

# 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

田中 雄哉<sup>†</sup> 茨木 隆兵<sup>†</sup> 本藤 祐樹<sup>††</sup> 富井 尚志<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 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

<sup>††</sup> 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: †{tanaka-yuya-tx,ibaraki-ryuhei-gh}@ynu.jp, ††{hondo,tommy}@ynu.ac.jp

あらまし IoTの推進やオープンデータの公開により、建物の需要電力、自動車の走行ログ、および、再生可能エネルギーの発電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、これらのログを、時間粒度を統一して蓄積する統合データベースを構築し、電気自動車を有効活用するスマートグリッドのシミュレーションに適用する。提案手法は、蓄積されたログからマイクログリッド導入によって再生可能エネルギーが地産地消可能であることを示し、マイクログリッド導入の多様な意思決定を支援する。結果として、「再生可能エネルギーの余剰電力量の最小化」と「ピーク時需要電力量の最小化」の2つの導入目的に対し、それぞれ異なる適した解が求まるが、これらの両方が有効であることが示された。

キーワード エネルギーライフログ, オープンデータ, マイクログリッド, EV, 意思決定支援

## 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、人々の行動などのリアルデータ（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]。

一方で近年、地球温暖化への懸念から、世界全体がCO<sub>2</sub>排出削減のための取り組みを進めている[3]。しかし、現代の文明の維持・発展のためにはエネルギー消費は避けられない。そのため、CO<sub>2</sub>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」を実現する必要がある。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。また既存の発電システムのことも考慮すると、ピーク時の需要電力[W]を削減することも重要である。これら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。例えば再生可能エネルギーの余剰電力量を充電することで電力の地産地消に貢献し、充電した電力をピーク時に給電することでピークカットに貢献できる。

そこで本研究では、EVを有効活用するためのスマートグリッド環境を想定し、ライフログから新たなエネルギー消費社会のシミュレーションを試みる。このとき、建物の需要電力は繁忙期や閑散期、また人の行動によって日々異なる。また再生可能エネルギーの発電電力も季節や天候によって変動し、さらにEVのバッテリー残量も天候や道路状況などによって日々変動する。そのため、スマートグリッド環境の構築において、適切

な再生可能エネルギーの導入量やEVの導入台数を検討することは難しい。このような「そこだけ、その時だけ」に特有の状況を考慮したシミュレーションを行うには、「そこだけ、その時だけ」に存在するエネルギーに関する記録（エネルギーライフログ）を適切に管理し、詳細に分析できる必要がある。本稿では、このエネルギー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、マイクログリッドの導入意思決定にマイクロエネルギーライフログが有用であることを示す。

## 2. 研究背景

### 2.1 関連研究

センサ技術を活用した省エネは、様々な形で既に取り組みされている。江崎ら[4]は「東大グリーンICTプロジェクト」を立ち上げ、電力使用状況の可視化に関する実証実験を行った。Thamら[5]はユーザごとに最適な電力消費スケジュールを提示し、インセンティブを与えることで省エネを促進する実証実験を行った。Conteら[6]やChoiら[7]は、Beaconとスマートフォンによるユーザの簡易な位置測位から、電化製品を自動制御する手法を提案した。しかしこれらの取り組みはどれも、リアルタイムな電力の可視化や自動制御などを目的としており、取得したライフログを長期に渡り蓄積し、有効活用する取り組みはされていない。

また近年、EVのバッテリーを有効活用するための様々な取り組みが行われている。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すEV-VPP（EV-Virtual Power Plant）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。Brushら[10]は、15家庭分の実車EVを用いたピークシフト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。Udawattaら[11]は太陽光パネル(PV: PhotoVoltaic)とEVを構成要素としたマイクログリッドのシミュレーションを行い、昼の余剰発電を貯めるのに必要なEVの台数を計算した。Tusharら[12]やArikanら[13]は、再生可能エネルギーも含めた電力網において、EV・PHEV(Plug-in Hybrid EV)の充放電スケジューリングによって発電所からの供給電力量を少なくするシミュレーションを実データセットを用いて行った。Lamら[14]はEVを用いて地方の風力発電所の余剰電力を都市部へ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。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[15]。中川ら[16]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CO<sub>2</sub>の削減効果をシミュレーションで確認した。このようにEVのバッテリーの活用方法は様々あるが、これらはマクロなエネルギー量の概算にとどまっている。本研究の目的は、人の行動による需要電力の変動や、運転方法によるEVのバッテリー残量の変動なども考慮した定量値を求めることである。そのため、本研究は上述の関連研究とは本質的に異なる。

また、交通網におけるEVの走行経路の最適化によって、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[17][18]。中でもKurtulusら[19]は、同時にEVのバッテリー損耗の低減も果たした。これらにより、V2Gで利用可能な電力量はさらに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)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。

ここで本研究では、スマートグリッド社会におけるEVの働きを次のように考える。

- EVは基本的に夜間に充電し、昼間の電力需要を増大させない
- EVに夜間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。

後者の役割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、本研究の対象外とする。ここでは、EVが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ことに注目する。

