SOC}(t_d)$	%	一定期間中の据え置き バッテリーの SOC
$\text{stationary_RC}(t_d)$	kWh	一定期間中の据え置き バッテリーの RC $\text{stationary_FCC}(t_d)$ * $\text{stationary_SOC}(t_d)$
$\text{EV}_i\text{-FCC}(t_d)$	kWh	一定期間中の番号 i の EV の FCC
$\text{EV}_i\text{-SOC}(t_d)$	%	一定期間中の番号 i の EV の SOC
$\text{EV}_i\text{-RC}(t_d)$	kWh	一定期間中の 番号 i の EV の RC $\text{EV_FCC}(t_d) * \text{EV_SOC}(t_d)$
I	なし	マイクログリッド内の EV の集合
$p_{(c)}(t_d)$	kWh	$p_{(1c)}^*(t_d) + p_{(2c)}^*(t_d)$ 一定期間の充電電力量
η_{charge}	なし	充電効率 (=0.9)
$\eta_{\text{discharge}}$	なし	給電効率 (=0.85)

が確定する。このとき、 $\bar{p}_{(c)}(t_d)$ は個々の EV と据え置きバッテリーに対して充電される。本稿では EV への充電を優先し、EV に充電しきれずに余った電力を据え置きバッテリーへと充電することとした。 $\bar{p}_{(c)}(t_d)$ が EV に全て充電できるとき、時間帯 t_d における i 番目の EV への充電量は表 2 を用いて次のように計算される。

$$\begin{aligned} & \text{EV}_i\text{-RC}(t_d + \Delta t) - \text{EV}_i\text{-RC}(t_d) \\ &= \bar{p}_{(c)}(t_d) * \eta_{\text{charge}} * \frac{(\text{EV}_i\text{-FCC}(t_d) - \text{EV}_i\text{-RC}(t_d))}{\sum_{i \in I} (\text{EV}_i\text{-FCC}(t_d) - \text{EV}_i\text{-RC}(t_d))} \end{aligned} \quad (3)$$

また、給電時はそれぞれのバッテリーの RC に比例して各々の給電量が決定される。例えば、時間帯 t_d における i 番目の EV からの給電量は次のように計算される。

$$\begin{aligned} & \text{EV}_i\text{-RC}(t_d + \Delta t) - \text{EV}_i\text{-RC}(t_d) \\ &= -\frac{p_{(3a)}^*(t_d)}{\eta_{\text{discharge}}} * \frac{\text{EV}_i\text{-RC}(t_d)}{\sum_{i \in I} \text{EV}_i\text{-RC}(t_d) + \text{stationary_RC}(t_d)} \end{aligned} \quad (4)$$

先行研究 [11] では、3.1 節で述べた本研究で想定するスマートグリッド環境をインスタンス付き実体関連図及びデータベーススキーマに示した。このスキーマによって、3.2 節における負荷平準化アルゴリズムや充給電分配を実行するために必要なデータを過不足なくデータベースに蓄積することが可能になっている。

4. 実験環境における評価例

本章では、3 章で述べた定式化とデータベーススキーマ

に基づき、実験環境における VGI の定量評価例とその考察について述べる。

使用したデータ一覧を表 3 で示す。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およ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。

4.1 シナリオ説明

3 章と同様に前日から見て翌日の $p_{(2)}(t)$ と $\bar{p}_{(a)}(t)$, EV の入退構は既知とする。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。

4.1.1 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。 $p_{(2)}(t) = 0$, $\text{stationary_FCC}(t) = 0$, $\text{EV_FCC}(t) = 0$ ($\forall t \in T$)。負荷平準化はしない (できない)。

4.1.2 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。 $\text{stationary_FCC}(t) = 0$, $\text{EV_FCC}(t) = 0$ ($\forall t \in T$)。負荷平準化はしない (できない)。

4.1.3 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

表 3 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 %

*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/kankyoo/>

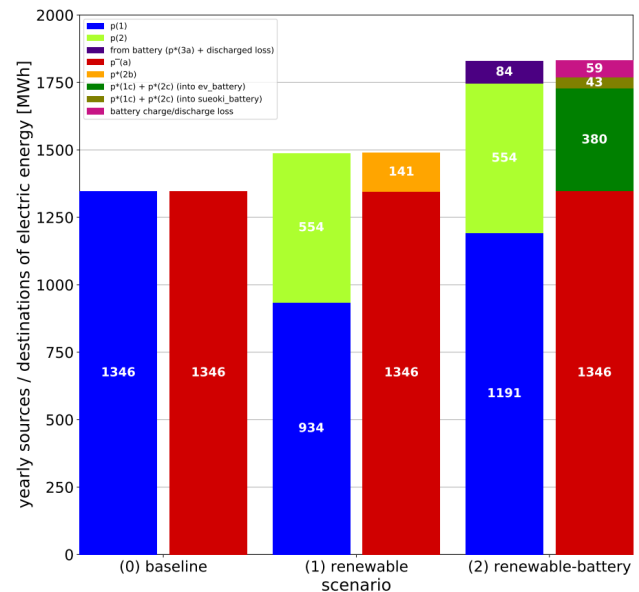


図 5 シナリオごとのエネルギーフローの年間収支

表 4 シナリオごとのまとめ

項目	シナリオ 0	シナリオ 1	シナリオ 2
太陽光パネル	×	○	○
EV	×	×	約 90 台
据え置きバッテリー	×	×	1500kWh
外部電力の変化量の絶対値平均	12MW	25.3MW	6.51MW
評価対象日における時間あたりの外部電力量の最大値	516MWh/h	429MWh/h	347MWh/h

