太陽光発電とEVを統合する負荷平準指向スマートグリッドDBを用いたVGIシミュレーション評価

石毛　大貴† 　廣居　　樹† 　片平　昇輝†† 　鈴木　博登†† 　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ケ谷区常盤台 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ケ谷区常盤台 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ケ谷区常盤台 79–7
E-mail: †{ishige-taiki-nx,hiroi-tatsuki-cf,katahira-shoki-gm,suzuki-hiroto-rs}@ynu.jp,
††{hondo,tommy}@ynu.ac.jp

あらまし　本論文では，太陽光発電と電気自動車（EV）を統合する新しいスマートグリッドのあり方をシミュレーション評価するためのデータベース設計とその応用について述べる．太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーは不安定である．そのため，需要電力を発電電力に一致させることが難しい．この問題に対し，大容量のバッテリーを搭載したEVが効果的に充給電を行うことにより電力の需要と供給のマッチングを図ることで，太陽光発電電力を有効活用することが期待される．それに加えて，実質需要電力の変動を抑えること（負荷平準化）も実現可能である．このように，EVの充電や給電を制御することで電力の需要と供給のマッチングを図ることをVGI (Vehicle Grid Integration) と呼ぶ．本研究では，独自に設計したデータベーススキーマに基づいて場所固有のデータ（ライフログ）を蓄積して，VGIにおけるエネルギーマッチングの実現性を定量的に評価する．特に本論文では，何種類かの実データと妥当な仮想データを組合わせて，年間レベルでの負荷平準化シミュレーション評価を行った．その結果として，いくつかの例外日を除く1年間のほとんどの日について実質需要電力の変動を抑えることができることが確認された．また，VGIのバッテリーとして用いられるEVの走行電力由来の多くが太陽光発電によってもたらされること，などが確認された．

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，実世界の膨大で多様なデータの取得・蓄積が可能になった [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，適切なデータ管理が重要である [2]．

一方で，地球温暖化対策として，温室効果ガスの一種であるCO_2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]．政府の「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」[5] によれば,「2050年カーボンニュートラルに向けて、電力部門の脱炭素化は、大前提である」とされ，さらに「再生可能エネルギーは、最大限導入する」としている．また,「グリーン成長戦略を支えるのは、強靱なデジタルインフラである」としている．加えて，東京電力グループの「長期的な安定供給とカーボンニュートラルの両立に向けた事業構造変革について」[6] によれば,「カーボンニュートラル社会を実現していくためには，相対的に安価な需要側の取り組み (電化・太陽光・蓄電池の設置等) が有効で」あるとする．これに関連して，日本において電気自動車（EV：Electric Vehicle）の普及が進められている．

電力部門の脱炭素化に関して，日本では再生可能エネルギーの中でも特に太陽光発電（PV：Photovoltaic power generation）が多く導入されており，導入量は2018年時点で世界第3位である [7]．しかし，PVの有効活用に伴う課題が存在する．まず，PVの発電量は季節や気象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」(curtailment) が生じることがある．さらに，PVを導入しても太陽が夕方に沈んでしまうため，夕方以降の需要のピークに対応できず，実質需要電力（需要と太陽光発電電力の差）のピークはPV導入前とかわらない．また，PV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に急激な変動が生じ（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 [8]．

EV に関しても問題が存在する．EV によるカーボンニュートラルは電源の脱炭素化が前提となっていて，EV の走行電力が再生可能エネルギー由来でないと意味がないことである．

これらの PV・EV の問題に対し，大容量のバッテリーを搭載した EV が効果的に充給電を行うことにより電力の需要と供給のマッチングを図ることで，太陽光発電電力を有効活用することが期待される．それに加えて，実質需要電力の変動を抑えること（負荷平準化）も実現可能である．このように，EV の充電や給電を制御することで電力の需要と供給のマッチングを図ることを VGI (Vehicle Grid Integration) と呼ぶ．しかし，VGI はデメリットも生じうる．本研究では，独自に設計したデータベーススキーマに基づいて場所固有のデータ（ライフログ）を蓄積して，VGI におけるエネルギーマッチングの実現性を定量的に評価する．

2 関 連 研 究

本研究における関連研究として主に以下の 5 つが挙げられる．

（1） スマートグリッドに関する研究 (電力供給側)

（2） スマートグリッドに関する研究 (電力需要側)

（3） VGI/V2G に関する研究

（4） バッテリー損耗に関する研究

（5） 負荷平準化に関する研究

スマートグリッドに関する研究は，大別して電力供給側の立場から設計する研究と電力需要側の立場から設計する研究が見られる．

2.1 スマートグリッドに関する研究 (電力供給側)

電力供給側の立場から，大規模な需要変動に対して周波数変動を抑制すること (ancillary services) を目的としてスマートグリッドを設計する研究が行われている．馬場ら [9] 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．Zhang ら [10] は，カリフォルニア州を対象として，供給側の立場から EV の大量導入に伴う電力系統負荷の増大という課題に対して，EV を管理充電することの利点を様々な評価軸から示した．小嶋ら [11] は，供給側の観点から，戸建て需要をまとめることでより効率的に電力融通ができることと，PV・EV・蓄電池を導入することでエネルギーコストが低減可能であることを示した．

2.2 スマートグリッドに関する研究 (電力需要側)

前節と異なり電力需要側の立場から，節電などにより電力需要を抑制することに主眼を置いてスマートグリッドを設計する研究が行われている．横浜市・豊田市・けいはんな・北九州市の 4 都市 [12] では，EMS や蓄電池，デマンドレスポンスを組み合わせたスマートシティプロジェクトの実例を挙げ，供給側への影響を評価した．Simm ら [13] 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．

また，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，多種多様な分野から学際的に行われている．Sintov ら [14] 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．