多数のEVの移動先となる事業所にマイクログリッドを導入

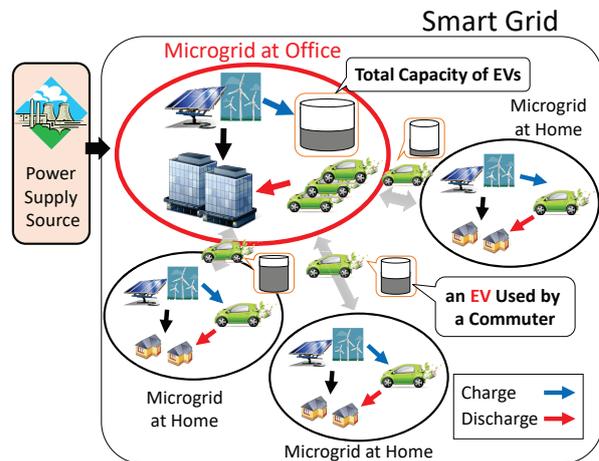


図1 想定スマートグリッド環境

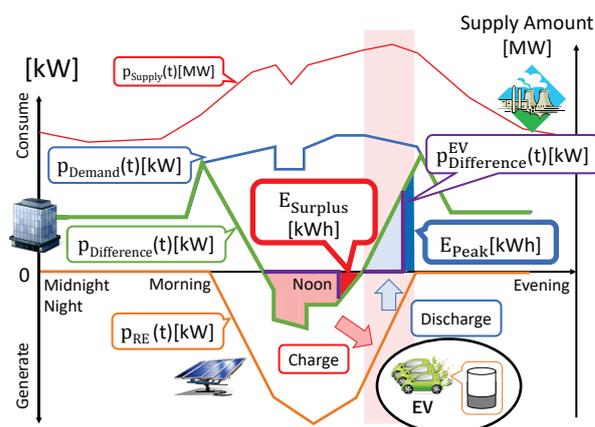


図2 マイクログリッドの1日の電力推移

した際の需要電力の変化を図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( $p_{Demand}(t) \geq 0$ )、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。

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
$\tau$	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
$I_{RE}, I_{EV}, I_{EVPS}$	万円	PV, EV, EVPS の初期導入コスト
$R_{RE}, R_{EV}, R_{EVPS}$	万円/年	PV, EV, EVPS の運転維持コスト
$p_{RE}^{Supply}(t)$	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
$EB$	円	電力供給元から電力を購入する際の電気料金
$C_{ICV}^{Commutate}$	万円/台/年	事業所が負担する, ICV で通勤するオフィスユーザへのガソリン代
$R_{EV}^{Commutate}$	万円/台/年	事業所が負担する, EV で通勤するオフィスユーザへの電気代

### 2.3 研究目標

事業所が 2.2 節で想定したマイクログリッドの導入を検討する場合、導入効果がどの程度見込めるかを事前に見積もりたい。以下の 3 点を「マイクログリッド導入効果」として定義する。

- 再生可能エネルギーの総余剰電力量  $E_{Surplus}$  の低下  
再生可能エネルギーにより発電された電力は、できるだけ全てその場所のマイクログリッド内で消費できるのがよい。すなわち、 $E_{Surplus}$  が 0 に近い方がよい。

- ピーク時必要電力量  $E_{Peak}$  の低下  
発電所から供給を受ける電力量は少ないほどよい (J (ジュール) の削減)。特に、社会的な電力需要のピーク時間帯には、全く供給を受けないのがよい (W (ワット) の削減)。すなわち、 $E_{Peak}$  が 0 に近い方がよい。

- 金銭的コストの低下  
持続可能なマイクログリッドの運用のためには、金銭的な投資対効果を事前に見積もる必要がある。

事業所は上記 3 点を意思決定要因として、マイクログリッドの導入検討シミュレーションを行う。その入力変数として、「PV の導入量」と「EV の導入台数」の 2 つを用いた。さらに「PV の導入量」と「EV の導入台数」に関わる値をパラメータとして、マイクログリッド導入効果を定量的に提示可能な DB を構築する。またこの DB を用いて、ユーザの目的ごとに適したマイクログリッド導入パターン (入力変数の値の組み合わせ) を検討可能な情報提示を行うことを目標とする。

## 3. エネルギーライフログ DB の構築と情報提示

本研究では、ライフログとオープンデータを統合した統合 DB を構築した [20] [21]。我々はこの DB をエネルギーライフログ DB と名付けた。

### 3.1 エネルギーライフログ DB の設計・実装

エネルギーライフログ DB では以下のログを蓄積する。

- 建物の需要電力ログ

我々の先行研究である SEE-Con [22] によって電化製品 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。これを事業所のマイクログリッドを構成するすべ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。サンプリング間隔は 1 分とした。

- 自動車の走行ログ

我々の先行研究である ECOLOG [23] によってマイクログリッドに所属する自動車を 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あらかじめ計算しておくことができる。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ログ

本研究では PV に焦点を当て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規格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 [24]。サンプリング間隔は 1 時間とした。

マイクログリッド導入効果の導出には、需要・発電差や EV への充電電量の導出が必要である。しかし、前述した 3 つのログはサンプリング間隔が様々である。本研究では最も単純な方法として、これらのログのサンプリング間隔  $\tau$  を 1 時間の粒度で揃えた。これにより、例えば 1 日や 1 年の電力量 (単位: Wh) の計算には、対象となるエネルギーライフログを指定し、SUM 演算を行うだけで高速に計算することができる。この統合データベースでの 1 日のマイクログリッドのインスタンス図を図 3 に示す。

