

エネルギーライフログDBを活用した負荷平準化のための 需要側エネルギー管理

深野 巧也[†] 渡辺 隆史[†] 小池 風樹[†] 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: [†]{fukano-takuya-jh,watanabe-takashi-rz,koike-fuki-dn}@ynu.jp, ^{††}{hondo,tommy}@ynu.ac.jp

あらまし 我々は先行研究で、エネルギー使用に関するライフログ(エネルギーライフログ)に対して情報検索ができるデータベースシステムであるエネルギーライフログDB(ELLDB)を構築し、その活用事例を積み上げてきた。本研究では、事業所に再生可能エネルギーを導入する時に、系統から受け取る電力を平準化するシミュレーションをELLDBを用いて行う。そして、バッテリーを用いて需要エネルギーの負荷平準化をするシミュレーションをしたうえで、「機器の省電力化」と「作業時間の入れ替え」をバッテリーによる充給電と組み合わせることで負荷平準化のための充給電によるエネルギー損失を削減できることを示した。

キーワード スマートグリッド, エネルギーライフログ, データベース, 負荷平準化, IoT

1. はじめに

現在、持続可能な開発目標(SDGs)を掲げる「持続可能な開発のための2030アジェンダ」の国連での採択や、世界全体で今世紀後半に温室効果ガス的人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との均衡の達成を目指すとする「パリ協定」により、世界的に二酸化炭素の排出量を削減する動きが高まっている[1]。二酸化炭素の排出量を削減するために重要な考え方として、エネルギーの消費量を減らす「省エネ」と再生可能エネルギーを積極的に利用する「創エネ」がある。しかし、「創エネ」のために必要な再生可能エネルギーには発電量が不安定であるという問題がある。

問題の具体例を挙げると、日本に先駆けて再生可能エネルギー発電源の一種である太陽光パネルを大量導入したカリフォルニアではダックカーブ現象と呼ばれる現象が起きていることが報告されている[2]。これは、太陽光発電の発電量が落ち込み始める夕方から夜にかけて急激に実需要電力が増加することで電力供給側への負荷が高くなる現象であり、電力システムの安定性を著しく損ない、発電の効率も下げてしまう。

そこで、現在は再生可能エネルギーを効率的に利用するために地域内で電力の融通をするための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[3]。スマートグリッドは、再生可能エネルギーへの対処をはじめ、省エネや、エネルギー利用の高度化など、様々なエネルギーソリューションを統合するシステムである。余剰電力を受け取るための蓄電池と組み合わせる分散型電源である再生可能エネルギーを利用することで、電力システムを不安定にせず再生可能エネルギーを導入できることが期待されている。

一方で、社会のデジタル化によって実現されるSociety5.0がSDGsに貢献するということが現在期待されている。特に、

(1)AI・IoT・ビッグデータの活用による基礎インフラと生活サービスの効率的な管理・運営(2)ICTを活用したエネルギーマネジメントによる地域のサステナビリティの向上(3)エネルギー効率の向上効果が期待されている[4]。これらを実現する鍵になるのは実世界から得られた様々なデータを有効に活用することである。しかし、ライフログデータ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い。この結果、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[5]。

このような背景から我々はこれまで、日常的に取得できるエネルギーに関する生活データ(エネルギーライフログ)と、気象ログや社会的な電力需要などのオープンデータを統合して蓄積するデータベース(ELLDB)を構築し、ライフログデータやオープンデータをエネルギー分野に活用してきた[6][7]。

本研究では、マイクログリッドの内の電力消費の微小な単位として事業所一部屋と太陽光パネル1つという組み合わせを想定する。そして、その微小な単位に対して外部の系統から供給される電力を負荷平準化させることを試みる。ここでの事業所1部屋の消費電力は数kWほどを想定しており、これはマイクログリッドの消費電力の約1000分の1ほどであることから、この微小な単位を本稿ではマイクログリッドのナノセルと呼ぶ。本稿では、ナノセルが受け取る電力の負荷平準化のための提案と、その提案を実行したときのシミュレーションをELLDBを用いて行う。

これは、マイクログリッドグリッド全体の需要電力はナノセルの需要電力の積み上げであり、個々のナノセルにおいて負荷平準化が達成されればそれはマイクログリッド全体の負荷平準化までスケールすると考えたためである。すなわちマイクログリッド全体の負荷平準化を達成することを目的と定めようとして、個々のナノセルのレベルで負荷平準化を達成することを支援する。一般に、事業所の多くは午前需要電力が一度上昇したあ

と深夜から早朝にかけて緩やかに需要電力が低下するという特徴を持つ。そのような事業所が多数存在する都市部では、電力需要の高低が同期して発生する。このため、電力需要を融通して高低を打ち消しあうことは難しい。したがって、グリッド全体の負荷平準化を目指すための手段として、個々のナノセルが負荷平準化することは有効であると考えられる。

本研究では再生可能エネルギーをある事業所に導入する際に、バッテリーを用いて系統からの電力の負荷平準化を達成することによるメリットとデメリットをその場所のデータから定量的に示すことを1つ目の目標とする。また、バッテリーによる負荷平準化のデメリットである充電時のエネルギー損失について、事業所内の機器の省電力化やメンバが事業所で作業をする時間を入れ替えることなど、エネルギーの消費側のマネジメントによってそれがどれだけ削減できるのかを定量的に示すことを2つ目の目標とする。