2.3 VGI/V2G に関する研究

EV は非走行時に電力を電力網/家に供給すること（V2G: Vehicle to Grid/V2H:Vehicle to Home）ができ，活用が期待される．これらの実験や効果検証に関する論文が近年多く見られる．V2G の導入効果の検討として Kempton ら [15] 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 [16] 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．中川ら [17] は，PV と EV，電力を消費する建物を構成要素とし PV 電力を自己消費するバーチャルグリッドを想定し，エネルギー消費を統合管理することの優位性を定量的に評価した．大澤ら [18] は，EV 単独で使用するよりも EV と V2H を組み合わせることで CO_2 排出量を多く削減できることと，EV と V2H を組み合わせれば PV が増えれば増えるほど CO_2 排出量を削減できることを示した．Ghosh ら [19] は，EV バッテリーを用いた V2G サービスの適切な価格設定方法を提案した．Tran ら [20] は，PV を組み合わせた V2H を行うための新しい技術を提案した．Turker ら [21] は，電力網/PV/EV を組み合わたスマートグリッドのための，PV の自己消費量を最大化し EV への充電を最適化するエネルギー管理方法として，線形計画法を用いた手法を提案した．Donadee ら [22] は，V2G 技術を発電/配電容量に制約のある場所に導入すると，EV バッテリーの放電エネルギーが 47%増加してしまうが，電力網の価値を 32%向上できることをシミュレーションから示した．

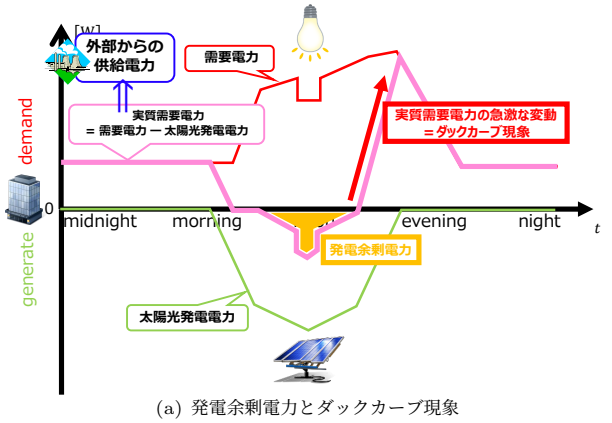
2.4 バッテリー損耗に関する研究

V2G や V2H では，EV のバッテリーの状態を考慮する必要がある．V2G を行う上での適切なバッテリーの状態管理や充給電計画を提案する研究が行われている．Ito ら [23] は，家庭内消費電力の予測に基づく EV の充放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 [24] は，家庭のコストの最小化を目的とした EV の充給電計画を提案し，実データによるシミュレーションを行った．Amamra ら [25] 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．Ginigeme ら [26] は，RTP（Real Time Pricing）に基づく充給電コストやバッテリーの損耗が最小になるように最適な V2G モデルと分散型制御アルゴリズムを提案した．

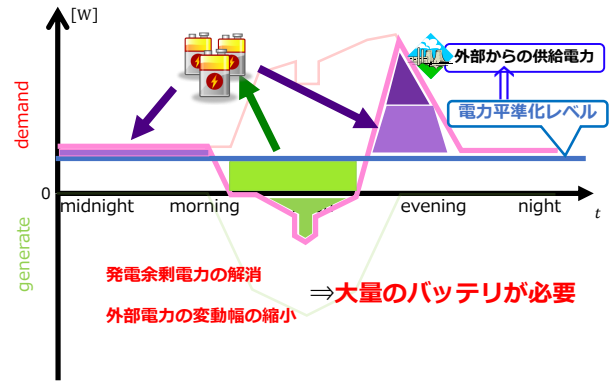
EV に用いられるリチウムイオンバッテリーは，充給電に伴

表 1　文字式の意味

定数	単位	値	文字式	意味
a	$1/Ah-K^2$	$8.61E^6$	Irate	放電速度
b	1/Ah-K	$-5.13E^3$	t	経過日数
c	1/Ah	$7.63E$	T	温度
d	1/K-(C-rate)	$-6.7E^3$	$Ah_{\mathrm{throughput}}$	総放電量
e	1/(C-Rate)	2.35		
f	$1/day^{1/2}$	14.876		
Ea	$kj \cdot mol^{-1}$	24.5		
R	$j \cdot mol^{-1}K^{-1}$	8.314		



(a) 発電余剰電力とダックカーブ現象



(b) バッテリーによるエネルギーの時間移動

図 1　PV 導入時の実質需要電力と負荷平準化

い損耗することが分かっている. スマートグリッドにおいて, 負荷平準化に EV バッテリーを用いることで, 走行のみに EV を利用する場合に比べ, 充給電量が増え, それに伴いバッテリーの損耗が加速すると考えられる. これは, 負荷平準化に参加する EV ユーザにとってのデメリットとなり得る. Wang ら [27] の研究により，バッテリー損耗はカレンダーロスとサイクルロスの合計からなり，式（1）で示されることが明らかになった.

$$Q_{\mathrm{loss}} = f \times t^{0.5} \times \exp(-Ea/RT) + (a \cdot T^2 + b \cdot T + c)\exp[(d \cdot T + e) \cdot Irate] \times Ah_{\mathrm{throughput}} \tag{1}$$

2.5　負荷平準化に関する研究

1 章に述べた通り，PV の有効活用には課題がある（図 1(a)）. 使いきれない余剰電力が生じること，実質需要電力のピークが変わらないこと，ダックカーブ現象が生じることである．PV の大量導入時の問題に対して，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抑えること，すなわち需要側による電力の負荷平準化 [4] を行うことが解決策として考えられる. しかし，需要側による負荷平準化の実現には，電力の一時的な蓄積のためにバッテリーが必要となる.

2.6　本研究の立場

前節までに示した研究に対し，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することを通じて供給側の負担を減らす方法をとる. また，データ工学の立場から EV や家庭，職場などで生じる日常的な生活の記録（ライフログ）と気象情報などのオープンデータを適切にデータ管理することにより効率的なエネルギーの活用が可能であることを示すものである.

「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することを通じて供給側の負担を減らす方法」として次を考える．EV の普及が進められていることを踏まえると，2.5 節の負荷平準化を行うために，EV をバッテリーとして活用し建物と EV の間で電力を融通する VGI（Vehicle-Grid Integration）[28] が有効な方法として挙げられる．PV による発電余剰電力を EV に充電し，建物の需要電力が高い時間帯には EV から給電する．負荷平準化と VGI により，PV を有効活用し，ダックカーブ現象を解消できると考えられる（図 1(b)）. さらに，PV と組み合わせることで，EV による電力需要の増加を相殺し，EV を太陽光エネルギー由来の電力で走行させることができる．これは，VGI を行うことによるメリットであるといえる．一方で，VGI を行うことによるデメリットも生じる．例えば VGI に参加した EV のバッテリーが損耗することである．これは，VGI は走行とは無関係の余計な充給電を生じるためである.

