

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

渡辺 隆史[†] 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

^{†††} 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: †{watanabe-takashi-rz,iida-junko-kg,ishige-taiki-nx}@ynu.jp, ††{hondo,tommy}@ynu.ac.jp

あらまし 本研究では、電力需要、再生可能エネルギー、および、電気自動車 (EV: Electric Vehicle) の充電に関するライフログを蓄積することにより、未来のスマートグリッド環境におけるエネルギーフローを定量化できるデータベースを構築する。提案するデータベースは、時間スケールに関する条件を指定したクエリを作成することにより、日ごとや年単位などの様々な時間スケールでマイクログリッドのエネルギーフローを評価することができる。本稿では、実際に収集したライフログを用いて、マイクログリッドの構成要素の有無によって分類した想定シナリオごとにインスタンスの異なるデータベースを作成した。それらのシナリオごとにマイクログリッドのエネルギーフローを集計し、その結果を比較することによって、EV をスマートグリッドのバッテリーとみなす VGI (Vehicle-Grid Integration) の実現可能性に関する定量評価ができることを示した。

キーワード 時空間データベース、実体-関連モデル、持続可能性、負荷平準化、太陽光発電

1 はじめに

センサ技術やストレージ技術の発達により、実世界の膨大かつ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、ヒトの生活に関する記録である「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。そこで、ライフログやオープンデータを十分に活用するために、適切なデータベーススキーマによりデータマネジメントを行うことが重要である [2] [3]。

一方で、持続可能なエネルギー利用のために、温室効果ガスの一つである 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 [4] [5]。この対策の一つとして、化石燃料由来の電力を削減するために、再生可能エネルギーの普及が推進されている。特に近年、太陽光発電設備が数多く導入され、世界規模で大きく普及が進んでいる。しかし、太陽光発電は気象や季節に依存しているため、その発電電力は不安定である (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。発電パターンは近隣で同期するため、発電余剰電力を電力系統に送電 (売電) することは難しく、出力抑制を行うことで再生可能エネルギーを十分に有効活用できない可能性がある。また、電力供給側に対する実質需要電力 (需要・発電電力差) に急激な変動を引き起こす「ダックカーブ現象」が生じることが懸念さ

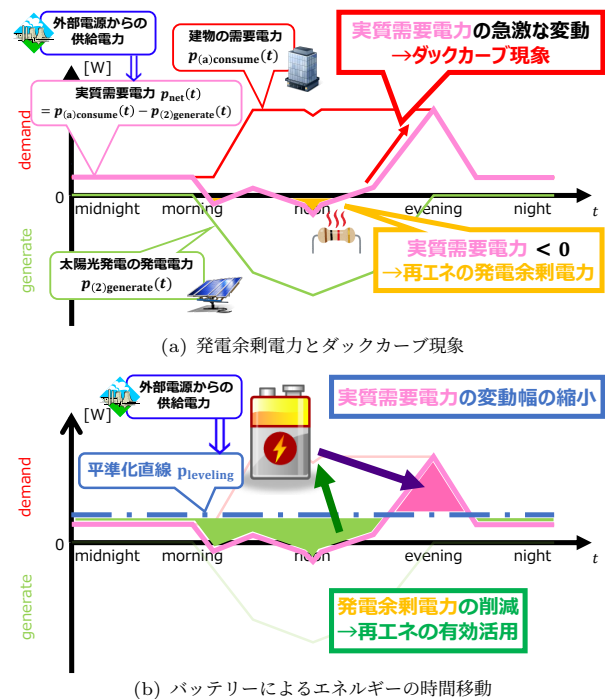


図 1 太陽光発電導入時の実質需要電力と負荷平準化

れる [6]。一般的に電力系統は電力需要が多い時に効率が高くなるように構築されるため、ダックカーブ現象が電力系統のエネルギー効率を低下させてしまう可能性がある。

発電余剰電力とダックカーブ現象が生じる要因は、再生可能エネルギーが電力需要に関係なく発電するために、電力需要と発電にズレが生じてしまうことである。したがって、バッテリーを電力のバッファとして用いて、電力需要と発電のズレを

解消することが有効であると考えられる。そこで、今後の普及が期待される電気自動車 (EV: Electric Vehicle) をスマートグリッドのバッテリーとみなす VGI (Vehicle-Grid Integration) が期待されている [7]。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電力系統に給電することにより、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 [8]。以上より、再生可能エネルギーと EV を活用する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、電力需要、再生可能エネルギー、および、EV の充電に関するライフログを蓄積することにより、未来のスマートグリッド環境におけるエネルギーフローを定量化できるデータベースを構築する。まず、未来の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 (3.1 節)。次に、マイクログリッドのエネルギーフロー (3.2 節) および想定するスマートグリッド環境 (3.3 節) に関するデータモデリングを行う。提案するデータベースは、時間スケールに関する条件を指定したクエリを作成することにより、日ごとや年単位などの様々な時間スケールでマイクログリッドのエネルギーフローを評価することができる。