シナリオ。負荷平準化を行う。

4.2 評価例のまとめと考察

図 5 にシナリオごとの年間の電力量収支を示す。シナリオごとに左 bar が収入すなわち供給元の電力内訳を、右 bar が支出すなわち供給先の電力内訳を表す。したがって、左右で bar の高さは一致する。シナリオ 0(図 5 左) は、元データそのものであり、年間で 1346MWh を外部電源から受け取り (青), 消費していた (赤)。

シナリオ 1(図 5 中央) は、バッテリーがないため 934MWh を外部電源から受け取り (青), 554MWh をマイクログリッド内で発電した (黄緑) が、554MWh のうちの 141MWh(25 %) が余剰電力 (橙) となった。

シナリオ 2(図 5 右) は、太陽光パネル・バッテリーがあるため、余剰電力 (橙) は生じなかった。しかし、バッテリーの充電に伴う損失 59MWh(ピンク) は生じていた。負荷平準化 (3.2 節) に伴い、バッテリーから給電電力 (紫)84MWh が生じていた。充電時に充電されたバッテリーの構成は EV と据え置きバッテリーの比で 9 : 1 程度であった。

表 4 に、シナリオの評価基準と各シナリオでのその値を示す。また、シナリオごとの 1 日の外部電力の動きの例を

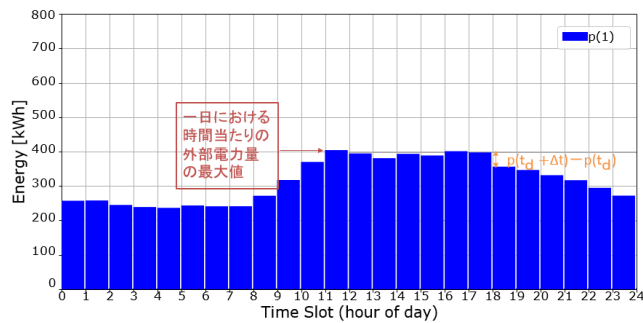


図 6 シナリオ 0 における 1 日の外部電力の動きの 1 例

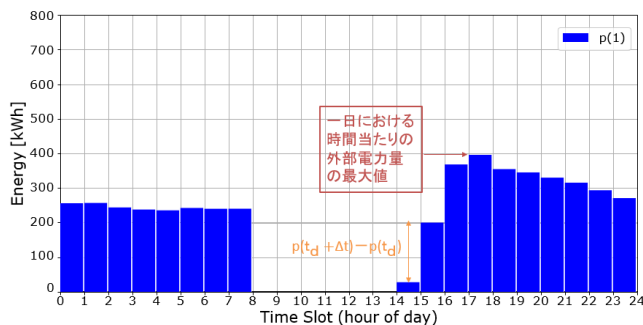


図 7 シナリオ 1 における 1 日の外部電力の動きの 1 例

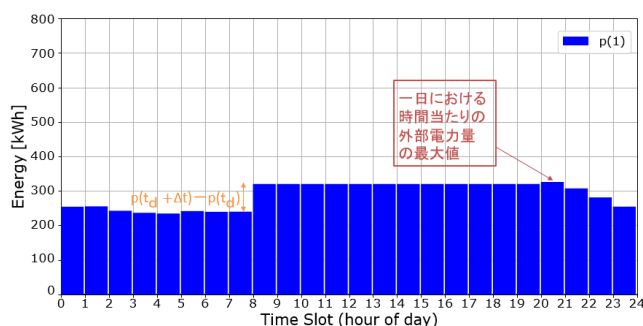


図 8 シナリオ 2 における 1 日の外部電力の動きの 1 例

図 6~8 に示す。表 4 における「外部電力の変化量の絶対値平均」とは $\sum_{t_d \in T} |p(1)(t_d + \Delta t) - p(1)(t_d)|$ を評価対象日 (単位は hour) で割った値であり、小さい方が変動が少ないことを表す。

表 4 から、前述の負荷平準化アルゴリズム (シナリオ 2) が他のシナリオに比べて、外部の急激な変動が小さく、かつピークも最小であることがわかる。

図 5 と表 4 から、本稿で提案する EV と据え置きバッテリーを組み合わせた負荷平準化アルゴリズム (シナリオ 2) によって、以下のことが示せた。

- 余剰電力を出さず (図 5 の橙)
- シナリオ 0 より少ない外部電力量で (図 5 の青)
- EV をうまく協調させて (図 5 の緑とオリーブ色の比)
- ピークを抑制・平準化し (表 4)
- かつ急激な変化を抑えられる (表 4)

よって、本稿で提案するデータベースと負荷平準化アルゴリズムを用いて、エネルギーフローシミュレーションの

結果を比較し、VGI の実現可能性に関する定量評価ができることを示した。

以上のことから、提案するデータベースは有用である。

5. 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 の定式化を行った。最後に、異なるシナリオ間で比較することで、提案するデータベースとアルゴリズムが VGI の観点から有用であることを示した。

今後の課題として、バッテリーの劣化の考慮や、EV の動向の考慮、需要や発電の予測 (今回は既知とした) などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は横浜国立大学学長戦略経費の支援による。

参考文献

- [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政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] Nicole D Sintov and P Schultz. Unlocking the potential of smart grid technologies with behavioral science. *Frontiers in psychology*, Vol. 6, p. 410, 2015.
- [8] Yuan Hong, Shengbin Wang, and Ziyue Huang. Efficient energy consumption scheduling: Towards effective load leveling. *Energies*, Vol. 10, No. 1, p. 105, 2017.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 渡辺隆史, 飯田惇子, 石毛大貴, 本藤祐樹, 富井尚志. 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用いた VGI の定量評価. 第 13 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2021), J13-3, pp. 1–8, 2021.