VGI は，PV と EV を組み合わせるものである．PV は場所や天気によって発電量が大きく異なる．また，EV も場所や時間によってその数は大きく異なる．さらに，需要電力も場所や季節，時間によって大きく異なる．よって，VGI が有効であるかは場所や時間に大きく依存する．今あるその場所固有のデータから VGI が有効であるか，VGI のメリットとデメリットを定量化することは有用である.

そこで，VGI に関する一連のデータを総合的に蓄積するためのデータベースを提案する．このデータベースは，スキーマに適合するデータ形式であれば仮想データ・実データの区別なく VGI のメリットとデメリットを定量化できる．本研究では，現時点で入手可能な実データ及び妥当に生成された仮想データを用いることによって，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．その結果として VGI によって得られるメリットとデメリットを定量化する．以下の観点で VGI シミュレーションの評価を行う.

a. 太陽光発電大量導入時のメリット・デメリットの定量化

a-1　太陽光発電の余剰（の有効活用）

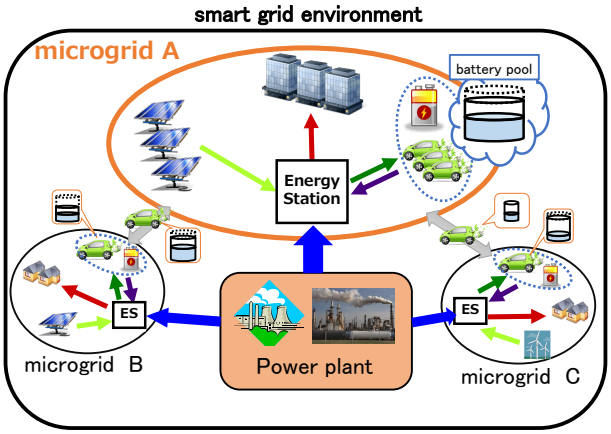


図 2　本研究で想定するスマートグリッド環境

a-2　太陽光発電導入後の実質需要電力のピーク（の抑制）

a-3　ダックカーブ現象（の解決）

b. EV の導入時のメリット・デメリットの定量化

b-1　EV が太陽光発電由来の電力で走行したかどうか

b-2　EV バッテリーの損耗

3　負荷平準化を実現するスマートグリッド

3.1　想 定 環 境

本研究での電力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 [29]．図 2 に示すように，マイクログリッドは電力需要設備，PV 設備，バッテリー，および充給電設備（ES：Energy Station，以下 ES）により構成される．マイクログリッド内には複数の電力需要設備と，複数の PV 設備が存在する．マイクログリッド内にはグリッド外から移動してくる EV がある．EV の一日の動きの例を図 3 に表す．自宅では充給電，移動の際には走行による放電，マイクログリッド内では充給電を行う．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「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．マイクログリッドにおいて，この 2 種類のバッテリーを論理的に多数束ねた「バッテリープール」が構成されるとみなす．バッテリープールの満充電容量（FCC：full charge capacity）[30] と SOC はバッテリーの充給電や 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．また，ES は PV のパワーコンディショナー，PV 設備/バッテリー/電力系統間の AC/DC 変換，後述するエネルギーフローの制御（どこにどれだけの電力を流すか），充給電制御といった役割を持つものを想定している [1]．そのような ES が，VGI を行うマイクログリッド 1 つに対して 1 つ存在する．なお，マイクログリッド内部の発電だけでマイクログリッドの需要を賄うのは不可能なので，マイクログリッド外には東京電力のような「外部発電所」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．

1：この想定と同等の機能を持つシステムが，パナソニック株式会社などから HEMS として社会実装されている．そのため，我々の想定は妥当であると考えられる．

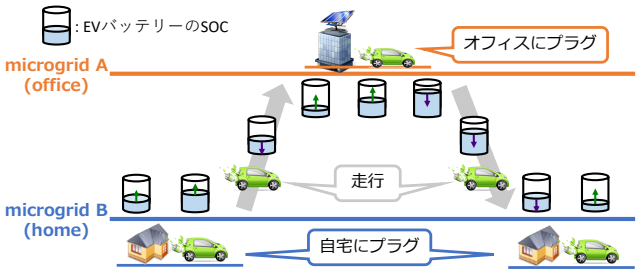


図 3　一日の EV の動き

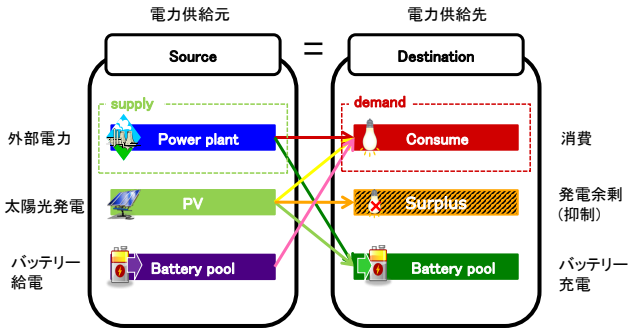


図 4　エネルギーフロー

3.2　マイクログリッドのエネルギーフロー

マイクログリッド内を流れる電力の供給元（source）と供給先（destination）およびエネルギーフロー [29] を図 4 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 2 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一致するものとする．

マイクログリッドにおける電力の供給元が以下に示す 3 通り，供給先が以下に示す 3 通りであるため，それらの組み合わせは 9 通りである．

マイクログリッドにおける電力の供給元（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)　太陽光発電電力（PV）$Source_{pv}(t)$：マイクログリッド内部の PV 設備が発電する電力

(3)　バッテリー給電電力（Battery pool）$Source_{bp}(t)$：バッテリープールから給電する電力

マイクログリッドにおける電力の供給先（destination）

(a)　消費電力（Consume）$Destination_c(t)$：電力需要設備が消費する電力

(b)　発電余剰電力（Surplus）$Destination_s(t)$：供給するポテンシャルはあるものの消費しきれない電力

(c)　バッテリー充電電力（Battery pool）$Destination_{bp}(t)$：バッテリープールに充電する電力

この内，以下の組み合わせは制限される．

- $Source_{pp}(t)$ から $Destination_s(t)$ へ電力が流れないとする．すなわち，外部電力は発電余剰電力にはなり得ない．

表 2　マイクログリッド環境の定義

変数	単位	説明
t	なし	連続時間
$\mathbb{T}$	なし	離散時間の全体集合
τ	なし	離散時間
T_{step}	s	サンプリング間隔
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
η_{charge}	なし	充電効率
$\eta_{discharge}$	なし	給電効率