先行研究では、オフィス 1 部屋と仮想の再生可能エネルギー発電設備およびバッテリープールから構成される電力網の最小単位 (ナノセル) においてバッテリー充電シミュレーションを行い、EV1 台程度のバッテリー容量でオフィス 1 部屋の負荷平準化ができることを示した [9]。また、ライフログを用いた遡及的シミュレーションの結果、EV のバッテリー損耗が許容できる程度で、再生可能エネルギーの発電余剰電力量と実質需要電力の変動幅を同時に減らせることを示した [10]。

本稿では、実際に収集したライフログによりマイクログリッドのエネルギーフローを集計し、マイクログリッドの構成要素の有無によって分類した想定シナリオ間で比較することにより、再生可能エネルギーと EV を活用する VGI の実現可能性に関する定量評価ができることを示す (4 章)。実験環境における評価例として、(1) 再生可能エネルギーの発電余剰電力量を減らしつつ、(2) 許容できる程度の充電時のエネルギー変換ロスや EV のバッテリー損耗で、(3) 電力供給側に対する負荷平準化を達成できることを示す (5 章)。

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 [11] 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 [12] 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。日本国内の研究に目を向けると、馬場ら [13] 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 [14] 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。また中川ら [15] 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 を利用したことによる CO₂ の削減効果をシミュレーションで確認した。これらの研究は、スマートグリッド技術の評価を主な目的としており、スマートグリッド環境を想定したデータ管理フレームワークやデータ分析例を提案する本研究とは立場が異なる。

また、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、電力の負荷平準化は重要な課題である。Hong ら [16] 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。Xu ら [17] は、異なるタイプの建物を組み合わせて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。Karfopoulos ら [18] 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ことをシミュレーションにより示した。これらの研究は、シミュレーションによる負荷平準化の計画・評価を主な目的としており、実データを用いて負荷平準化の実現可能性に関する評価を行う本研究とは立場が異なる。

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 [19] 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 [20] 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。Brush ら [21] 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。Ito ら [22] は、家庭内消費電力の予測に基づく EV の充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 [23] は、家庭のコストの最小化を目的とした EV の充電計画を提案し、実データによるシミュレーションを行った。Lam ら [24] 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。Huang ら [25] は、風力発電の発電電力を EV に充電するロバスタなスケジューリングアルゴリズムを提案し、実データによるシミュレーションを行った。これらの研究は、VGI の効果に関する評価や実現手法の提案を行っており、再生可能エネルギーと EV に関する総合的な評価をしていない。それに対し、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、ライフログに対してアドホックなクエリを作成することで、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 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

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)。1つのマイクログリッドは、図3に示される通り、次のように構成される。

1. マイクログリッド内には複数の電力需要設備がある。
2. 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ある。
3. マイクログリッドに自由にプラグ¹をすることができる複数のEVがある。
4. マイクログリッドに接続された据え置きバッテリーがある。
5. 3と4を合わせて一つの「バッテリープール」を構成する。
6. 1~5は全て一つの充電設備 (ES: Energy Station) に設置され、電力フローの制御が可能である。
7. マイクログリッド内での電力供給の不足分は外部電源から供給される。

EVはESに接続されると、そのマイクログリッドのバッテリーとして利用される。例えば、自宅と勤務先を毎日通勤するEVは、図4に示されるように自宅と勤務先それぞれのバッテリーとしてふるまう。このとき、バッテリープールの総容量およびエネルギー残量は、EVがプラグを開始 (プラグイン) / 終了 (プラグアウト) することにより、増加 / 減少したことになる。

ここで、次の条件を追加する。

(条件1) 2の再生可能エネルギーは全て地産地消する。

(条件2) 7の外部電源からの電力供給は可能な限り平準化する (図5: 負荷平準化)。

条件1は、一般に太陽光発電は近隣で同期するため、売電できない場合が考えられる。そのため、他所へは送電せずマイクログリッド内で使いきる。条件2は、分散型電力制御のアイデアに基づく [5]。各マイクログリッドが負荷平準化を達成目標と定めることにより、社会全体の負荷変動抑制につながることを考える。条件1, 2は、マイクログリッド内のバッテリーを有効に活用することによって実現される。