2. 研究背景

2.1 関連研究

ICT 技術を活用した需要エネルギー管理は、様々な形で既に取り組みされている。江崎ら [8] は「東大グリーン ICT プロジェクト」を立ち上げ、東京大学工学部 2 号棟をフィールドとした電力使用状況の可視化に関する実証実験を行い、30%以上の効果を上げている。Tham ら [9] はシンガポール国立大学内の居住エリアにおいて、居住者に電力の賢い使い方を提示し、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。しかしこれらは、今の状況の可視化や家電の自動制御などにとどまっており、ライフログとしての活用はなされていない。

また、再生可能エネルギーと蓄電池を組み合わせたスマートグリッドに関する研究も現在盛んに行われている。Sintov らは、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の促進や、運用の効率化を図った [10]。Simm ら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島で実証実験を行った [11]。

日本国内のスマートグリッド研究に目を向けると、馬場ら [12] 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。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]。

電力系統の安定化や、高いエネルギー効率の維持のためには負荷平準化は重要な課題である。Karfopoulos らは、個々の EV が充電の料金の最小化を行うことで、負荷平準化が達成されるようなシミュレーションを行った [14]。Hong らは、電力の負荷平準化を目的に、グリッド内の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 [15]。Xu らは、異なるタイプの建物を組み合わせることでエネルギーの負荷平準化を達成するためのシミュレーションが行えるシステムを提案した [16]。

研究背景

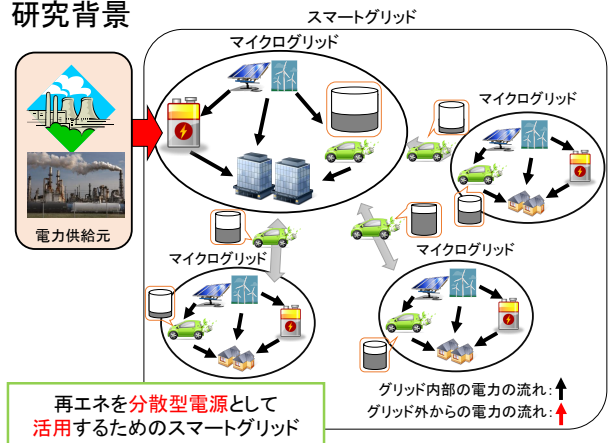


図1 想定スマートグリッド環境

2.2 想定環境

本研究で想定する電力を地産地消するスマートグリッドの概略を図1に示す。

スマートグリッドの内部には電力を消費する建物があり、分散型電源として再生可能エネルギー発電施設も備えられている。各建物はスマートグリッド内の再生可能エネルギーが発電した電力を受け取り、それでも足りない電力はグリッド外部の電力供給者から受け取るものとする。グリッド内にはバッテリーが存在し、電力系統からの電力やグリッド内の再生可能エネルギーを充電したり、建物に給電を行ったりすることができる。

スマートグリッド内のナノセルにおける1日の需要電力と再生可能エネルギーによる発電電力を図2に示す。これは消費した電力を正に、発電した電力を負に取ったグラフである。青色は系統から供給される電力を、水色はグリッド内部の発電によって受け取った電力を、橙色は消費しきれずに余ってしまった再生可能エネルギーの電力を、黄色はオフィスが受け取った再生可能エネルギーの発電電力を表す。再生可能エネルギーによる発電（黄色+橙色）を建物に給電することから、事業所に系統から供給される電力は事業所の消費電力を表す（青色+水色）ではなく（青色）となる。また、本稿では再生可能エネルギーを地産地消するようなマイクログリッドを考える。これは、同地域において再生可能エネルギーは同期して発生するために、売電のための送電網が不足することや、ダックカーブ現象の原因となりうるためである。そこで、余剰電力（橙色）は系統に売電せず、電力の損失として数えることとする。

2.3 問題設定

図3のように、建物の消費電力は建物の中の各部屋の消費電力の積み上げで成り立っている。そのため、電化製品単位で消費電力を管理する需要マネジメントはスケールすれば建物全体の消費電力にも影響を与える。

本稿では、図1のようなスマートグリッドのもとで、マイクログリッド内のナノセルが外部から供給される電力量の負荷平準化を行うことで、スマートグリッド全体の需要電力の負荷平準化を達成することを目的とする。そのために、事業所に再生可能エネルギーを導入したときにバッテリーを使って負荷平準