- $Source_{bp}(t)$ から $Destination_s(t)$ へ電力が流れないとする．すなわち，給電電力を消費しきれない状態は想定しない．
- $Source_{bp}(t)$ から $Destination_{bp}(t)$ へ電力が流れないとする．すなわち，バッテリー間の充給電は想定しない．

以上より，電力の供給元と供給先の組み合わせ（エネルギーフロー）は図 4 の矢印で示される，以下の 6 通りであると定義する．

エネルギーフロー（energy flow）

P_{pp_c}: 外部電力を直接消費

P_{pp_bp} : 外部電力をバッテリーへ充電

P_{pv_c} : 太陽光発電電力を直接消費

P_{pv_s} : 太陽光発電電力のうち消費・充電しきれない発電余剰電力

P_{pv_bp} : 太陽光発電電力をバッテリーへ充電

P_{bp_c} : バッテリーからの給電電力を直接消費

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）が生じるため，充給電ロスも考慮しシミュレーションを行う．

3.3　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，電力の需要と供給のマッチングを考える．本研究では，外部電力 $Source_{pp}(t)$ に対してピークカット・ピークシフトを究極的に行った結果として外部電力が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 5 に負荷平準化の概念図を示す．ここで，EV はマイクログリッド内外へ移動するため，時間ごとにバッテリープールの容量は変化する．負荷平準化を行うためには大容量のバッテリープールが必要となるため，1 日を通して負荷平準化を実現することは現実的に難しい．そこで，1 日のうち特定の時間帯のみを負荷平準化の対象とする．この時間帯を負荷平準化時間帯と定義する．それ以外の時間帯をバッファ時間帯と定義する．

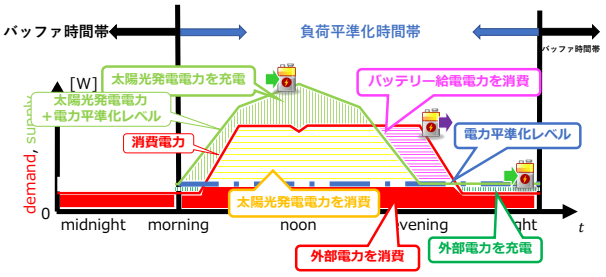


図 5　再エネと EV バッテリーを活用する負荷平準化

4　太陽光発電と EV を統合する負荷平準指向スマートグリッド DB

4.1　VGI スキーマ

3 章に示したスマートグリッドに関する一連のデータを統合して蓄積するデータベースについて説明する．概念データモデルを図 6 に示す．この提案データベースは，VGI を行った結果のメリット・デメリットを多面的に定量化できるものである．また，スキーマに適合するデータ形式であれば，仮想データ・実データの区別を問わず定量評価することが可能である．このとき，仮想データを用いればシミュレーションに，すべて実データを用いれば振り返り評価となる．

図 6 に示したスキーマをもとに，RDB スキーマに変換し，実装システムを構築した．提案するデータベースの RDB スキーマを図 7 に示す．図 6 中の赤字番号と図 7 中の赤字番号はそれぞれ対応している．概念スキーマの各エンティティ及び RDB スキーマの詳細は文献 [31] に示したため，紙面の都合上ここでは省略する．

4.2　VGI スキーマを用いた定量評価

本研究では，マイクログリッドにおける負荷平準化の有用性を示すために，以下の 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”

現在の多くの電力需要側の環境に最も近いシナリオである．

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”

シナリオ 0 に加え，PV を建物の屋上に設置したシナリオである．

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”

PV を建物の屋上に設置することに加え，マイクログリッドに出入りする車を EV とし，負荷平準化を行う．

5　VGI シミュレーション

本章では，3.1 節で述べた想定環境における VGI シミュレーションを行う．VGI シミュレーションの前提として 5.2 節でバッテリーの損耗（Δ SOH：SOH の変化量，SOH（State of Health）：バッテリー健全度）の定式化を行う．そのあとで，4