1: 充電設備のコネクタをEVの充電電口に差し込むこと。

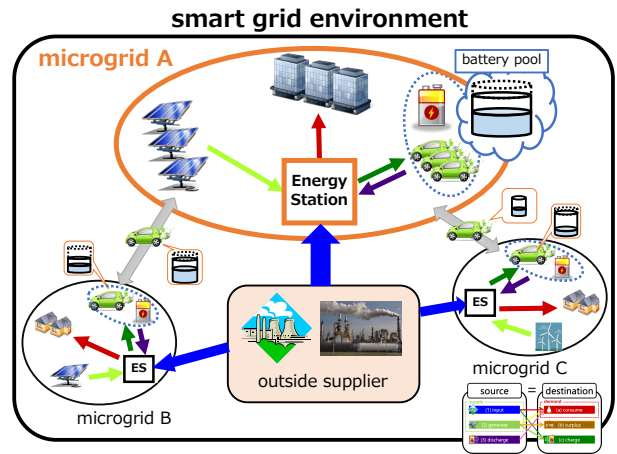


図2 想定するスマートグリッド環境

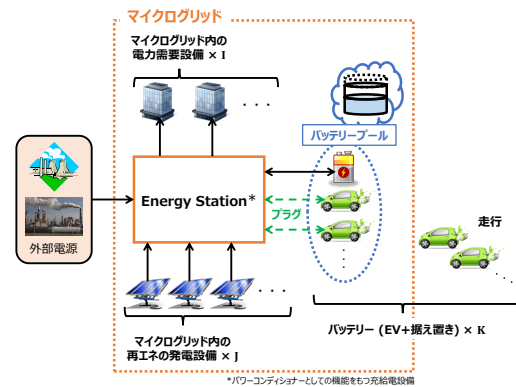


図3 マイクログリッドのシステム構成図 (矢印はエネルギーの流れ)

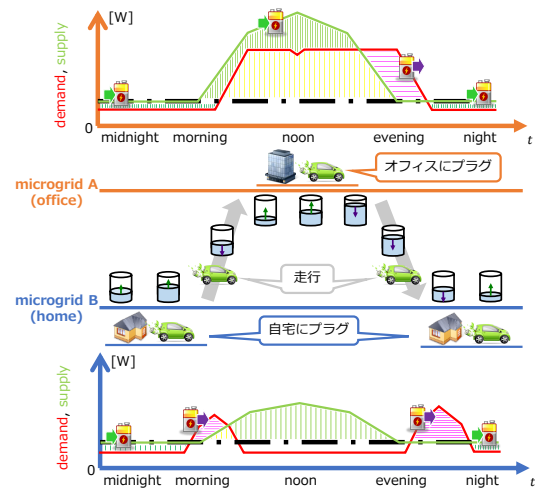


図4 一日のEVの動きとバッテリーのエネルギー残量の推移

3.2 マイクログリッドのエネルギーフローのモデル化

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6に示す。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) マイクログリッドの外部 (外部電源) から供給される電力 (外部電力: input)

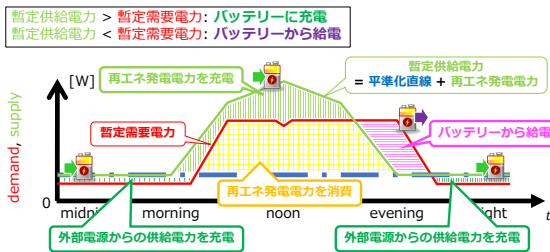


図 5 再生可能エネルギーと EV のバッテリーを活用する負荷平準化

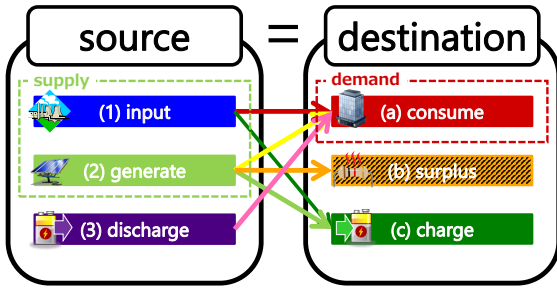


図 6 マイクログリッドのエネルギーフロー

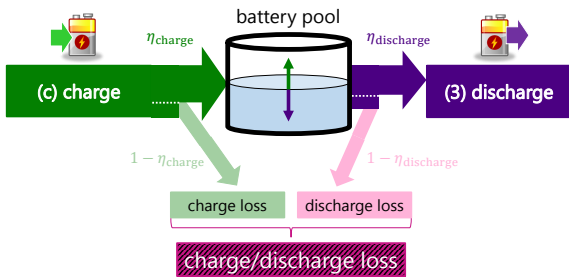


図 7 充電時のバッテリープールのエネルギーフロー

(2) 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 (内部電力: generate)

(3) バッテリープールから給電する電力 (給電電力: discharge)

電力の供給先の内訳 (destination)

(a) 電力需要設備が消費する電力 (消費電力: consume)

(b) 供給されたが消費しきれない電力 (余剰電力: surplus)

(c) バッテリープールに充電する電力 (充電電力: charge)