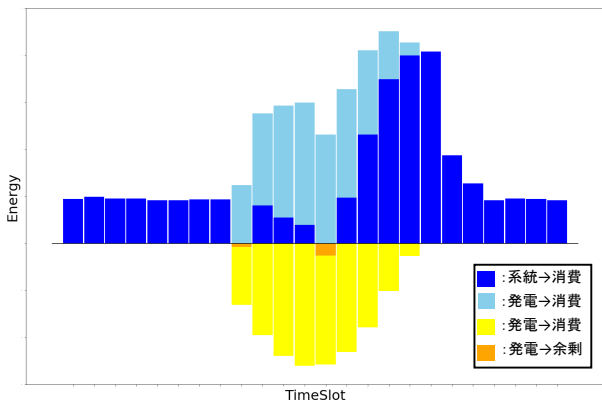


図2 ナノセルの1日の電力推移

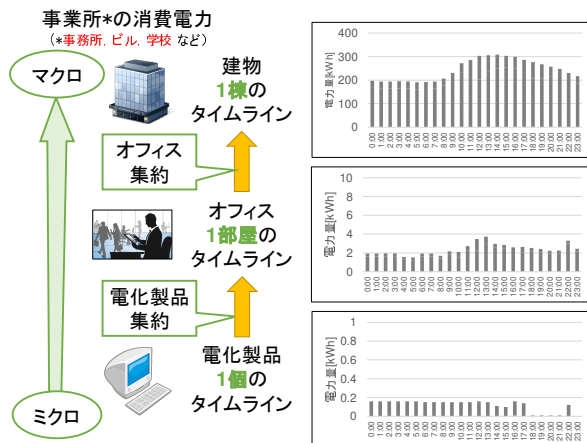


図3 消費電力量の積み上げ

化を行うことをシミュレーションし、それを評価する。

負荷平準化のための具体的な方法としては、バッテリーを用いた充電電を主とし、それに加えて「機器の省電力化」と「作業時間の入れ替え」という需要電力のマネジメントを追加で行うことを考えてシミュレーションを行う。

シミュレーションの際の評価指標には、

- 1日の系統電力がどれだけ平準化されているか
- 1日の系統電力の最大値（ピーク電力）
- 1日の余剰電力量とバッテリーの充放電で損失した電力量（電力ロス）

の3つを用いることとした。以下、これらの評価指標の詳細を述べる。

電力の負荷平準化を評価する指標については Load rate や Peak - valley difference ratio や分散など様々なものが提案されているが、本稿では標準偏差を用いて負荷平準化の評価を行うこととする。標準偏差はデータの散らばりの度合いを示す値であるため、この値が大きくなるということは平均値より離れた時点が多く存在することを表す。同様に、この値が小さくなるということは平均値に近い時点が多く存在することを表す。そのため、系統から供給された電力の標準偏差が小さいことは系統から供給された電力が平均付近で安定していることを意味するため、負荷平準化の観点から考えるとこの指標は小さい方

が望ましい。

1日の系統電力の最大値は、高ければ高いほど電力供給者にピークに備えた発電設備を用意させることになってしまうため、この指標は小さい方が望ましい。

電力ロスについては、本稿ではナノセルにおいて消費しきれなかった再生可能エネルギーの余剰量と、バッテリーに充電電を行う際に生じる変換で失われるエネルギーを電力ロスとして考える。これは電力として使えなかったエネルギーを表すため、電力ロスは小さい方が望ましい。

以上から、これらの指標はすべて小さい方が望ましい。本稿では、再生可能エネルギー導入時にバッテリーを用いて負荷平準化を行う際に、これらの指標がどのように変化するかについてシミュレーションを行ったうえで評価する。

3. ELLDB による負荷平準化

2.3節で設定した問題に対し、本研究ではエネルギーライフログデータとオープンデータを統合した ELLDB を用いて負荷平準化のための情報提示を行う。

3.1 ELLDB の設計

我々は先行研究として、電化製品1台ごとの消費エネルギーとユーザの状況を結びつけて保存した SEE-ConDB [17] と、自動車の走行ログからその自動車を電気自動車 (EV) に置き換えたときの消費エネルギーを計算できる ECOLOGDB [18] という異なる種類のエネルギーライフログを扱う DB を構築してきた。そして、その2つのエネルギーライフログデータと再生可能エネルギーの発電ログや気象データなどのオープンデータを組み合わせたエネルギーライフログ DB (ELLDB) を構築した [6]。ELLDB に対する集約演算などから計算でき、シミュレーションの評価に用いる変数を表1に示す。

