

市場価格連動契約における電気バスのV2Bを活用した デマンドレスポンスの事業性評価

Feasibility Study of Demand Response Using V2B With Electric Bus in Market Price-Linked Contract

阿部 圭佑*・前 匡鴻*・松橋 隆治*

Keisuke Abe Masahiro Mae Ryuji Matsuhashi

(原稿受付日 2023年11月30日, 受理日 2024年11月27日)

Abstract

Along with the electrification of vehicles, the sector coupling of electricity and transportation is progressing and demand response using electric vehicles is becoming more important for further effective use of renewable energy. The aim of this paper is to analyze the feasibility of demand response using electric buses in the market price-linked contract. Most of the previous studies on demand response using electric vehicles have focused on consumers, and there have been few studies on buses, which are considered to have less uncertainty and are easier to manage. To analyze the effectiveness of the market price-linked contract for promoting demand response in electric bus operations, the operation, annual costs for the bus operator, and revenues for the retailer are compared for the conventional fixed price contract case and the market price-linked contract case. The results show that the market price-linked contract is more effective in promoting demand response and making the profitability of retailers more stable. This paper shows some possibilities for electric buses to join demand response programs in the future.

Key words: electric vehicle (EV), vehicle to building (V2B), demand response (DR), market price-linked contract, fixed-route bus

1. 背景

1.1 交通車両の電動化と自立分散型エネルギーシステム

カーボンニュートラル社会の実現のために、交通分野においても社会的な変革が求められてきている。IEAによると、2021年の全二酸化炭素排出量のうち、20%以上が交通分野からの排出であったという¹⁾。そして、この排出を削減するために、将来的には車両の電動化が進むことが見込まれている。電動車両の特徴として、さまざまな場所に分散したエネルギー貯蔵リソースとして活用できるという点がある。このような特徴は、現在普及が進む太陽光発電や燃料電池のような分散型電源とも相性が良いと考えられる。それらの分散するエネルギーリソースを結びつけるものとして、環境省では自立分散型エネルギーシステムが提唱されている²⁾。そのような社会では、車両の電動化によってこれまであまり結びつきが深くなかった電力と運輸の結びつきが強くなり、セクターカップリングが進むと言われている。そこで使用される車両は移動用だけでなく、再生可能電源の調整用のリソースとして活用され、エネルギー自給率の向上に貢献できる上、災害時にも電源として機能することができる³⁾。このようなシステムは、エネルギー自給率やレジリエンスといった観点からも望ましいと考えられ、政府が策定した「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」⁴⁾においても国の成長戦略として言及されている。そして、そのような役割は地域社会を担う公共交通事業においても期待されていると考えら

Corresponding author; Masahiro Mae, E-mail : mmae@ieec.org

*東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1



図1 可部循環線⁵⁾

れる。実際にここ数年では交通車両の電動化に伴い、電気バスの普及も各地で進みつつある。例えば、広島県広島市では、2022年11月より、電気バス2台が運行を開始した⁵⁾。参考までに、電気バスが導入されている可部循環線を図1に示す。一周4.5kmほどであることがわかる。車体はBYD社のJ6で航続距離は200kmほどである(電池容量は105.6kWh)。持続可能な社会に向けて、今後電動化するバスを上手に活用していくことが期待されている。

1.2 再生可能電源の普及拡大とデマンドレスポンス

交通車両の電動化から翻り、電力の発電側について目を向けてみると、太陽光発電のような変動型電源の普及に伴い、発電と需要を一致させることがこれまで以上に難しいものとなってきつつある。図2は、カリフォルニア州における電力市場の価格と再生可能エネルギーによる発電量を第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンスの内容のもとに作成されたもの

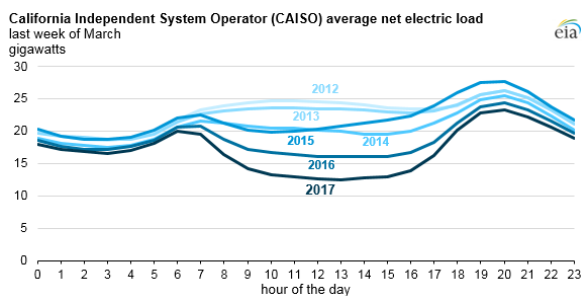
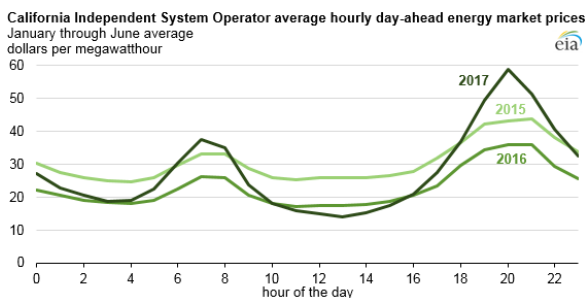
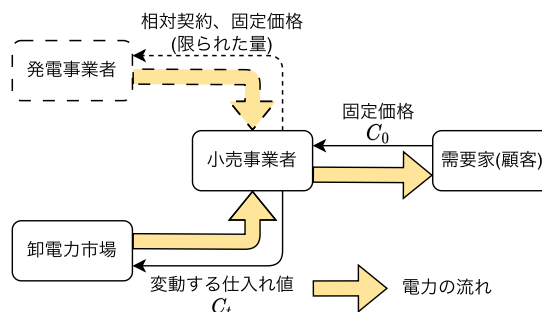