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 6 の矢印で示される 6 通りであると定義する。なお、「外部電力と内部電力の和」および消費電力をそれぞれ暫定供給電力 (supply) および暫定需要電力 (demand) と定義する。また、バッテリープールのエネルギー残量 (総蓄電電力量) は充電, 給電, EV のプラグイン / プラグアウトのみにより変動するものとし, バッテリープールの充電時にはエネルギー変換ロス (充電ロス) が生じるものとする (図 7)。

3.3 スマートグリッド環境を模したデータベーススキーマ

想定するスマートグリッド環境のインスタンス付き ER 図 (インスタンス図), リレーショナルデータベースのスキーマ図をそれぞれ図 8, 図 9 に示す。マイクログリッドの電力の供給元として, 「充電設備」 (energy station) 1 つに対して 1 つの「外部電源」 (outside supplier) および J 個の再生可能エネルギーの

「発電設備」 (generator) が接続され, それをリレーションシップ「station-supplier」および「station-generator」で表す。この時, 「外部電源からの電力供給」 (input) は「日時」 (datetime) と「充電設備」のリレーションシップ, 「発電」 (generate: 再生可能エネルギーに関するライフログ) は「日時」と「発電設備」のリレーションシップとする。また, 電力の供給先として, 「充電設備」1 つに対して I 個の「電力需要設備」 (board) が接続され, それをリレーションシップ「station-board」で表す。この時, 「電力消費」 (consume: 電力需要に関するライフログ) は「日時」と「電力需要設備」のリレーションシップとする。さらに, スマートグリッド環境に存在する K 個の「バッテリー」 (battery: EV および据え置きバッテリー) は, 「充電設備」とプラグをすることができ, 充電を行うことにより電力の供給先と供給元の両方の役割を担う。この時, 「プラグ」 (plug: EV の充電に関するライフログ) は「日時」, 「充電設備」, 「バッテリー」, 「プラグモード」 (plug mode: 待機中 (idle), 充電中 (charge), 給電中 (discharge)) のリレーションシップとする。例えば, 日時「2019-02-01 13:00:00」において「battery A」という EV のバッテリーが「station A」という充電設備とプラグをしており, なおかつ「充電中」であることが表現できる。また, バッテリーの充電率 (SOC: State Of Charge) などの「バッテリーの状態」 (battery state) は「日時」と「バッテリー」のリレーションシップとする。

4 VGI の定量評価

本稿では, ライフログを用いてマイクログリッドのエネルギーフローを集計し, マイクログリッドの構成要素の有無によって分類した下記の 5 つの想定シナリオ間で比較することにより, VGI の実現可能性に関する定量評価を行う (図 10)。負荷平準化を行うシナリオ (シナリオ (2)~(3')) では, 先行研究 [9] の方法に基づき, 1 日ごとに目標とする平準化直線と充電電量を決定する。

シナリオ (0): 'only_demand'

マイクログリッド内に電力需要設備のみがあり, 外部電源から供給される全ての電力を消費することを想定する (ベースライン)。

シナリオ (1): 'duck_curve'

シナリオ (0) に対して再生可能エネルギーの発電設備を導入し, 発電電力をその時間帯にできるだけ消費することを想定する。

シナリオ (2): 'leveling_ev'

シナリオ (1) に対して EV と充電設備を導入し, EV の充電により負荷平準化を行うことを想定する。

シナリオ (3): 'leveling_stationary'

シナリオ (2) に対して据え置きバッテリーを導入し, EV および据え置きバッテリーの充電により負荷平準化を行うことを想定する。

シナリオ (3'): 'leveling_no_pv'