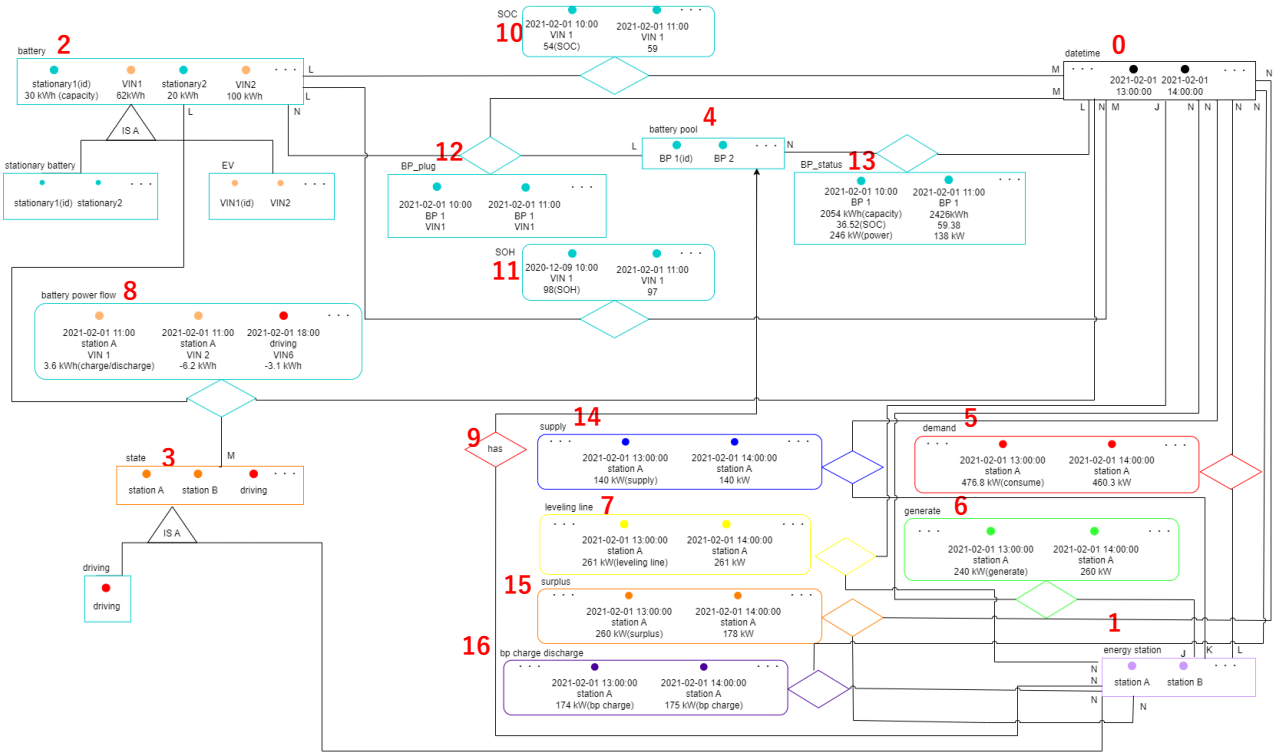


図 6　概念スキーマ

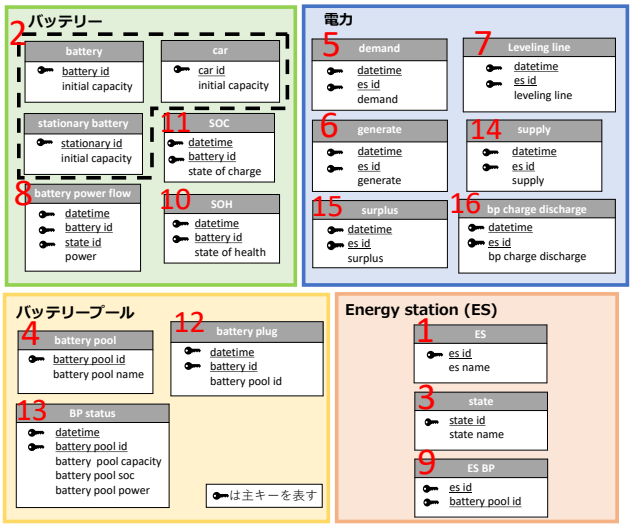


図 7　RDB スキーマ

章のデータベースを用いて分析・評価を行う．負荷平準化を行うためには事前に需要電力や太陽光発電電力，EV の動きの予測を行う必要がある．しかし本稿では，前日の時点で翌日の需要電力・太陽光発電電力・EV の動きを既知として，遡及的な負荷平準化シミュレーションを行った．

5.1　使用データ

本研究では，PV を有効活用し，かつ PV によって生じる夕方のピークを抑制するために，シミュレーションによる負荷平準化を考える．本シミュレーションに使用したデータを，表 3 に示す．シミュレーションにあたり，図 7 で示した提案データベーススキーマによって作成したデータベースに実際にデータを挿入していく．以下，図 7 中の赤字番号順に説明していく．

0. datetime

τ_0（初期値）を 2021-01-01 0:00，T_{step}（サンプリング間隔）を 1 時間とした．

$$\mathbb{T} = \{2021\ 01\text{-}01\ 0{:}00 + (n-1) | n \in \mathbb{N} \cap n < 24 * 365 hour\} \tag{2}$$

1. Energy Station（ES）

ES を有するマイクログリッドとして，横浜国立大学の研究棟 3 棟（以下,「建物」と記述する）で構成されるマイクログリッドおよび，213 名の通勤者の家 213 軒それぞれで構成されるマイクログリッドがあることとした．なお，通勤者の家に関しては，シナリオ 0，1，2 に関わらず PV がないものとし，負荷平準化・VGI を行わない．4.2 節で述べたシナリオは,「建物」のみに適用する．

2. battery(car,stationary battery)

シナリオ 2 でのみ存在する.「建物」に存在するとした架空の定置型バッテリー（capacity は 1000kWh）と，通勤者などによって出入りする車を全て EV として，213 台の EV があるとした（capacity は 62kWh/台）仮想データを生成した．駐車場の映像をもとに作成した入退構ログは EV71 台分であったが，それを拡張し 213 台の EV が存在するとした．

3. state

EV は通勤のために通勤者の家と「建物」間を走行する．1 台の EV については，EV で通勤した走行ログが実際に存在するため，実データを用いた．他の EV については，全国の平均通勤距離が 10km である [32] ことから，EV ユーザの家と「建物」の距離は 8km，12km のいずれかとした仮想データを生成

した．

4. Battery Pool : BP

シナリオ 2 でのみ存在する．BP は,「建物」に 1 つ存在するとした．

5. Demand

シナリオ 0，1，2 で共通のデータを用いた．横浜国立大学の施設部が構内の各建物の電力データを公開している [1].「建物」の需要電力データ (実データ) を用いた．

6. Generate

太陽光発電データはシナリオ 1，2 で共通である．シナリオ 0 では存在しない．太陽光発電パネルがないため，日射量のオープンデータから以下の式（JIS C 8907:2005）を用いて算出 [2] した仮想データを生成した．H_{Am} は自治体が [2] 公開している日射量から算出した．太陽光パネルの設置面積を横浜国立大学の全ての建物の屋上の面積の 14%とした．

$$E_p = K * P_{AS} * H_{Am}/G_s \tag{3}$$

7. Leveling Line

あるマイクログリッドの電力平準化レベルの高さ（leveling line[kW]，表 2 の $L(t)$）を以下の式を用いて計算した．このとき，負荷平準化開始時刻 T_{start} を日の出時刻，負荷平準化終了時刻 T_{end} を 24 時とした．

$$L(\tau) = \frac{1}{T_{end} - T_{start}} \sum_{t=T_{start}}^{T_{end}} (Destination_c(t) - Source_{pv}(t)) \tag{4}$$

8. Battery Power Flow

バッテリーの充給電は以下の条件のもとで発生しうる仮想データを生成した．

- 「建物」における負荷平準化時間帯の負荷平準化を達成するための充給電
- 「建物」における負荷平準化時間帯以外の SOC が 30%になるための定置型バッテリーへの充給電
- 家における次の日の「建物」到着時に SOC が 55%になるための EV への充給電
- EV ユーザの家と「建物」間における出退勤のための EV の走行