3.2 負荷平準化の評価基準の導出

本節では、2.3節で述べた負荷平準化を評価するための指標を ELLDB から求める方法を示す。

時間スロット $t_{(k)}$ にナノセル内の電化製品が消費した電力量の合計 $e_{(k)}$ は、

$$e_{(k)} = \sum_{a_{(m)} \in A} P_{(m,k)} \quad (1)$$

で表すことができる。

一方で、ナノセルが系統から受け取った電力量 $o_{(k)}$ は、総消費電力が発電電力より大きいときは総消費電力を発電電力で相殺した

$$o_{(k)} = e_{(k)} + g_{(k)} \quad (2)$$

であり、総消費電力より発電電力が大きいときは電力系統から電力を受け取らないため

$$o_{(k)} = 0 \quad (3)$$

である。

表 1 シミュレーションに用いる変数の説明

テーブルと要素	説明
$\mathbf{a}_{(m)} \in \mathbf{A}$	個々の電化製品を表す
$\mathbf{p}_{(m,k)}$	時間スロット $t_{(k)}$ に電化製品 $\mathbf{a}_{(m)}$ が消費した電力量
$e_{(k)}$	時間スロット $t_{(k)}$ にナノセル内の電化製品が消費した電力量の合計値 ($e_{(k)} > 0$)
$g_{(k)}$	時間スロット $t_{(k)}$ にナノセルが設置した再生可能エネルギーが発電した電力量を負にとったもの ($g_{(k)} < 0$)
$o_{(k)}$	時間スロット $t_{(k)}$ にナノセルが系統から受け取った電力量の実際値
$o_{leveling}$	バッテリーを用いて充電を行う際にナノセルが系統から受け取る電力量
$\sigma_{(k_{(0)},k_{(1)})}$	時間スロット $t_{(k_{(0)})}$ から時間スロット $t_{(k_{(1)})}$ までの $o_{(k)}$ の標準偏差
$peak_{(k_{(0)},k_{(1)})}$	時間スロット $t_{(k_{(0)})}$ から時間スロット $t_{(k_{(1)})}$ までの $o_{(k)}$ のピーク電力量
$sum_{(k_{(0)},k_{(1)})}$	時間スロット $t_{(k_{(0)})}$ から時間スロット $t_{(k_{(1)})}$ までの $o_{(k)}$ の合計値
P_q	電化製品 $a_{(mq)}$ の消費電力の期待値
$loss_{(k)}$	時間スロット $t_{(k)}$ のエネルギーのロス
$loss_{(k_{(0)},k_{(1)})}$	時間スロット $t_{(k_{(0)})}$ から時間スロット $t_{(k_{(1)})}$ までのエネルギーのロスの合計
$surplus_{(k)}$	時間スロット $t_{(k)}$ に発電した再生可能エネルギーの余剰
$charge_{(k)}$	時間スロット $t_{(k)}$ にバッテリーに充電する量
$loss_{(k)}^{charge}$	時間スロット $t_{(k)}$ に充電によって生じるエネルギーのロス
η_{charge}	バッテリーに充電する際のエネルギー変換効率
$discharge_{(k)}$	時間スロット $t_{(k)}$ にバッテリーから給電をする量
$loss_{(k)}^{discharge}$	時間スロット $t_{(k)}$ の給電によって生じるエネルギーのロス
$\eta_{discharge}$	バッテリーから給電する際のエネルギー変換効率

よって、時間スロット $t_{(k_{(0)})}$ から時間スロット $t_{(k_{(1)})}$ までの系統電力の標準偏差 $\sigma_{(k_{(0)},k_{(1)})}$ は、 $o_{(k)}$ の平均値 \bar{o} を用いて

$$\sigma_{(k_{(0)},k_{(1)})} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=k_0}^{k_1} (o_{(k)} - \bar{o})^2} \quad (4)$$

として表すことができる。

また、時間スロット $t_{(k_{(0)})}$ から時間スロット $t_{(k_{(1)})}$ までの系統電力のピーク値 $peak_{(k_{(0)},k_{(1)})}$ は、

$$peak_{(k_{(0)},k_{(1)})} = \max(k_{(0)}, k_{(1)}) \quad (5)$$

として表すことができる。ただし、 $\max(k_{(0)}, k_{(1)})$ は時間スロット $t_{(k_{(0)})}$ から時間スロット $t_{(k_{(1)})}$ までの系統電力の最大値とする。

時間スロット $t_{(k_{(0)})}$ から時間スロット $t_{(k_{(1)})}$ までのエネルギーのロスの合計 $loss_{(k_{(0)},k_{(1)})}$ は、バッテリーを使用して負荷平準化を行うときとバッテリーを用いないときで異なる。バッテリーを使用するときのエネルギーのロスは、3.3で示すため、ここではバッテリーを使用しないときのエネルギーのロスを導出する。本稿で想定するマイクログリッドは再生可能エネルギーを地産地消することを考えるため、再生可能エネルギーの余剰電力の売電などは考えず、ナノセル内で消費しきれなかった再生可能エネルギーは損失とみなす。よってバッテリーを使用しないとき、時間スロット $t_{(k)}$ におけるエネルギーのロスは、ナノセル内で消費しきれなかった再生可能エネルギーの発電量のため、

$$loss_{(k)} = \begin{cases} |e_{(k)} + g_{(k)}| & (e_{(k)} + g_{(k)} < 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (6)$$

として表すことができる。これを使って、時間スロット $t_{(k_{(0)})}$ から時間スロット $t_{(k_{(1)})}$ までのエネルギーのロスの合計

$loss_{(k_{(0)},k_{(1)})}$ は、

$$loss_{(k_{(0)},k_{(1)})} = \sum_{k=k_0}^{k_1} (loss_{(k)}) \quad (7)$$

と表すことができる。

3.3 充電による負荷平準化のシミュレーション

本節では、ELLDB を用いて過去のある日についてバッテリーを用いて電力を完全に負荷平準化したときのシミュレーションを行う。系統電力を一定にするように充電電を行うときに必要なバッテリーの条件については別の文献[19]で述べているため、本稿ではバッテリーの容量はナノセルを負荷平準化するために充分であると仮定したうえで、系統電力を一定に保つように充電電を行うときのエネルギーの損失に注目してシミュレーションを行う。

本稿では系統電力がある期間を通して一定の $o_{leveling}$ になるようにバッテリーへの充電電を行うようなシミュレーションを行う。ここでは、ナノセルが系統から供給される電力が一定になるようにバッテリーで充電電を行った際の、 k 番目の時間スロット $t_{(k)}$ における充電電によるエネルギー損失を求める。

消費電力から発電電力を引いた $e_{(k)} - g_{(k)}$ が $o_{leveling}$ より小さい時、ナノセルは系統からの供給電力が $o_{leveling}$ になるように系統の電力供給元から電力を供給されたうえで、その電力と余剰電力をバッテリーに充電する。このとき、充電による損失は、充電量 $charge_{(k)}$ に損失係数をかけて

$$loss_{(k)}^{charge} = (1 - \eta_{charge}) \cdot charge_{(k)} \quad (8)$$

として計算できる。

消費電力から発電電力を引いた $e_{(k)} - g_{(k)}$ が $o_{leveling}$ より大きい時、系統から受け取る電力が $o_{leveling}$ になるようにオフィスへの給電を行う。このとき、給電による損失は、給電量