シナリオ (0) に対して EV, 据え置きバッテリーおよび充電設備を導入し, EV および据え置きバッテリーの充電により

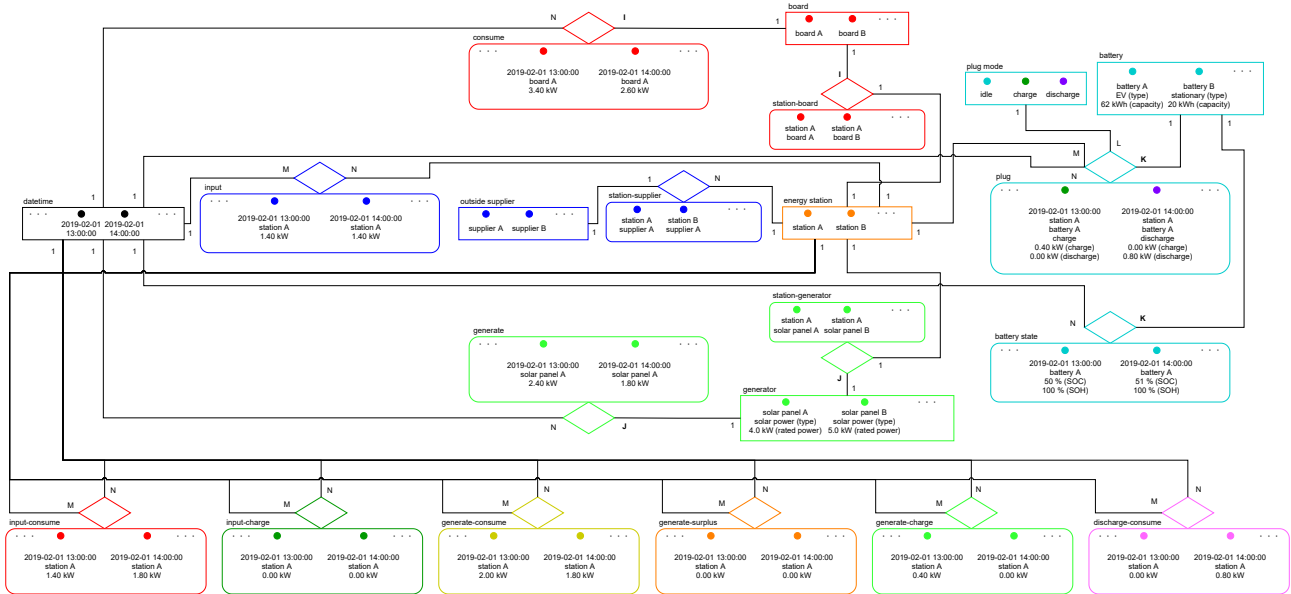


図 8 スマートグリッド環境のインスタンス図

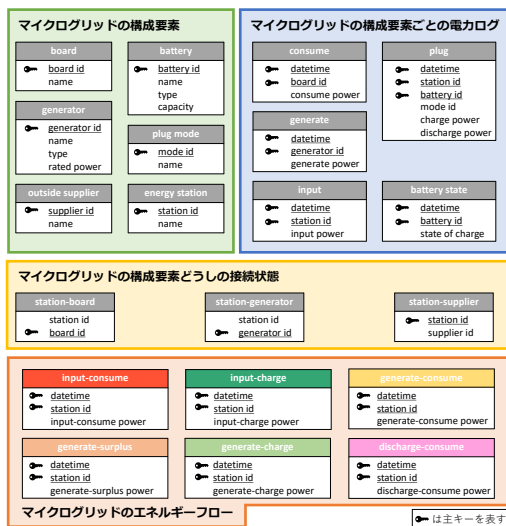


図 9 再生可能エネルギーと EV のデータを統合するログデータベースのスキーマ図

負荷平準化を行うことを想定する。シナリオ (3) と比較することにより、再生可能エネルギーの導入が外部電力量に与える影響を評価できる。

5 実験環境における評価例

5.1 実験環境と評価用データセット

データ取得のための実験環境の模式図を図 11 に示す。我々は、実験環境としてオフィス 1 部屋、自動車 1 台、充電設備 1 台から構成されるマイクログリッドの最小単位 (ナノセル) を構築した (図 11 の橙色破線内)。広さ 164m² の情報工学に関する研究活動を行うオフィスには機器ごとの消費電力を計測できるスマートタップを設置している。また、自動車 1 台にはスマートフォンを設置しており、GPS の移動ログを取得してい

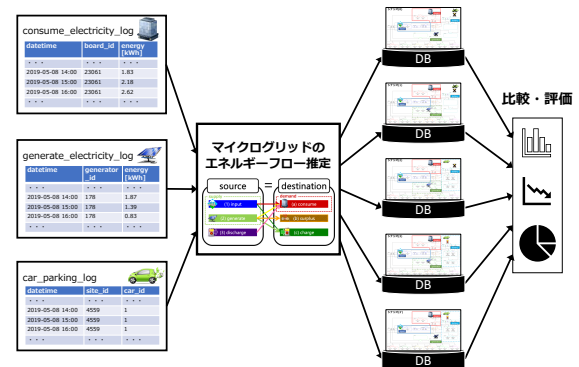


図 10 データベースを用いた VGI の定量評価

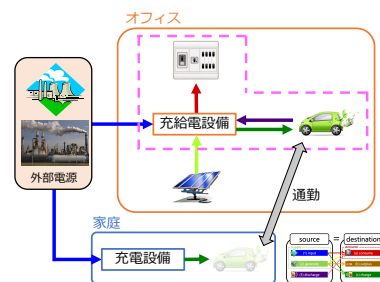


図 11 データ取得のための実験環境の模式図

る。本稿では、オフィス停車中は充電設備にプラグすると仮定し、EV の充電設備へのプラグの有無 (plug) を自動車の GPS の移動ログから簡易的に判断する。その上で、建物の屋上や駐車場に太陽光パネルが置かれることを想定し、日射量のオープンデータ²を用いて発電電力 (generate) を推定する。

本稿では、以下のデータを用いて、マイクログリッドのエネルギーフローを集計する。ただし、サンプリング間隔を 1 時間

2: 横浜市 環境創造局 環境監視センター 常時監視測定結果 (SUN 日報) (https://cgi.city.yokohama.lg.jp/kankyousaigai/data/it_00_25_00.html)