家での充給電速度を最大 3kW とした．また，充電効率 η_{charge} と給電効率 $\eta_{discharge}$ を 5.3 節で説明する．

9. ES BP

「建物」の ES が唯一バッテリープールを 1 つもつ．

10. SOH (State of Health : バッテリー健全度)

SOH は 5.2 節で説明する仮想データを生成した．

11. SOC (State of Charge : バッテリー充電率)

EV の SOC は 30〜80%の間に収まるように充給電を行うこととした仮想データを生成した．

12. Battery Plug

定置型バッテリーは常に「建物」のバッテリープールに属しているものとした．EV は入退構ログから「建物」に停車中は常に「建物」のバッテリープールに属しているものとし，それ以外の時は属していないものとした．

表 3　使用したデータと文字式

項目	単位	説明
E_p	kWh	PV 発電電力量
K	なし	システム出力係数
P_{AS}	kW	標準太陽電池アレイ出力
H_{Am}	kWh/m^2	傾斜面日射量
G_s	kW/m^2	日射強度
n_{charge}	なし	充電効率
$n_{discharge}$	なし	給電効率

13. BP Status

その時間にバッテリープールに属している個々のバッテリーに状態の総和で求められる仮想データを生成した．

14. Supply

Supply は Demand，Generate，Leveling Line，BP Status から決まる仮想データを生成した．負荷平準化時間帯は Supply は Leveling Line に一致するように制御される．BP への充給電に過不足が生じると Supply は Leveling Line からそれだけずれる．負荷平準化時間帯以外では，定置型バッテリーへの充給電と Demand の値から定まる．

15. Surplus

BP へ充電しきれないと Surplus が発生する仮想データを生成した．

16. bp charge discharge

ES から計測した BP との充給電を記録した仮想データを生成した．

5.2　バッテリーの損耗（Δ SOH）の定式化

2.4 節より，本研究では EV バッテリーの損耗の定式化を行った．我々がデータを持つ EV は極端な低温あるいは高温条件下での充放電を行なっていないため，式 (1) においての T の値を定数とみなした．また充電速度に関しても，充放電速度が高い充放電が少ないため，定数とみなした．よって，該当部を定数 A,B と置き換え，二つの式を足した EV バッテリー損耗モデルの式を，t を経過日数，n を総放電量とし，式 (5) を用いて計算した．

$$\Delta SOH = A \times t^{0.5} + B \times n \tag{5}$$

ここで，1 台の EV(日産リーフ (ZAA–ZE1 型, バッテリー容量 62kWh）) の実データから A と B を求め，VGI シミュレーションの EV はすべて式 (6) で損耗が説明できるとした．

$$\Delta SOH = 0.078 \times t^{0.5} + 0.00087 \times n \tag{6}$$

5.3　エネルギー変換ロスのモデル化

充給電設備を通してバッテリーと電力のやりとり（充給電）

1：横浜国立大学施設部 (学内限定),
http://shisetsu.ynu.ac.jp/gakugai/shisetsu/
2：横浜市環境創造局，http://www.city.yokohama.lg.jp/kankyo/

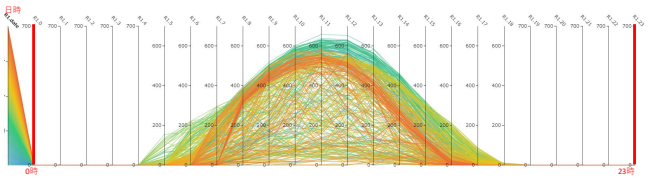


図 8　2021 年の太陽光発電電力

を行う際，エネルギーを全て活用することはできず，エネルギー変換時に電力のロスが生じる．そこで，VGI シミュレーションを行うために，エネルギー変換ロスのモデル化をする．そのため，実際に EV と充給電設備を使用して電力系統との充給電を行う実験を行い充給電効率を計測した．その結果充電効率 η_{charge} を 84%，給電効率 $\eta_{discharge}$ を 73%とした．

5.4　太陽光発電電力の概形

シナリオ 1・2 における 1 年間のスマートグリッド内に設置された太陽光発電の発電電力を PCP（Parallel Coordinates Plot）により可視化した [33]．その結果を図 8 に示す．折れ線一本が一日の太陽光発電電力，高さが電力，軸の R1.zero から R1.twenty three が時間をそれぞれ表す．折れ線は日付（R1.date，図中左端の軸）をもとに色付けし，2021 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日へ順に青→緑→橙と推移する．図 8 より，内部発電電力の概形は日ごとに大きく異なることがわかる．季節によって高さが変化し，冬から春が安定して高いことがわかる．

5.5　シナリオごとの一日の外部電力の推移

シナリオごとの，一年間の日ごとの外部電力を PCP により可視化した．結果を図 9 に示す．折れ線一本が一日の外部電力，高さが電力，軸の R1.zero から R1.twenty three が時間をそれぞれ表す．図の上段から順にシナリオ 0，シナリオ 1，シナリオ 2 の外部電力である．まず、シナリオ 1(図 9 中段) に注目すると，夕方にかけて切片の高さ (1 時間当たりの外部電力) が激しく変動している (1 章の a-3 のダックカーブ現象) ことがわかる．一方で，シナリオ 2 は，ほとんどの時間 (5533 時間/5714 時間 = 約 97%) において未明から明け方を除いて切片の高さが一定に保たれていることがわかる．このことは，VGI によって a-3 の問題を低減できることを示す．次に，シナリオ 0 と 1 を比較すると，切片の高さの最大値は 500kWh/h 程度と変わらない．これは，2.6 節の a-2 の問題を示す．一方で，シナリオ 2 は，切片の高さは例外を除いて 320kWh/h 程度となり，約 28%のピークカットを達成できる．これは，VGI によって a-2 の問題を低減できることを示す．ただし，シナリオ 2 の青線にみられるように，1 年の中にわずかな例外日もある．これらについては別途対策が必要である．

5.6　シナリオごとの年間評価

図 10 にシナリオごとの年間の電力収支積み上げグラフを示す．横軸が想定シナリオ，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: 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，各色は以下を表す．