$discharge_{(k)}$ に損失係数をかけて

$$\text{loss}_{(k)}^{discharge} = (1 - \eta_{discharge}) \cdot discharge_{(k)} \quad (9)$$

として計算できる。

時間スロット $t_{(k_0)}$ から時間スロット $t_{(k_1)}$ までのエネルギーのロスの合計は、これらを足し合わせて、

$$\text{loss}_{(k_0), (k_1)} = \sum_{k=k_0}^{k_1} (\text{loss}_{(k)}^{discharge} + \text{loss}_{(k)}^{charge}) \quad (10)$$

として計算できる。

3.4 電化製品省電力化のシミュレーション

本節では、ELLDB を用いて過去のある期間オフィス内の電化製品をより省エネルギーなものに置き換えていたと仮定した時の消費電力をシミュレーションする。ELLDB では各電化製品の消費電力ログを記録しているため、各電化製品の消費電力の期待値 (平均値) を計算することができる。本節では、電化製品の消費電力の期待値を用いて電化製品を置き換えた時の消費電力のシミュレーションを行う。

ここで、ある電化製品 $a_{(m_0)}$ を、その電化製品と同じ目的で使われるがより省エネルギーな電化製品 $a_{(m_1)}$ に置き換えることを考える。置き換え前の電化製品の稼働時の消費電力の期待値 (平均値) を p_0 、置き換え先のより省エネルギーな電化製品の消費電力の期待値 (平均値) を p_1 とする。タイムスロット $t_{(k)}$ の電化製品 $a_{(m_0)}$ の消費電力が $p_{(m_0, k)}$ だったとき、その電化製品を $a_{(m_1)}$ に置き換えた時の時間スロット $t_{(k)}$ の消費電力 $p_{(m_0, m_1, k)}$ は、

$$p_{(m_0, m_1, k)} = p_{(m_0, k)} \cdot \frac{p_1}{p_0} \quad (11)$$

とした。

この方法で電化製品を置き換えたときの消費電力をシミュレーションする利点としては、消費電力の期待値 (平均値) さえわかれば電化製品の置き換え効果を算出できるため、電力ログが存在しない電化製品についてもその電化製品に置き換えた時の消費電力をシミュレーションできる点が挙げられる。

3.5 メンバーの作業時間変更のシミュレーション

本節では、ELLDB を用いて過去のある日についてメンバが本来とは異なる時間帯に作業を行っていた時のナノセルの消費電力のシミュレーションを行う。本研究では、オフィスでユーザが行う仕事の種類は大きく複数のメンバが同じ時間・同じ場所に集まらないと行えない仕事 (ミーティング) と、メンバそれぞれが独立して実行できる仕事 (デスクでの事務作業) の 2 つに分けられると考え、メンバがどちらの種類の仕事をしているのかを蓄積できるように ELLDB を設計した。そして、メンバが独立して行える仕事をする時間帯を変えたときのナノセルの消費電力を ELLDB からシミュレーションする。

あるメンバが時間スロット $t_{(k_0)}$ に行っていた作業を時間スロット $t_{(k_1)}$ に行っていた作業と入れ替えたとなると、時間スロット $t_{(k_0)}$ の総消費電力 $e'_{(k_0)}$ は、もとの総消費電力量から

メンバが本来使っていた電化製品の消費電力量を引いたうえで入れ替え先の時間に使っていた電化製品の消費電力量を足した

$$e'_{(k_0)} = e_{(k_0)} - P_{(m, k_0)} + P_{(m, k_1)} \quad (12)$$

となる。

時間スロット $t_{(k_1)}$ の総消費電力量 $e'_{(k_1)}$ も同じくもとの総消費電力量からメンバが本来使っていた電化製品の消費電力量を引いたうえで入れ替え先の時間に使っていた電化製品の消費電力量を足した

$$e'_{(k_1)} = e_{(k_1)} - P_{(m, k_1)} + P_{(m, k_0)} \quad (13)$$

となる。

4. 実装環境

4.1 実装環境の概要

3章で提案したシミュレーションによる負荷平準化効果を検証するために、実装環境をマイクログリッド内のナノセルだと想定して評価実験を行った。実装環境の概要を表 2 に示す。

表 2 実装環境の概要

実装環境	情報工学の研究室 1 部屋 (164m ²)
利用者数	10 名 (メンバ A~J と定める)
電化製品数	43 個
その他の特徴	各メンバが個人デスク (PC や付属機器) を使用 週 2 回全体ミーティングが行われる際には個人デスクを離れて一か所に集まる

4.2 電力ログ取得

消費電力ログ取得には富士通コンポーネント社のスマートタップ⁹を用いた。また、UPS に関しては、実装環境において常に ON で使用しており、常に消費電力が一定だと考えたため、スマートタップを用いずに事前に計測した消費電力を用いて消費電力ログを記録した。スマートタップを使って電力ログが取得出来ない空調・照明・換気扇に関してはタッチパネルによる手動入力によって ON/OFF を記録し、事前に計測した消費電力を用いて電力データを記録した。