とする。

- 電力需要設備 1 台分の消費電力ログ

スマートタップにより取得した機器ごとの消費電力ログを 1 時間ごとに足し合わせたもの。

- 太陽光発電の発電設備 1 台分の発電電力ログ

「JIS C8907:2005」³ で定められた推定方法に基づき、日射量のデータから推定したもの。

- 自動車 1 台の駐車ログ

自動車の移動ログから求められるオフィス到着時刻・出発時刻から判断したもの。

- EV1 台分のバッテリー容量 $capacity_1$

定数値。本論文では、 $capacity_1 = 62 \text{ kWh}$ とする⁴。

- バッテリー充電効率 η_{charge}

定数値。本論文では、 $\eta_{\text{charge}} = 0.9$ とする⁵。

- バッテリー給電効率 $\eta_{\text{discharge}}$

定数値。本論文では、 $\eta_{\text{discharge}} = 0.85$ とする。

5.2 一日の電力推移

本節では、2019-05-08 の一日におけるシナリオごとのエネルギーフローの集計結果について述べる。

シナリオごとの一日の電力推移（上図の積み上げ棒グラフ）と総蓄電電力量および累積充給電ロスの推移（下図の面グラフ：シナリオ (3) のみ）を図 12 に示す。

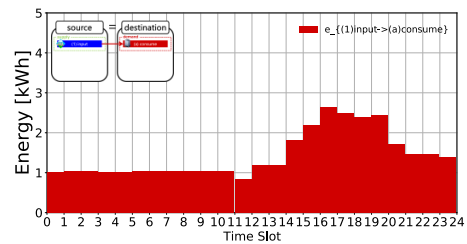
図 12(a)~12(b) および図 12(c) の上図において、赤色の実線および黄緑色の実線がそれぞれ暫定需要電力量および暫定供給電力量である。なお、タイムスロットごとの外部電力量（赤および緑色の積み上げ棒グラフの包絡線）が平準化直線（黒色の破線）と一致しているときに、負荷平準化されていることを示している。図中の各色の棒グラフは以下の意味をもつ。

- 赤色の棒グラフ: 消費した外部電力量
- 緑色の棒グラフ: バッテリープールに充電した外部電力量
- 黄色の棒グラフ: 消費した内部電力量
- 橙色の棒グラフ: 余ってしまった内部電力量
- 黄緑色の棒グラフ: バッテリープールに充電した内部電力量
- 桃色の棒グラフ: 消費した給電電力量

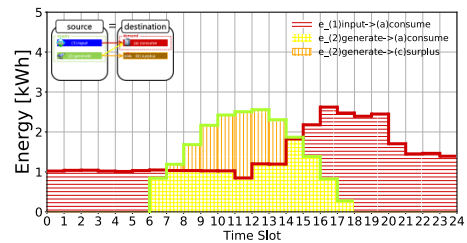
図 12(c) の下図において、水色の面グラフがバッテリープールの総蓄電電力量の推移を示しており、その包絡線の色が上図の棒グラフの色（充電中なら緑色、給電中なら桃色）に対応している。なお、充給電はバッテリープールの総バッテリー容量（黒色の実線）の範囲内で行われている。薄緑色と薄桃色の面グラフは、充電ロスと給電ロスをそれぞれ示している。

図 12 より、この一日の電力推移について、次の 4 つのことが分かる。

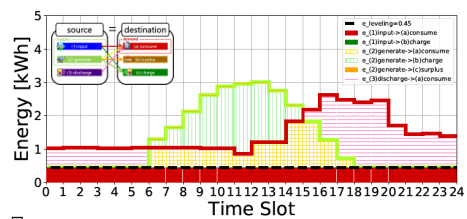
- 図 12(b) より、再生可能エネルギーだけを導入すると、



(a) シナリオ (0)



(b) シナリオ (1)



(c) シナリオ (3)

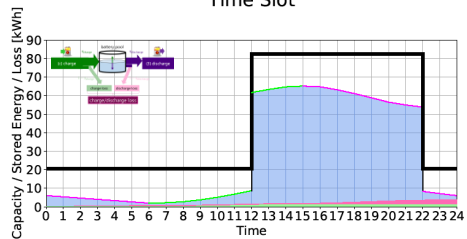


図 12 シナリオごとの一日の電力推移（上図）と総蓄電電力量および累積充給電ロスの推移（下図）

7~13 時台において発電余剰電力が生じる。また、実質需要電力の変動が大きくなるためにダックカーブ現象が生じてしまう。

● 図 12(c) より、EV に加えて 20.4 kWh の据え置きバッテリーを設置すると、充給電ロスが 2.8 kWh だけ生じるが、一日を通して負荷平準化が達成される。