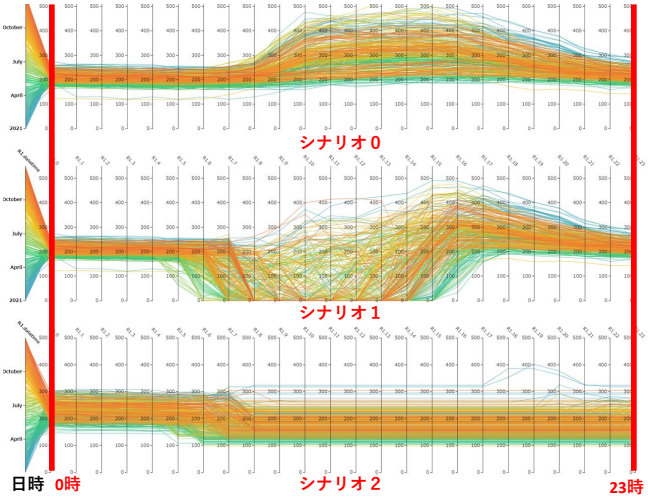


図 9　シナリオ別の外部電力

- 青色: 外部電力量の年間積算値
- 黄緑色: 太陽光発電電力量の年間積算値
- 紫色: バッテリープールからの給電量の年間積算値

供給先の積み上げ棒グラフにおいて，各色は以下を表す．

- 赤色: 消費電力量の年間積算値（基準値とする．そのため各シナリオで同じ値となる.）
- 橙色: 発電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 10 のシナリオ 1 と 2 の発電余剰電力量の年間積算値 (図 10 橙色・塗りつぶしなし) を比較すると，シナリオ 2 では 1 に比べてバッテリーの充給電管理により発電余剰電力を 52%削減できたことがわかる．このことはシナリオ 1 では 2.6 節の a-1(PV の余剰) の問題が顕在化していて，一方シナリオ 2 では，VGI により 2.6 節の a-1 の問題が低減できることを示す．さらに，シナリオ 0 と 2 の外部電力量の年間積算値を比較すると，シナリオ 2 では 0 に比べて 1 年間で 22%の外部電力を削減できたことがわかる．現行の電源構成比における火力発電の割合が 76.4%である [34] ことを踏まえると，外部電力の削減はカーボンニュートラルの実現につながる．

5.7　EV 走行における電力由来

図 11 は横軸に Car_id を年間の走行放電量が大きい順にソートし，縦軸に VGI に参加した各 EV の一年での走行放電量とその由来を表したものである．図 11 の緑色の部分は PV 由来の走行放電量を表し，青色の部分は外部電力 (Power Plant) 由来の走行放電量を表す．家で充電したときは全て外部電力由来の電力とみなしている．dirivng(pp_driving + pv_driving) に対する pv_driving の割合は全体で 65%，最大 82%となり，VGI

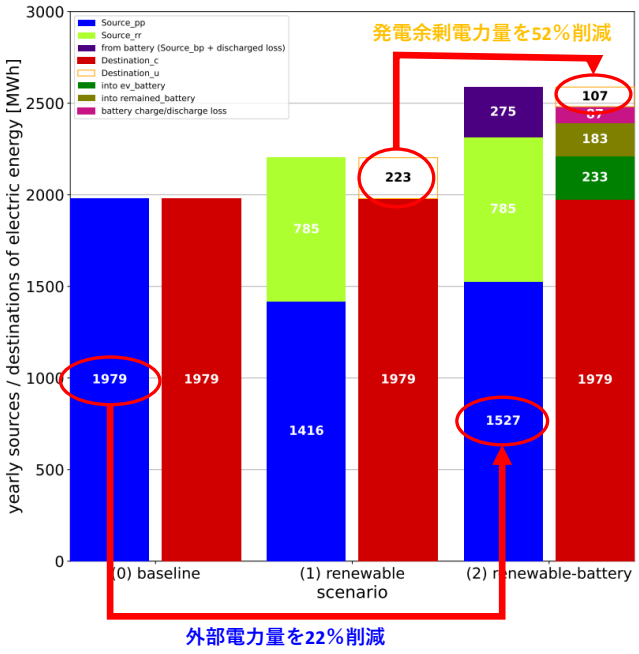


図 10　既知データを用いたシナリオごとのエネルギーフローの年間収支

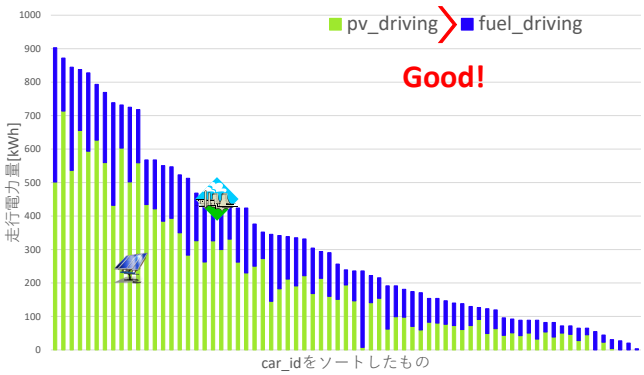


図 11　EV 走行電力の由来の内訳

に参加している EV の多くは太陽光発電由来のエネルギーで走行していることになる．このことは，2.6 節の b-1 の問題を解決できることを示す．

5.8　1 年間における EV のバッテリー損耗

図 12 は，VGI に参加した EV のバッテリーが，VGI によってどれだけ損耗したのかを表す．横軸に car_id を損耗の大きい順に並べ替えたもの, 縦軸左側にグリッド内での給電量，縦軸右側に Δ SOH を取り，バッテリーの給 (放) 電量にサイクルロスは比例する (5.2 節) ため，左側の単位 [kWh] を%point に変換したものである．カレンダーロスは全ての車において同じであること，サイクルロスの方が支配的であることからサイクルロスのみを考えた．走行放電量に比べ，VGI による建物への給電量は大きい．また，年 200 日程度通勤する EV は 2.5%程損耗した．私生活でも EV を利用すること，カレンダーロスも増えること，5 年，10 年使うことを考えると無視できないものとなる．損耗によるユーザの機会損失の定量化は，2.6 節の b-2