図2 (上図) 電力市場価格と (下図) 正味需要⁶⁾

除いた正味の需要を示したものである⁶⁾。この二つの曲線には相関があり、特に太陽光発電が立ち上がる、または立ち下がる早朝と夕方の時間に正味の需要も大きなコブができ、価格が高くなっていることがわかる。逆に昼間において太陽光発電の割合が多くなっているときは、価格が安くなっていることがわかる。このような特徴は、年を経て太陽光発電の普及が進むにつれて顕著になっている。特に、太陽光発電の出力抑制が働いている場合にこの傾向がよく見られると言われている⁷⁾。この場合、夕方と早朝の時間は系統が厳しい状況にあるため、その時間における需要を太陽光発電の電力が余っている昼間にシフトすることで、系統の安定化に貢献し、再生可能エネルギーの有効利用率も上げることができる。このようにデマンドレスポンスにより需要のシフトを促していくことで、再生可能エネルギーをより有効に活用でき、系統の安定化にも貢献することができるようになる。

デマンドレスポンスを促進する方法の一つとして、小売価格を卸電力市場の価格に連動させることで、需要家側に価格が高い時間帯にはなるべく電気を使わないようにしてもらうという方法がある。このような契約体形は小売事業者にとってもメリットのある契約である。図3に電力の流れと、小売事業者が電力を仕入れる卸電力市場の特徴を示す。現状では小売価格が固定である契約がメインであるが、そのような契約体系では、卸市場の変動する価格のリスクを小売事業者側が受け持っている形となるため、小売事業者の収益のばらつきが大きくなるという問題がある。さらに、需要家側にとってはどの時間帯に電力を消費しても価格が同じであるため、需要家側にデマンドレスポンスを促しにくい状態になってしまっている。一方、市場価格連動



小売の収入 $C_0 - C_t$ は大きく変動する。場合により、 $C_0 - C_t < 0$ ということもある。

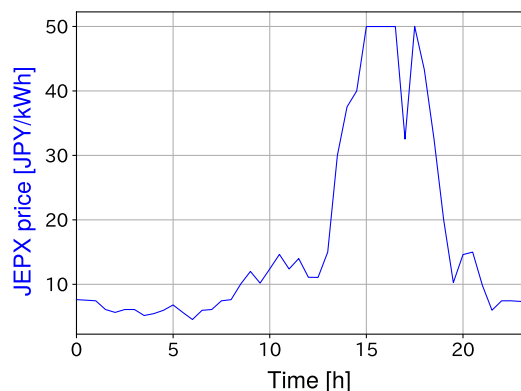


図3 固定価格電力契約における (上図) 電力とお金の流れと (下図) 卸電力価格の特徴 (2020年9月3日)

であれば、卸市場の価格変動のリスクを小売事業者は背負わずに済む上、デマンドレスポンスを直接促しやすくなると思われる。このようなことから、今後は市場価格連動契約を増やすことによって小売事業者側・需要家側双方にとってメリットがあるようにしつつ、需要家側にも柔軟性を持たせ、再生可能エネルギーを有効に活用していくことが望ましいと考えられる。

1.3 既往研究と本論文の目的

これまで電動車両によるデマンドレスポンスは、居住区における一般の電気自動車を活用したものが多かった。例えば、レビュー文献⁸⁾を参照すると、電気自動車を活用した需要側機器制御について分析した論文が多数取り上げられているが、その多くは一般の電気自動車について分析したものであった^{9),10)}。例えば文献¹¹⁾では、複数の家の需要と電気自動車を絡めてデマンドレスポンスを行った場合のモデルを考えている。しかし、実際に一般の車両を活用するに当たっては、車両の稼働の不確実性を加味しながらデマンドレスポンスの計画を立てなければならないことが予想される。その点において、電気バスは時刻表があるため、より不確かさが小さく運用がしやすいと考えられるのにも関わらず、分析があまりなされてこなかったと言える。この理由の一つは車両数の違いであると考えられる。車両全体で比較した場合、バスの占める割合は小さい。しかし、