4.3 状況ログ取得

メンバの状況ログ取得にはメンバが手動で状況を入力するための端末とプログラムを用意し、それを用いた。今回取得したメンバの状況は、メンバがオフィスに存在しない「不在」とそれぞれがバラバラに自身のデスクで活動する「作業」とオフィスのメンバがデスクを離れて一か所に集まって行う「ミーティング」の 3 つとした。

1: スマートコンセント&周辺機器: (<https://www.fujitsu.com/jp/group/fcl/products/smart-power-strip/smart-power-strip/>) (2020/01/20 アクセス)。

4.4 再生可能エネルギーの発電ログ取得

本実験では、ナノセルには再生可能エネルギーとして太陽光パネル (PV) が置かれていることを想定する。しかし、本稿では 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、JIS 規格による太陽光パネルの発電量推定 [20] を適用し、仮に PV を設置した時の発電量を用いることとした。このとき、設置する太陽光パネルのサイズは実装環境がある建物の屋根面積 2286m^2 と駐車場面積 1371m^2 の和の 1% とした。1% とした根拠としては、実装環境の消費電力が実装環境が存在する建物全体の消費電力の約 1% を占めていることをデータから確認したためである。なお、再生可能エネルギーの発電量の推定に利用する日射量のデータに関しては、横浜市の環境創造局が公開しているデータ¹ を利用した。

5. シミュレーションの評価

5.1 シミュレーション評価の概要

本章では、3 章で定義したバッテリーによる負荷平準化のためのシミュレーションを 4 節で実装した ELLDB のデータを用いて行い、それを評価する。今回、シミュレーションの評価実験は 3 つの指標がどのように変化するかを算出する有用性の検証のみを行い、シミュレーションの設定が実際に達成できるのかに関する正確性の検証は今後の課題とした。評価には 2019 年 4 月から 2020 年 1 月までの実装環境のコアタイムの日でかつログデータが正常に取得できている日のデータを用いた。

5.2 バッテリーによる充電電時のシミュレーションと評価

事前にある日のナノセルの消費電力と発電電力を予測できていることを仮定して、バッテリーによる充電電で外部から供給される電力を完全に一定にするようなシミュレーションを行った。また、一定にする系統電力 $O_{leveling}$ はナノセルの消費電力と発電電力が事前に分かっている仮定のもとで、充電電による損失が最も小さくなるような値を用いた。バッテリーはリチウムイオンバッテリーを想定した。その際、既存のリチウムイオン電池を扱うパワーコンバーターのカタログ値を参考にして、充電の際の効率は 0.9 とし、給電の際の効率は 0.85 とした²。本シミュレーションでは系統から供給された電力を常に一定にするような充電電を行うため、系統電力の標準偏差は 0 となり、ピーク電力と平均電力が一致するような電力推移となる。また、バッテリーの容量は考えず理想的に充電電を行う想定のため、余剰電力は発生しない。

本節のシミュレーションでは、事業所に再生可能エネルギーを導入しただけの場合に比べて再生可能エネルギーを導入したうえでバッテリーを用いて負荷平準化を行ったときに各指標がどう変化するかを散布図で評価する。各散布図におけるそれぞれの点は、X 座標にバッテリーを用いずに発電電力の地

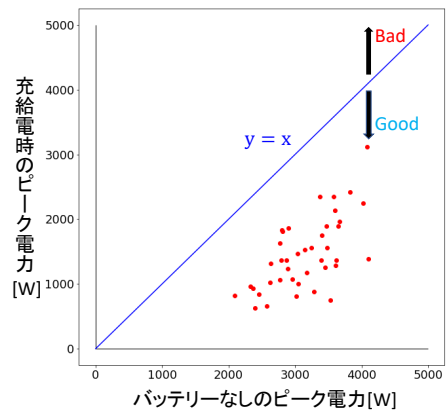


図 4 充電電によるピーク電力の変化

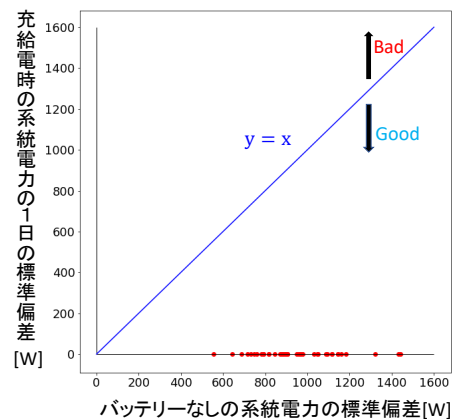


図 5 充電電による標準偏差の変化

産地消を行った際の各指標の値を、Y 座標にバッテリーを用いて負荷平準化を行った際の各指標の値をプロットしたものである。そのため、バッテリーを用いた充電電によって指標が小さくなったときは $y=x$ の直線よりも下に、逆に大きくなったときは $y=x$ の直線よりも上に各点はプロットされる。各指標は小さいほうが望ましいため、 $y=x$ の直線よりも下に点があればあるほど望ましい。

まず、系統電力のピーク値 (ピーク電力) の変化を図 4 に示した。各点の X 座標はある日のバッテリーなしで発電電力の地産地消を行った際のピーク電力を、Y 座標はある日のバッテリーを用いて充電電を行った際のピーク電力を表す。図 4 を見ると、全ての点が $y=x$ の直線よりも大きく下にある。そのため、充電電によってピーク電力は大幅に削減できることがわかる。