● シナリオ (2) において、EV1 台のバッテリーだけでは 0~11 時台の充給電が行われず。

● シナリオ (3') において、再生可能エネルギーを導入せずに負荷平準化を行うと、平準化直線の高さが高くなるために、一日総外部電力量がシナリオ (3) に比べて 17.1 kWh だけ高い。

以上より、シナリオごとにナノセルのエネルギーフローが大きく異なることが分かった。

5.3 年間評価

本節では、5.2 節のエネルギーフロー集計を 2019-01-01 から 2019-12-31 のうちデータ欠損日を除いた 332 日間に対して連続して行った結果について述べる。

3: 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”

4: 日産自動車リーフ e+ を想定。

5: <https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/536403.html>

まず、シナリオごとのエネルギーフローの年間収支を図 13 に示す。横軸が想定シナリオ、縦軸が電力量 [kWh] を表しており、シナリオごとに電力の供給元 (source: 左側の積み上げ棒グラフ) と供給先 (destination: 右側の積み上げ棒グラフ) を並べた。この時、マイクロ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。

- 青色の棒グラフ: 総外部電力量の年間積算値
- 黄緑色の棒グラフ: 総内部電力量の年間積算値
- 紫色の棒グラフ: 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。

- 赤色の棒グラフ: 総消費電力量の年間積算値
- 橙色の棒グラフ: 総余剰電力量の年間積算値
- 緑色の棒グラフ: 総充電量 (総充電電力量と充電ロスの差) の年間積算値
- 赤紫色の棒グラフ: 充給電ロスの年間積算値

図 13 より、次の 5 つのことが示された。

- 本手法の仕様により、全シナリオにおいて総消費電力量は同じ値 (10578 kWh) を示す (灰色の実線)。これは、ナノセルで活動する人の電力消費行動を変えないことを意味する。

- 再生可能エネルギーを導入すると (シナリオ (0) → (1))、総外部電力量が 2437 kWh だけ減少し (灰色の破線)、余剰電力が 931 kWh だけ生じる (桃色の実線)。これは、外部電源が火力発電である場合、再生可能エネルギーの導入により総外部電力量が減少することにより、外部電源から排出される CO₂ 排出量が抑えられる可能性があることを意味する。

- EV だけで負荷平準化を行うと (シナリオ (1) → (2))、総充電量 (546 kWh)、総給電量 (1333 kWh) および充給電ロス (260 kWh) が生じ、総余剰電力量が 908 kWh だけ増加する (桃色の実線)。

- 据え置きバッテリーを導入して負荷平準化を行うと (シナリオ (2) → (3))、総充電量 (1669 kWh)、総給電量 (2224 kWh) および充給電ロス (519 kWh) が増加したが、総外部電力量が 1875 kWh だけ減少し (灰色の破線: シナリオ (0) に対しては 3931 kWh 減少)、総余剰電力量が 0 kWh になる (桃色の実線)。これは、EV のバッテリーと据え置きバッテリーを組み合わせた結果、再生可能エネルギーを有効活用することができたことを意味する。なお、シナリオ (3) で生じた充給電ロスはシナリオ (1) の総余剰電力量とほぼ同量であることから、元々活用できていなかった余剰電力を負荷平準化のために活用できたと言える。

- 再生可能エネルギーなしで負荷平準化を行うと (シナリオ (3) → (3'))、総充電量 (1120 kWh)、総給電量 (894 kWh) および充給電ロス (258 kWh) が減少するが、総外部電力量が 2884 kWh だけ増加 (灰色の破線: シナリオ (0) に対しては 1047 kWh 減少) する。これは、ナノセルを流れるエネルギーの総量がシナリオ (3) に対して減少したことにより、充電電の

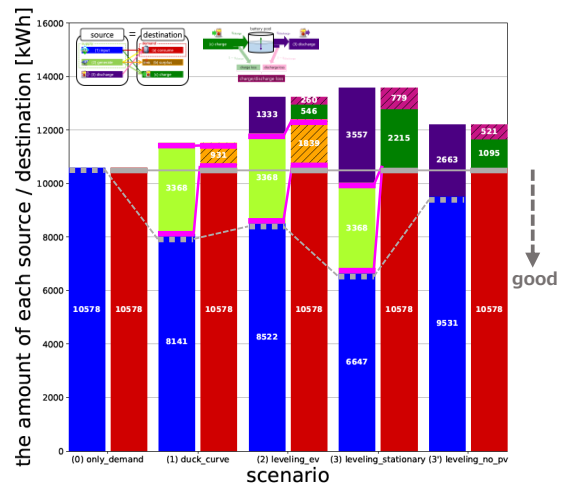


図 13 シナリオごとのエネルギーフローの年間収支

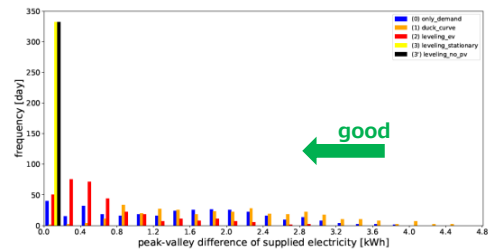


図 14 シナリオごとの 1 日の外部電力の変動幅

総量が減少したが、一方で総外部電力量の減少量が小さくなったことを意味する。

なお、先行研究 [10] より、バッテリー損耗が充給電量に比例するという仮説から、シナリオ (2) ≡ (3) > (3') の順に EV のバッテリー損耗が大きくなると考えられる。