図 3 の青色の実線で囲まれたリレーションシップはマイクログリッドの需要電力ログ ( $p_{Demand}(t) \cdot \tau$ ) を表しており、SEE-Con の電力ログを集約した View から導出される [22]。橙

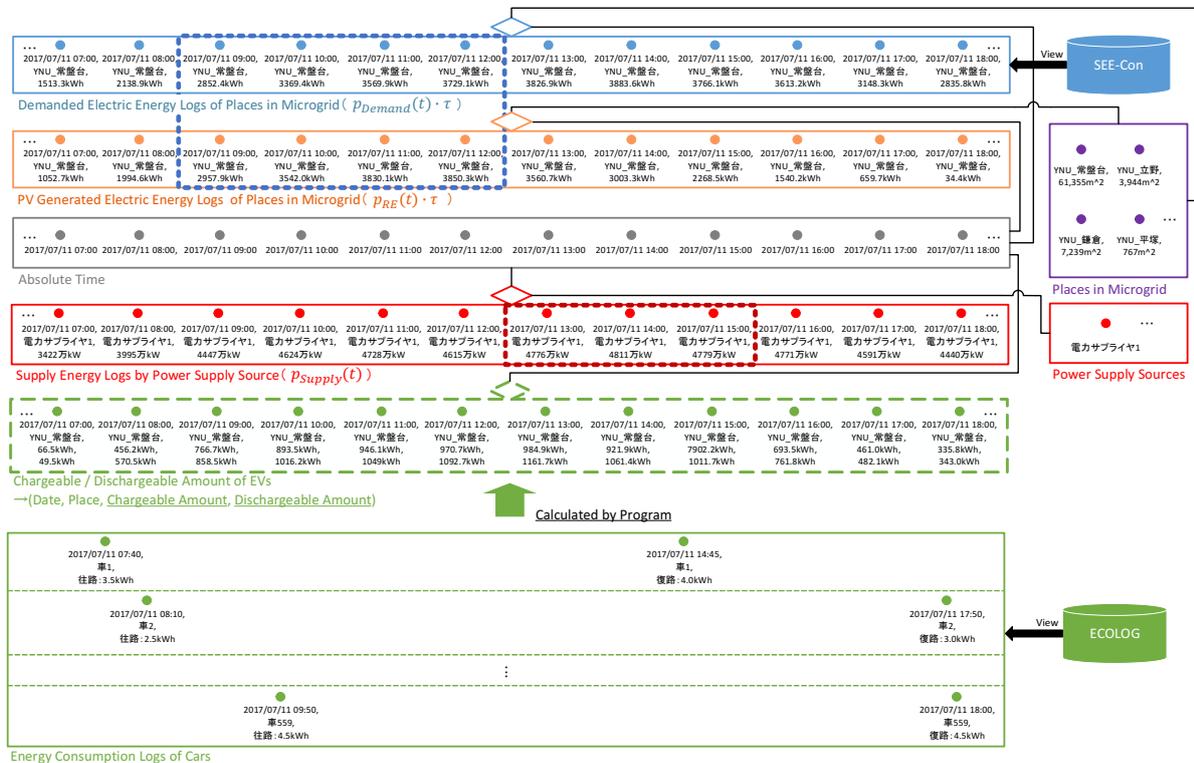


図3 エネルギーライフログDBのインスタンス図

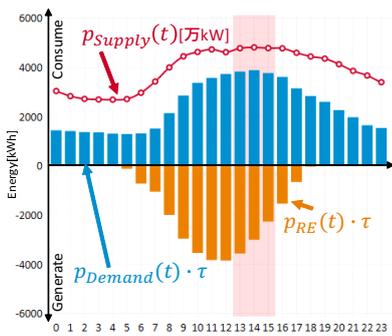


図4 エネルギーライフログの可視化

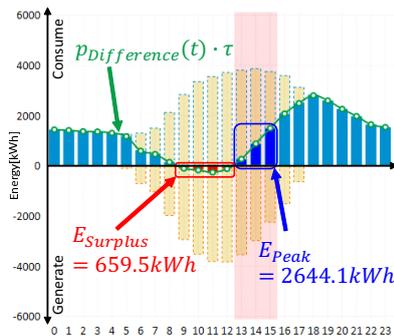


図5 需要・発電差計算後の可視化

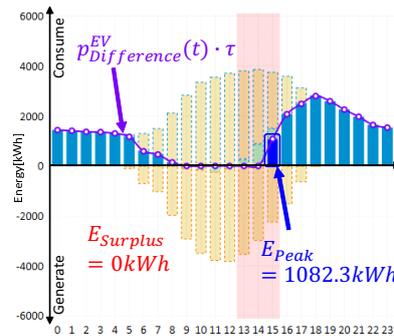


図6 EVによる充電後の可視化

色の実線で囲まれたリレーションシップはPVの発電推定ログ ( $p_{RE}(t) \cdot \tau$ ) を表している。赤色の実線で囲まれたリレーションシップは、社会的な電力ピークを決定するための電力供給元の供給実績ログ ( $p_{Supply}(t) \cdot \tau$ ) が蓄積されている。緑色の実線で囲まれたエンティティはマイクログリッドに所属する自動車にEVに置き換えた場合のエネルギー消費推定ログを表しており、ECOLOGの走行ログを集約したViewから導出される[23]。緑色の破線で囲まれたリレーションシップは、マイクログリッド内のEVの総充電可能量と総給電可能量を表す。EVは運転者の都合によりマイクログリッド内に駐車されている場合とそうでない場合がある。また前の時点での充電電量によってバッテリー残量は常に変化する。このように総充電可能量と総給電可能量は時系列的に変化するため静的なインスタンスとしては存在せず、プログラムで動的に導出される。このときのEVの運用方法に関して、我々はバッテリーの充放電の動的な制御により、再生可能エネルギーの余剰電力量やピーク時必要電力量の削減に大きく寄与することを確認している[25]。本稿では、EVの運用方法は導入検討の対象外とし、2.2節で述べたEVの働きから、「出発時満充電の場合[25]」のみを適用する。

図3の青破線部(9:00~12:00)においてはPVの発電電力が必要電力を上回っており、余剰電力が発生するためEVに充電を行う。また、赤破線部(13:00~15:00)においては電力供給元の需要電力がピークであるため、EVから建物に給電を行う。このような電力の移動も考慮した検索を、ログの時間粒度を揃えることで時点をキーとした検索として行うことができる。

### 3.2 マイクログリッド導入意思決定要因の定式化

本節では、2.3節で設定したマイクログリッド導入効果を定式化する。定式化に用いる文字式は表1に示す。

- 再生可能エネルギーの総余剰電力量 ( $E_{Surplus}$ )

$$E_{Surplus} = - \sum_{t \in T_{RESurplus}} p_{Difference}^{EV}(t) \cdot \tau$$

$E_{Surplus}$  が0に近づくほど、エネルギーの地産地消が達成できたといえる。

- 総ピーク時必要電力量 ( $E_{Peak}$ )

$$E_{Peak} = \sum_{t \in T_{Peak} \wedge t \notin T_{RESurplus}} p_{Difference}^{EV} \cdot \tau$$

$E_{Peak}$  が0に近づくほど、ピークシフトを達成できたといえる。

- 投資回収期間