次に、系統電力の標準偏差の変化を図 5 に示した。各点の X 座標はある日のバッテリーなしで発電電力の地産地消を行った際の系統電力の標準偏差を、Y 座標はある日のバッテリーを用いて充電電を行った際の系統電力の標準偏差を表す。本シミュレーションでは標準偏差が 0 になるように充電電を行ったため、各点の Y 座標は常に 0 となる。これは、バッテリーを用いた充電電によって負荷の平準化が完全に達成されたことを表す。

次に、エネルギーの損失の変化を図 6 に示した。各点の X 座標はある日のバッテリーなしで発電電力の地産地消を行った際

2 : 横浜市環境創造局, 入手先 : <http://www.city.yokohama.lg.jp/kankyoku/> (2020/01/10 アクセス)。

3 : CarWatch, 入手先 : <http://car.watch.impress.co.jp/docs/news/536403.html> (2020/02/05 アクセス)。

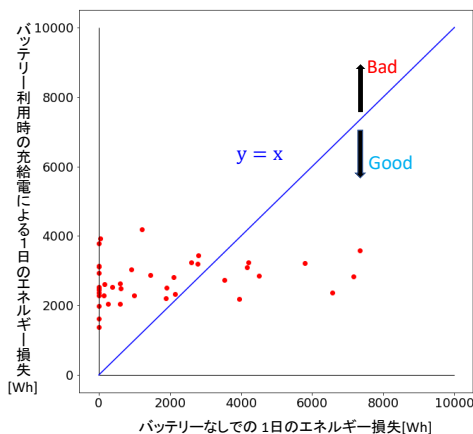


図 6 充電によるエネルギー損失の変化

のエネルギーの損失を、Y 座標はある日のバッテリーを用いたときのエネルギーの損失を表す。ここで、X 座標は余剰電力、Y 座標は充電によるエネルギー損失という異なる種類のエネルギー損失を表している。図 6 を見ると、X がそこまで大きくない領域（余剰電力がそこまで多くない日）では充電による損失が余剰電力を上回っていることが多い一方で、余剰電力が多く発生するような日では充電による負荷平準化がエネルギー損失の観点からも効果的であるということが確認できる。

以上のシミュレーション結果から、バッテリーを用いた充電電によって系統電力の標準偏差を 0 にするように充電を行うことで、完全な負荷平準化を達成しつつピーク電力も大幅に削減できることがわかった。一方で充電時によるエネルギー損失はバッテリーを導入しない際の余剰電力よりも大きくなってしまいう日も存在することが図 6 から分かる。そのため、次節以降では 3 章で示したバッテリー以外の負荷平準化手法を充電電による需要電力マネジメントと組み合わせることで、エネルギー損失をバッテリーのみを用いて負荷平準化を行う際よりも削減できることを示す。

5.3 メンバの作業時間を入れ替えたうえで充電を行った際のシミュレーション

本節のシミュレーションでは、ユーザが本来ならばコアタイム後の夕方や夜間に行っていた作業を早めに事業所に来てコアタイム前に行うことでどれだけエネルギー損失が削減できるのかを確認する。シミュレーションは、各日において作業を開始する時刻が遅かったメンバ 3 人が、コアタイム後の夕方～夜間に行っていた作業を最大 2 時間分、本来より早く出勤して行っていたという設定のもとで行った。

図 7 に作業時間を入れ替えによるエネルギー損失の変化を示した。図 7 の各点の X 座標はバッテリーによる充電のみで負荷平準化を行った場合のエネルギー損失であり、Y 座標は機器の省電力化とバッテリーによる充電を組み合わせることで負荷平準化を行った場合のエネルギー損失である。図 7 の各点を見るとほぼ全ての点が $y=x$ よりもわずかではあるが下側にあることから、発電量の多い午前中に作業を行うことで、メンバが消費する電力量自体は変えずに充電電のエネルギー損失を削減でき

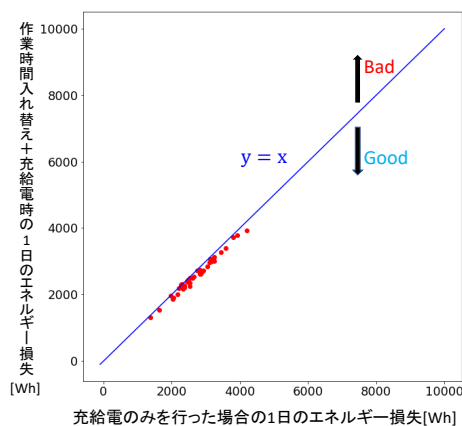


図 7 作業時間を入れ替えによる充電電時のエネルギー損失の変化

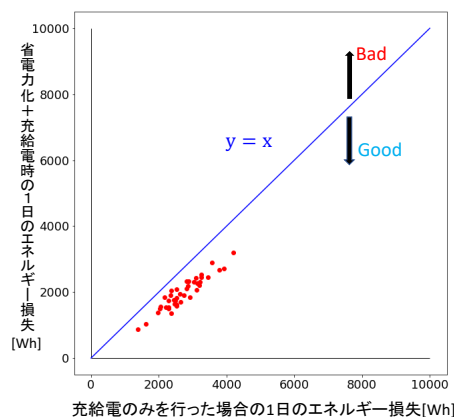


図 8 省電力化による充電電時のエネルギー損失の変化

ることがわかった。

エネルギー損失があまり削減できていない日も多い一方で、特にエネルギー損失を削減できている右上の点 (4194,3925) は、晴れていて昼間の発電量は多く、メンバの多くが夜間まで残業を行っている日であった。そのため、特に夜間の残業を避けてできるだけ発電量の多い午前中に PC を使う作業を行うことが負荷平準化を行う際の充電電ロスを削減するために重要であると考えられる。