次に、図 14 はシナリオごとの一日の外部電力の変動幅の年間頻度分布である。図中の各色の棒グラフは以下の意味をもつ。

- 青色の棒グラフ: シナリオ (0) における分布
- 橙色の棒グラフ: シナリオ (1) における分布
- 赤色の棒グラフ: シナリオ (2) における分布
- 黄色の棒グラフ: シナリオ (3) における分布
- 黒色の棒グラフ: シナリオ (3') における分布

図 14 より、次の 3 つのことが示された。

- 再生可能エネルギーを導入すると (シナリオ (0) → (1))、実質需要電力の変動が大きくなるために外部電力量の変動幅が大きくなる傾向がある。

- EV だけで負荷平準化を行うと (シナリオ (1) → (2))、外部電力量の変動幅が小さくなる傾向がある。

- 据え置きバッテリーを導入して負荷平準化を行うと (シナリオ (2) → (3) および (3'))、全ての日の外部電力量の変動幅が 0 kWh になる。これは、一日を通して負荷平準化が達成される理想的な状況を想定したためである。

以上より、実験環境のエネルギーフローを集計した結果、EV1

台と据え置きバッテリーを活用するシナリオ (3) において、充給電ロスが生じるものの、再生可能エネルギーの有効活用と電力供給側に対する負荷平準化を同時に達成できることを示した。

以上のように、実際に収集したライフログよりマイクログリッドのエネルギーフローを集計し、想定シナリオ間で比較することで、再生可能エネルギーと EV を活用する 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。

6 まとめと今後の課題

本稿では、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た。また、実際に収集したライフログを用いてマイクログリッドのエネルギーフローを集計し、想定シナリオ間で比較することにより、再生可能エネルギーと EV を活用する 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。

今後の課題として、より大規模なマイクログリッドにおける評価例を示すことや VGI の実証実験によるデータも提案手法で分析できることを示すことが挙げられる。これらにより、提案手法による定量評価が、スマートグリッドの技術開発や社会制度設計を進める上で有効であることを示していく。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (課題番号 18K11750)、および、横浜国立大学大学院環境情報研究院共同研究推進プログラム、ならびに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] 増永良文. リレーショナルデータベース入門: データモデル・SQL・管理システム・NoSQL. サイエンス社, 第 3 版, 2017.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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 12 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, pp. 1–8, 2020.
- [10] 飯田惇子, 渡辺隆史, 富井尚志. 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の実現可能性に関する適応的データ分析. 第 18 回 ITS シンポジウム 2020, I-A-07, pp. 1–6, 2020.
 - [11] Nicole D Sintov and P Schultz. Unlocking the potential of smart grid technologies with behavioral science. *Frontiers in psychology*, Vol. 6, p. 410, 2015.
 - [12] Will Simm, Maria Angela Ferrario, Adrian Friday, et al. Tired 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.
 - [13] 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.
 - [14] 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.
 - [15] 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.
 - [16] Yuan Hong, Shengbin Wang, and Ziyue Huang. Efficient energy consumption scheduling: Towards effective load leveling. *Energies*, Vol. 10, No. 1, p. 105, 2017.
 - [17] Lei Xu, Yiqun Pan, Meishun Lin, et al. Community load leveling for energy configuration optimization: Methodology and a case study. *Sustainable cities and society*, Vol. 35, pp. 94–106, 2017.
 - [18] Evangelos L Karfopoulos and Nikos D Hatziaargyriou. Distributed coordination of electric vehicles providing V2G services. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, No. 1, pp. 329–338, 2015.
 - [19] 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.
 - [20] 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.
 - [21] AJ Bernheim Brush, John Krumm, Sidhant Gupta, et al. EVHomeShifter: evaluating intelligent techniques for using electrical vehicle batteries to shift when homes draw energy from the grid. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp. 1077–1088, 2015.
 - [22] 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.
 - [23] 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.
 - [24] Albert YS Lam, Ka-Cheong Leung, and Victor OK Li. An electric-vehicle-based supplementary power delivery system. In *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 307–312. IEEE, 2015.
 - [25] Qilong Huang, Qing-Shan Jia, and Xiaohong Guan. Robust scheduling of EV charging load with uncertain wind power integration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 2, pp. 1043–1054, 2016.