マイクログリッド導入後のエネルギー量の定量化により、マイクログリッド導入によって削減されるコスト  $C$  の計算が可能となった。ここでは電気料金と通勤手当の2つを扱う。電気料金は、PVやEVの導入により削減できた電気料金である。通勤手当は、ガソリン車からEVへの置き換えにより、通勤にかかるガソリン代を電気代に置き換えることができ、これによって生じる差額である。コストに関する評価手法は様々あるが、本研究では投資回収期間を用いた。投資回収期間 (*PaybackPeriod*) は以下の式で計算した。

$$PaybackPeriod = \frac{I}{C - R}$$

$$I = I_{RE} + I_{EV} + I_{EVPS}$$

$$C = \sum_t (p_{RE}^{Supply}(t) \cdot \tau + p_{EV}^{Discharge}(t) \cdot \tau) \times EB + (C_{ICV}^{Commute} - R_{EV}^{Commute})$$

$$R = R_{RE} + R_{EV} + R_{EVPS}$$

投資回収期間は現実的な期間の中で、できるだけ短い方がよい。

### 3.3 マイクログリッドの導入意思決定のための情報提示

図4は図3のインスタンス図で示した、ある1日のエネルギーライフログを可視化したタイムライングラフである。棒グラフの正の部分はマイクログリッドの需要電力 ( $p_{Demand}(t) \cdot \tau$ ) を、負の部分は再生可能エネルギーの発電電力 ( $p_{RE}(t) \cdot \tau$ ) を表す。ここで需要・発電差 ( $p_{Difference}(t) \cdot \tau$ ) を計算すると、グラフは図5のように変化する。さらにEVを導入して電力の充給電を行うと、グラフは図6のように変化する ( $E_{Surplus} = 0kWh$ ,  $E_{Peak} = 1082.3kWh$ )。このようにエネルギーライフログのタイムライン表示から、ある1日の電力推移を詳細に分析でき、定量的なマイクログリッド導入効果を確認できる。

次に、この1日のマイクログリッド導入効果を複数年で集約した情報提示例を図7に示す。これは3.2節で定義した3つの意思決定要因を3軸の散布図で表したものである。x軸は再生可能エネルギーの総余剰電力量 ( $E_{Surplus}$ )、y軸が総ピーク時需要電力量 ( $E_{Peak}$ )、そしてz軸(カラスケール)が投資回収期間を表す。散布図中にプロットされた1点は、あるPVの導入量、EVの導入台数のときのマイクログリッド導入効果を示す。3.2節の定義から、プロット点はグラフの左下に行くほど  $E_{Surplus}$  と  $E_{Peak}$  が0に近づくため良く、色は青に近いほど投資回収期間が短いため良い。これを見ることで、導入パターンごとのマイクログリッド導入効果を一覧できる。

## 4. 実データを用いた情報提示と意思決定例

### 4.1 エネルギーライフログの取得・条件設定

本研究では、提案手法の有用性検証について実データを用いて評価を行う。本節では評価に用いた実データ、入力変数、およびパラメータ設定について説明する。

- 建物の需要電力ログ

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

- 自動車の走行ログ

ある1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。これらの自動車に対して個々に仮想の入構・退構時消費エネルギーログを割り当てた。仮想の消費エネルギーログに関するパラメータを表2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 Home<sup>(注2)</sup>を想定し、その仕様から充電速度の上限を8.55kW、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。