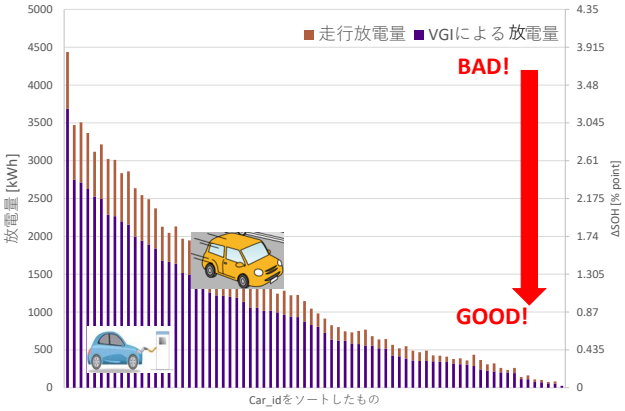


図 12　EV バッテリーの VGI による損耗

の問題に対する EV ユーザの不安を低減することや，EV ユーザに対する制度的補償に有用である．

6　ま　と　め

本論文では，提案したデータベースを用いて VGI シミュレーション結果の定量化を行った．シミュレーションにはいくつかの実データと仮想データを用いた．これらのデータを用いた場合の結果として次のことが明らかになった．

a. 太陽光発電導入時のメリット・デメリットの定量化
　a-1　太陽光発電の余剰（の有効活用）：約 52%削減した．
　a-2　太陽光発電導入後の実質需要電力のピーク（の抑制）：約 28%のピークカットを行った．ただし，例外日がある．
　a-3　ダックカーブ現象（の解決）：約 97%を平準化した．
b. EV の導入時のメリット・デメリットの定量化
　b-1　EV が太陽光発電由来の電力で走行したかどうか：全体で 65%，最大 82%が太陽光由来で走行した．
　b-2　EV バッテリーの損耗：年間で Δ SOH2.5%を生じるものがあった．制度的補償を検討できる．

以上より PV と EV を統合して負荷平準化を行うスマートグリッドのシミュレーション評価が可能であることを示した．また，シミュレーション結果より，このスマートグリッドの想定はある程度有用な見込みがあることがわかった．ただし，シミュレーションに用いたデータは固有のものであった．別の場所のデータを用いれば，異なる結果が示される．適用するデータの多様性を増やしていくこと，およびシミュレーション結果の正確さの検証（実証実験）は今後の課題である．

謝　　辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (課題番号 22H03810) 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] 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略. https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf, 6 2021. (Accessed on 12/24/2022).

[6] 東京電力ホールディングス株式会社. 長期的な安定供給とカーボンニュートラルの両立に向けた事業構造変革について. https://www.tepco.co.jp/press/release/2022/pdf2/220428j0101.pdf, 4 2022. (Accessed on 12/24/2022).

[7] 経済産業省資源エネルギー庁. 太陽光発電について (第 63 回 調達価格等算定委員会). https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/063_01_00.pdf. Last accessed: 04 July 2022.

[8] 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.

[9] 馬場博幸, 斉藤哲夫, 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.

[10] Jiucai Zhang, Jennie Jorgenson, Tony Markel, and Kevin Walkowicz. Value to the grid from managed charging based on california's high renewables study. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 34, No. 2, pp. 831–840, 2019.

[11] 小嶋祐輔, 荒井綾希子, 阿部力也, 岩船由美子. 電気自動車・蓄電池を用いた戸建て住宅地域の電力融通システムの設計方法の確立およびその評価. エネルギー・資源学会論文誌, Vol. 42, No. 2, pp. 50–57, 2021.

[12] 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.

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

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

[15] 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.

[16] 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.

[17] 中川二彦, 千阪秀幸, 古矢勝彦. 電動車を用いた太陽光電力の高効率利用システム. 自動車技術会論文集, Vol. 53, No. 1, pp. 38–44, 2022.

[18] 理弘大澤, 保夫桑沢, 孝之秋元, 大介田嶌, 洋園江, 聡史上森, 正之小松. 自動車，蓄電システムを含めた住宅エネルギー性能指標とＶ２Ｈによる co2 排出量削減の効果. エネルギー・資源学会論文誌, Vol. 40, No. 3, pp. 78–84, 2019.

[19] Arnob Ghosh and Vaneet Aggarwal. Menu-based pricing for charging of electric vehicles with vehicle-to-grid service. *IEEE Transactions On Vehicular Thechnology*, Vol. 67, pp. 10268–10280, 2018.

[20] Viet Thang Tran, Md. Rabiul Islam, Kashem M. Muttaqi, and Danny Sutanto. An efficient energy management approach for a solar-powered ev battery charging facility to support distribution grids. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 55, pp. 6517–6526, 2019.

[21] Harun Turker and Ilhami Colak. Multiobjective optimization of grid- photovoltaic- electric vehicle hybrid system in smart building with vehicle-to-grid (v2g) concept. In *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 1477–1482, 2018.

[22] Jonathan Donadee, Robbie Shaw, Oliver Garnett, Eric Cutter, and Liang Min. Potential benefits of vehicle-to-grid technology in california: High value for capabilities beyond one-way managed charging. *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 7, No. 2, pp. 40–45, 2019.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 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.

[26] Kenechukwu Ginigeme and Zhanle Wang. Distributed optimal vehicle-to-grid approaches with consideration of battery degradation cost under real-time pricing. *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 5225–5235, 2020.

[27] John Wang, Justin Purewal, Ping Liu, Jocelyn Hicks-Garner, Souren Soukazian, Elena Sherman, Adam Sorenson, Luan Vu, Harshad Tataria, and Mark W. Verbrugge. Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickel–cobalt–manganese oxide + spinel manganese oxide positives: Part 1, aging mechanisms and life estimation. *Journal of Power Sources*, Vol. 269, pp. 937–948, 2014.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 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.

[31] 石毛大貴, 能條太悟, 廣居樹, 本藤祐樹, 富井尚志. ライフログデータベーススキーマに基づくマイクログリッドにおける電力負荷平準化の価値の定量化. 研究報告データベースシステム（DBS）, 第 2022-DBS-175 巻, pp. 1–6, 2022.

[32] 国土交通省総合政策局. 交通基本法案検討小委員会 資料. https://www.mlit.go.jp/common/000128770.pdf, 11 2010. (Accessed on 12/28/2022).

[33] 能條太悟, 杉本航洋, 富井尚志. Sql ライクな操作言語を用いた可視化システムの応用とライフログ分析のためのデータ操作高速化. 第 15 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2023), 4b-7-3, pp. 1–10, 2023.

[34] 資源エネルギー庁. 令和 2 年度 (2020 年度) におけるエネルギー需給実績 (確報). https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/honbun2020fykaku.pdf. Last accessed: 20 July 2022.