本シミュレーションではメンバが実際に行っていた作業の内容については全く見ずに機械的に作業時間を入れ替えているなど、考慮できていない要素は多い。しかし、3 人のメンバが作業を行う時間を最大 2 時間ほど早めるだけで充電電によるエネルギー損失を削減できることは確認できた。

5.4 機器の省電力化をしたうえで充電を行った際のシミュレーション

本節では、電化製品を省電力化なものに置き換えたうえで充電電を行うことで、機器の省電力化をせずに充電電を行った際と比べてエネルギー損失にどのような変化があるのかを確認する。省電力化のシミュレーション設定としては、実装環境内の旧型の PC とモニタを 4 つ、新しく省電力なものに置き換え、実装環境に 44 本ある消費電力 32W の蛍光灯を 14W の新型 LED ライトに置き換えることを考える。

図 8 に、機器の省電力化によるエネルギー損失の変化を示した。図 8 の各点の X 座標はバッテリーによる充給電のみで負荷平準化を行った場合のエネルギー損失であり、Y 座標は機器の省電力化とバッテリーによる充給電を組み合わせると負荷平準化を行った場合のエネルギー損失である。図 8 において各点が $y=x$ の直線よりも下側にプロットされていることから、機器の省電力化によって充給電時のエネルギー損失を削減できることがわかる。

5.5 シミュレーション評価のまとめ

本章で行ったシミュレーションの結果から、以下のことが示された。

- バッテリーを用いて負荷平準化を達成するように充給電を行うことで 1 日のピーク電力も大きく削減できる。
- 負荷平準化を達成するように充給電を行うと消費電力が約 1kWh から 4.5kWh の間で推移するようなナノセル規模でも 1 日で最大 4kWh ほどのエネルギー損失が発生してしまう。
- 充給電によるエネルギー損失を減らすにはできるだけ発電量の多い午前に作業を行うことと夜間の消費電力を減らすことが重要である。
- 蛍光灯を LED に変更するなどの機器の省電力化はコストがかかるが、負荷平準化のための充給電によるエネルギー損失削減に貢献する。

6. まとめと今後の課題

本稿では、エネルギーに関するライフログを統合した ELLDB を用いて、その場所に再生可能エネルギーと蓄電池を導入して負荷平準化を行う際の負荷平準化効果と、蓄電池による負荷平準化のデメリットであるエネルギー損失を定量的に示した。また、バッテリー以外の需要側エネルギーマネジメントも組み合わせると充給電による負荷平準化を行うことで、バッテリーを用いた充給電のデメリットである充給電時のエネルギー損失を軽減できることを示した。

今後の課題としては、実際に負荷平準化を達成する実験を行うことや、気候や地域の特性を考慮して負荷平準化を考えることが挙げられる。

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] 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）”，<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019pdf/>（2020/01/06 アクセス）

[2] 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/>（2020/01/06 アクセス）

[3] 環境省，“環境省 再エネ加速化・最大化促進プログラム 2018 年版”，<http://www.env.go.jp/earth/program.pdf/>（2020/01/04 アクセス）

[4] 総務省，“令和元年版 情報通信白書”，<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/>（2020/01/02 アクセス）

[5] 経済産業省，“新産業構造ビジョン”，<https://www.meti.go.jp/press/2017/05/20170530007/20170530007-2.pdf>（2020/01/08 アクセス）

[6] 田中雄哉，茨木隆兵，本藤祐樹，富井尚志，“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”，第 10 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム（DEIM2018），C7-5，2018。

[7] 西山誠人，田中雄哉，北島大，本藤祐樹，富井尚志，“電力量分布可視化手法によるミクロなエネルギーライフログの状況別集約と有用性評価”，第 9 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム（DEIM2017），17-5，2017。

[8] 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。

[9] 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.

[10] Nicole D Sintov, P Wesley Schultz, “Unlocking the potential of smart grid technologies with behavioral science”, Front Psychol, 2015;6:410.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Evangelos L. Karfopoulos, Nikos Hatzigiargyriou, “Distributed Coordination of Electric Vehicles Providing V2G Services”, IEEE Transactions on Power Systems Volume 31, Issue 4, pp2834-2846, 2015

[15] Yuan Hong, Shengbin Wang, Ziyue Huang, “Efficient Energy Consumption Scheduling: Towards Effective Load Leveling”, energies.

[16] Lei Xu, Meishun Lin, Zhizhong Huang, “Community load leveling for energy configuration optimization: Methodology and a case study”, Sustainable Cities and Society, Volume35, pp.94-106, 2017.

[17] 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。

[18] 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.

[19] 渡辺隆史，深野巧也，小池風樹，石田卓也，飯田惇子，本藤祐樹，富井尚志，“エネルギーライフログ DB を活用した負荷平準化のための局所的エネルギーバランスに関するデータマネジメント”，第 11 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム（DEIM2020），I6-1，2020。

[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”。