- PVの発電ログ

PVの発電量の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3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(61355m<sup>2</sup>)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<sup>(注1)</sup>。

- 電力供給元の供給実績ログ

横浜国立大学が属する電力網として、東京電力が公開しているでんき予報<sup>(注3)</sup>を用いた。またピーク時間帯の定義は、1日の最大電力の時間帯1時間に対してその前後の1時間を考慮した3時間とした。

- 投資回収期間の計算に用いた値

現在のPVのコスト ( $I_{RE}$ ,  $R_{RE}$ ) として用いた値を表4にまとめる。参考にした実績値は、導入規模別に集計がしてあったため、本稿でもこれに倣った。また、今回はPVを屋根の上に設置する想定のため、土地造成費用は0とした。

次に、現在のEV, EVPSのコスト ( $I_{EV}$ ,  $I_{EVPS}$ ,  $R_{EV}$ ,  $R_{EVPS}$ )、また電気料金 ( $EB$ ,  $R_{EV}^{Commute}$ ) として用いた値を表5にまとめる。EVは運転者個人の所有物であるとし、EVの初期導入費用  $I_{EV}$  は0とした。一方で、事業所はバッテリーの交換費用  $R_{EV}$  を負担する。これにより運転者はEVのモビリティとしての機能を、事業者はEVのV2G利用するためのバッテリーとしての機能を所有することを想定した。

通勤手当  $C_{ICV}^{Commute}$  の計算には横浜国立大学の給与規則<sup>(注4)</sup>の値を用いた。支払われる料金は通勤距離による。本稿では、割り当てたEVの仮想消費エネルギーから、電費を6.0km/kWhとして換算し、通勤距離とした。

これらは、各種資料を参考に現在の価格をまとめたものだが、スマートグリッド技術は未だ黎明期であり、コストとして非常に大きい。今回の意思決定例の提示では、現実的な投資回収期間の中で検討をするため、将来価格を想定した値を用いた。具体的には、PVとEVにかかるコスト ( $I_{RE}$ ,  $R_{RE}$ ,  $R_{EV}$ ) を1/2とし、EVPSにかかる初期導入費用 ( $I_{EVPS}$ ) を1/3、運転維持費用 ( $R_{EVPS}$ ) を1/6とした。

(注1)：横浜国立大学施設部, <http://shisetsu.ynu.ac.jp/gakugai/shisetsu/>, (2018-01-10 アクセス)。

(注2)：日産:LEAF to Home とは, <http://ev.nissan.co.jp/LEAFTOHOME/>, (2018-01-10 アクセス)。

(注3)：東京電力パワーグリッド：でんき予報, <http://www.tepco.co.jp/forecast/index-j.html>, (2018-01-10 アクセス)。

(注4)：横浜国立大学：教職員給与規則, <http://www.ynu.ac.jp/about/information/law/independence/pdf/kyosyokuin-kyuyo-No110.pdf> (2018-02-13 アクセス)。

表 2 自動車の消費電力ログに関するパラメータ設定

パラメータ	設定値	備考
台数	559 台	
置き換えシミュレーションのための EV	初期型日産 LEAF	バッテリー容量 24kWh (損耗を考慮して充電量を最大 8 割, 最小 3 割までとした)
仮想消費エネルギー	0.67-7.76kWh	一様乱数により割り当て

表 3 オープンデータの取得方法・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 (注5)。
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 (注6)。NEDO の日射量データベース (注7) 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 (注8) より取得。

#### 4.2 マイクログリッド導入効果の提示と意思決定例

本節では、4.1 節で述べた実データを用いたマイクログリッド導入の意思決定シミュレーションを示す。本稿では横浜国立大学常盤台キャンパスを検討対象とし、2013 年 1 月 1 日から 2017 年 12 月 31 日までの 5 年間 (1826 日) を集計対象とした。

図 5 は PV を 100% 導入した時の需要・発電差を示している。 $p_{Difference}(t) \cdot \tau$  は EV が 0 台の時の  $p_{Difference}^{EV}(t) \cdot \tau$  と同等であり、3.2 節の式から  $E_{Surplus} = 659.5kWh$ ,  $E_{Peak} = 2644.1kWh$  が得られる。 $E_{Surplus}$  と  $E_{Peak}$  は共に 0 であることが望ましいが、この日はどちらも達成できなかった。これを同様の導入パターンで 5 年間集計すると、 $E_{Surplus} = 0$  にできた日数は 584 日、 $E_{Peak} = 0$  にできた日数は 59 日存在した。

図 6 は PV に加えて EV を 559 台導入したときのグラフである。3.2 節の式から、 $E_{Surplus} = 0kWh$  (図 5 比 100%減)、 $E_{Peak} = 1082.3kWh$  (図 5 比約 41%減) となり、余剰電力量をすべて削減できた。同様に 5 年間で集計すると、 $E_{Surplus} = 0$  にできた日数は 818 日、 $E_{Peak} = 0$  にできた日数は 171 日であり、PV のみを導入した場合と比べて日数を増加することができた。1 日ごとの詳細な分析から、日ごと、入力変数ごとのマイクログリッド導入効果を定量的に確認することができた。

次に、5 年分のログを集約し、マイクログリッドの導入検討を行う。検討に用いた入力変数の値を表 6 に示す。PV, EV の各入力変数の値の組み合わせが検討対象となるので、計 143(11×13) 通りが検討対象となる。図 7 はこのうち投資回収期間が 30 年以内のものを表示しており (計 115 件)、マイクログリッド導入前は  $E_{Peak} = 13.0GWh$  であった。

(注5): 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)。

(注6): 横浜市環境創造局, <http://www.city.yokohama.lg.jp/kankyo/>, (2018-01-10 アクセス)。

(注7): 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, <http://www.nedo.go.jp/library/nishsharyou.html>, (2018-01-10 アクセス)。

(注8): 気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>, (2018-01-10 アクセス)。

表 4 PV のコストとして使用した値 (注9)

$I_{RE}$ : [万円/kW]	10-	50-	500kW-	1-	2	
$R_{RE}$ : [万円/kW/年]	50kW	500kW	1MW	2MW	MW-	
$I_{RE}$	システム費用	32.7	30.0	29.5	28.7	31.5
	土地造成費用	0	0	0	0	0
	接続費用	0.89	0.63	0.67	0.74	1.26
$R_{RE}$	運転維持費	0.6	0.4	0.5	0.6	0.8

表 5 EV, EVPS のコストと電気料金として使用した値

項目[単位]	使用した値	備考
$I_{EV}$ [万円/台]	0	EV は運転者個人が所有する。
$R_{EV}$ [万円/台/年]	12	バッテリー寿命を 5 年間とし、またバッテリー交換費用を 60 万円とした。
$I_{EVPS}$ [万円/台]	69.12	(注10)
$R_{EVPS}$ [万円/台/年]	30	(注11)
$EB$ [円]	17.45	(注12)
$R_{EV}^{Commute}$ [円/台/日]	209.4	$24 \times (0.8 - 0.3) \times EB$

表 6 検討に用いるパラメータ値

パラメータ	値
PV[%]	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
EV[台]	0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 559

本稿ではマイクログリッド導入パターンの決定に、PV と EV の入力変数の値を順番に決定していく手法を取る。この入力変数の値決定の手法や順序は、マイクログリッド導入の目的や優先事項によって異なる。例えば、EV の導入台数が事前に決まっている場合には、EV の導入台数を決定し、他の入力変数の値を検討していくことが良い。またマイクログリッド導入の目的には、環境投資によって生じる企業価値のような定量化できない事項も含まれる。このように検討方法や価値基準は様々であり、ユーザごとに解が多様であるためにこの問題は単純に最適化できない。そのため、実データを基にシミュレーション結果を可視化しながら検討することが良いと考えた。

これらを踏まえた上で、本稿では定量化したエネルギー量とコストのみに着目する。そして以下の異なる導入目的を持つ 2 人のユーザを仮に想定し、それぞれに適したマイクログリッド導入パターンを検討する。

- ユーザ A

再生可能エネルギーの効率的な利用を重視し、再生可能エネルギーの総余剰電力量  $E_{Surplus}$  をできるだけ少なくすることを目的とする。(図 7 中のプロット点が左側にある方がよい)

(注9): 経済産業省: 平成 29 年度以降の調達価格等に関する意見, [http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/pdf/20161219002\\_01.pdf](http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/pdf/20161219002_01.pdf), (2018-01-10 アクセス)。

(注10): 株式会社 JM: 設置工事のご案内, <http://www.matabee.com/consumer/evp/outline.html>, (2018-01-10 アクセス)。

(注11): 次世代自動車振興センター: 充電インフラ整備事業採算性等調査, [http://www.cev-pc.or.jp/chosa/pdf/H25\\_chosa\\_1\\_honpen.pdf](http://www.cev-pc.or.jp/chosa/pdf/H25_chosa_1_honpen.pdf) (2018-01-10 アクセス)。

(注12): 横浜国立大学: エコキャンパス白書 2017, [http://shisetsu.ynu.ac.jp/gakugai/shisetsu/4kan\\_mane/ecocampus/hakusyo/eco\\_campus2017.pdf](http://shisetsu.ynu.ac.jp/gakugai/shisetsu/4kan_mane/ecocampus/hakusyo/eco_campus2017.pdf) (2018-02-13 アクセス)。

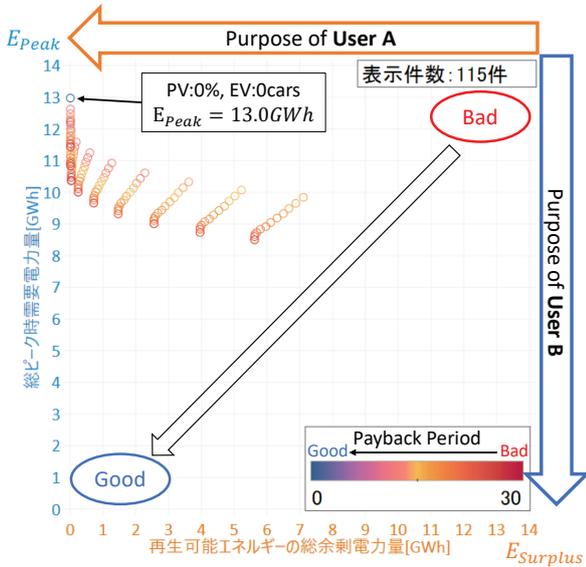


図7 マイクログリッド導入効果の可視化

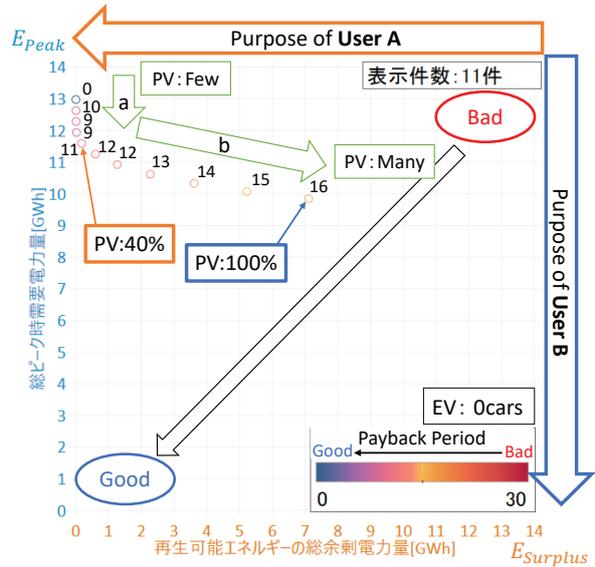


図8 PVの導入検討

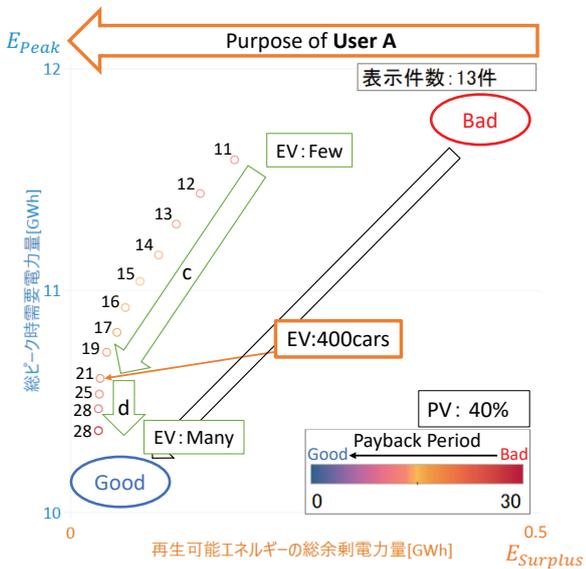


図9 EVの導入検討(ユーザA)

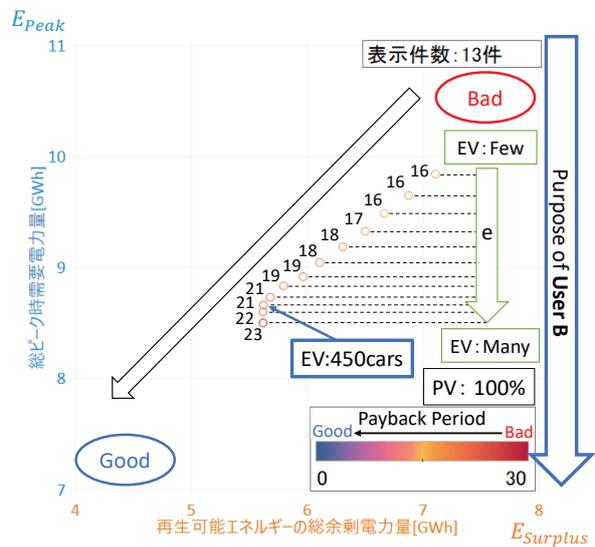


図10 EVの導入検討(ユーザB)

● ユーザB

社会的なピーク需要の削減を重視し、総ピーク時需要電力量  $E_{Peak}$  をできるだけ少なくすることを目的とする。(図7中のプロット点が下側にある方がよい)

図8は、EVの導入台数を0台に固定し、PVの導入率を変化させたときのマイクログリッド導入効果を表示している。PVの導入率を増加させると、導入率が小さいうち(矢印a)はグラフの左下方向にプロット点が移動しているが、さらに増加させると右下方向に大きく移動した(矢印b)。ユーザAはプロット点を左下に近づけつつも、特に左側にしたい。そこで、ユーザAは矢印aと矢印bの中間に位置する「PV導入率: 40% ( $E_{Surplus} = 0.2GWh, E_{Peak} = 11.6GWh$ )」を選択した。一方で、ユーザBはプロット点をできる限り下側にしたい。そこで、ユーザBはプロット点が最も下にある「PV導入率: 100% ( $E_{Surplus} = 7.1GWh, E_{Peak} = 9.8GWh$ )」を選択した。

図9は、PVの導入率をユーザAが選択した40%に固定し、EVの導入台数を変化させたときのマイクログリッド導入効果

を表示している。なお、グラフはプロット点が見やすくなるよう図7から一部を拡大して表示している。EVの導入台数を増加させると、プロット点はグラフの左下方向に移動できている(矢印c)が、導入台数が多くなると、下方向に移動した(矢印d)。これはEVの運用方法や置き換える車の選択方法によるものである。今回は置き換える車の選択方法を、「事業所への到着時刻が早い順」とした。そのためEVの導入台数の増加に伴い、遅い時刻に到着する車が増え、比較的昼間に発生しやすい余剰電力を受け取ることができなくなった。今回のケースでは、ユーザAは矢印cと矢印dの中間に位置する「EV導入台数: 400台 ( $E_{Surplus} = 0.03GWh, E_{Peak} = 10.6GWh$ )」を選択した。このとき、投資回収期間は21年で、初期投資額は487百万円であった。

図10は、PVの導入率をユーザBが選択した100%に固定し、EVの導入台数を変化させたときのマイクログリッド導入効果を表示している。EVは電力を夜間から昼間へ移動する役割を持つ。そのため、導入台数を増やすほどグラフの下方向にプロッ

ト点を移動できている (矢印 e)。ここでは PV の寿命が約 20 年であることを基準として、投資回収期間が 21 年となる「EV 導入台数: 450 台 ( $E_{Surplus} = 5.6GWh, E_{Peak} = 8.7GWh$ )」を選択した。このとき、初期投資額は 1,092 百万円であった。

ここまでで、異なる目的を持つ 2 人のユーザ A, B のマイクログリッド導入意思決定シミュレーションを示した。結果として、異なる導入パターンが得られたが、投資回収期間は 21 年と同一であった。ユーザ A の導入パターンでは、社会的な電力ピークの削減にはあまり貢献できない (約 18%削減) が、再生可能エネルギーを地産地消できている。一方でユーザ B の導入パターンでは、社会的な電力ピークの削減には貢献する (約 33%削減) が、再生可能エネルギーの地産地消はできず、初期投資額が高いために、システムの故障などにより採算が取れなくなるリスクが大きい。これらはユーザごとに導入目的が異なることによって生じた差であるが、どちらも解として成立している。これらのことから、提案システムが複数のマイクログリッド導入目的に対し、それぞれに適したマイクログリッド導入パターンの検討に有用な情報提示が可能なが示された。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、EV を有効活用するためのスマートグリッド環境を想定し、エネルギーライフログからスマートグリッド社会のエネルギー消費をシミュレーション可能なエネルギーライフログ DB の構築を行った。また異なる目的を持つユーザに対し、それぞれに適する解を導出可能なことを実データから示した。

今後の課題としては、需要電力ログや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、EV の運用方法や置き換える EV の選択方法などを入力変数として追加し、さらに多様な意思決定のためのシステムとして拡張することが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は平成 29 年度横浜国立大学大学院環境情報研究院共同研究プロジェクトの支援による。

## 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:新産業構造ビジョン, <http://www.meti.go.jp/press/2017/05/20170530007/20170530007-2.pdf>, 2018-03-13.
- [3] 経済産業省資源エネルギー庁:平成 28 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2017), <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2017pdf/>, 2018-03-13.
- [4] 江崎浩, 落合秀也, “東大グリーン ICT プロジェクト”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J94-B, No.10, pp.1225–1231, 2011.
- [5] C. Tham, C. Zhou, “Ambient Sensing-based Incentives for Behavior Modification in Demand Response”, IEEE Int'l Conf. Smart Grid Communication, pp.193–198, 2013.
- [6] G. Conte, M. De Marchi, A. A. Nacci, V. Rana, D. Sciuto, “BlueSentinel: a first approach using iBeacon for an energy efficient occupancy detection system”, Proc. 1st ACM Conf. on Embedded Systems for Energy-Efficient Buildings, pp.11–19, 2014.
- [7] M. Choi, W. Park, I. Lee, “Smart Office Energy Saving Ser-

- vice Using Bluetooth Low Energy beacons and Smart Plug”, IEEE Int'l Conf. on Data Science and Data Intensive Systems, pp. 247–251, 2015.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] L. Udawatta, U. K. Madawala, D. Muthumuni, M. Vilathgamuwa, “Control of Solar Powered Micro-grids Using Electric Vehicles”, IEEE 3rd Int'l Conf. on Sustainable Energy Technologies, pp.270–275, 2012.
- [12] 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.
- [13] A. Arikian, R. Jin, B. Wang, S. Han, K. Suh, P. Zhang, “Optimal Centralized Renewable Energy Transfer Scheduling for Electrical Vehicles”, IEEE Int'l Conf. on Smart Grid Communications, pp.247–252, 2015.
- [14] A. Y. S. Lam, K. Leung, V. O. K. Li, “An Electric-Vehicle-based Supplementary Power Delivery System”, IEEE Int'l Conf. SmartGridComm, pp.307–312, 2015.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] D. Karbowski, V. Sokolov, A. Rousseau, “Vehicle Energy Management Optimisation through Digital Maps and Connectivity”, In 22nd ITS World Congress, pp. 5–9, 2015.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 西本直樹, 北島大, 西山誠人, 田中雄哉, 小泉恭平, 本藤祐樹, 富井尚志, “マイクログリッド導入効果検討のためのライフログを用いた状況別電力評価が可能な DB の構築”, 第 8 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2016), H2-3, 2016.
- [21] 北島大, 西山誠人, 田中雄哉, 富井尚志, “ライフログを用いたマイクログリッド導入効果検討が可能な DB の構築と需給マッチング効果の提示”, 情報処理学会研究報告, Vol.2016-DBS-163, No.21, pp.1–6, 2016.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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”.
- [25] 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.