電動化のスピードを加味した場合、脱炭素関連の自治体への補助金も相まって、バスの方が有利になる可能性がある。

また、車両から供給できる需要の大きさを考えた場合、家庭よりも事業所の方がその需要が大きく、車両を有効に使える可能性がある。一般の乗用車の場合、消費者の意向が設備導入の際に大きく影響するのに対し、事業者の場合はコストメリットが合えば導入される可能性が高いということもメリットの一つである。

また、文献¹²⁾においては、学校のバスの充電の群制御に関して、学校の通学用のバスを大量に電動化した場合に、電力需要が集中しないように分散させる充電計画手法について考察していたが、放電による建物への電力供給までは行っていなかった。

文献¹³⁾においては、地域における太陽光発電の余剰を減らすためにバスの最適な充電タイミングを決定するための最適化手法が提案されていた。その中で、電力の流れは充電という一方向のみに限られていた。しかし、放電も行うことでより多くの余剰な電力を吸収し、デマンドレスポンスにより貢献できるようになると考えられる。そこで、本論文ではバスの事業所自体の需要の一部を、バスからの放電によって賄うことを考える。その際、需要家と小売事業者側双方にとってメリットのある契約体系を打ち出す必要がある。今回はそのような契約体系の比較のため、太陽光発電を仮定せず単純な電力調達のみによる形態を考えることにする。

以上より、本論文は市場価格連動契約によって電気バスを用いたデマンドレスポンスを促進した場合における、小売事業者側と需要家側のメリットについて分析を行う。そのような分析を行うため、電気バスについて次に示す二通りの場合についてシミュレーションを行い、それぞれの場合の小売事業者のコストと需要家の収益を比較する。

まず、一つ目として固定価格契約を行い、需給状況を考慮せず電気バスを充電した場合について検討する。そして二つ目として、市場価格連動契約を行い、市場の価格を考慮して電気バスの充放電によるデマンドレスポンスを行う場合について検討する。

本論文の貢献は次の通りである。

- 電気バスの交通インフラと太陽光発電などの電力インフラのセクターカップリングによるデマンドレスポンス
- 小売事業者と需要家双方に着目した事業性評価
- 実際の電気バスの運用に基づいた時系列電力解析

電気バスによる交通インフラに着目した理由としては、次のような点が挙げられる。まず、電気バスには時刻表があるため、充放電を行うにあたっての不確実性が少なく、予定を立てやすいという利点がある。また、前述のように

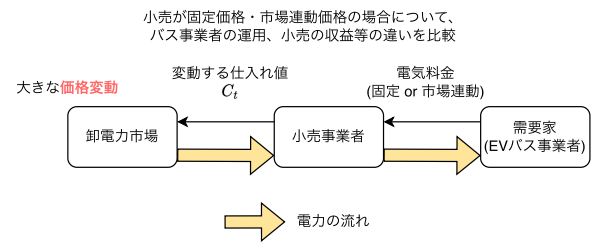


図4 電力調達モデル

既往研究では一般の電気自動車についての研究が多く、電気バスを用いたものは少ない。故にシステムとして検討する価値があると考えられる。その他、一般の車両と比較し、バスは一つの交通事業者がまとまった台数を保有していることが多く、複数のバスを束ねて制御しやすいという利点があると考えられる点や、バス事業と電気事業はともに公共性の高い事業であり、将来的な連携の可能性が高いと考えられる点なども踏まえ、電気バスに注目する。

本論文の概要は次の通りである。今回は電気バス2台を巡回に利用するバス事業者を仮定し、電力市場や施設の需要を加味したモデルを作成する。そして、その電力契約の形態を固定価格と市場連動価格という二通りの場合に分けて需要家側の運用の最適化を行い、需要家側の運用や電力コスト、小売事業者側の収益の違いをそれぞれ比較する。ただし、本論文では電気バス2台とそれらの蓄電池容量に対応した施設の需要のみを扱うことから、電力契約全体における消費電力の割合は比較的小さいという仮定から電力料金における基本料金は共通として除き、電力消費量のkWhで決まる従量料金のみを比較検討している。

章ごとの概要は次の通りである。2章において問題設定と最適化モデルについて説明する。3章でデマンドレスポンスにおける需要家と小売事業者の事業性評価を行う。そして、4章で結論と今後の展望を述べる。

2. 問題設定・手法

2.1 モデルの内容

今回検討したモデルの内容を説明する。図4に示すように、前述の広島市の例⁵⁾を参考にしつつ、2台の電気バスを導入したバス会社がバスの運行を正常に維持しながら、バスの事業所の需要も賄うために小売事業者から電力を調達するモデルを用いる。バス事業所の需要の一部は車庫に戻ってきたバスからの放電によっても賄われるものとする。また、バスの放電の際に系統への逆潮流は行わないものとする。そして、仮定したバス循環における電気バスの充放電のタイミングと、そのタイミングにおける電力市場の価格をモデルの中に入れ、混合整数計画による運用の最適化を行なった。このモデルに対し、小売事業者との契約をCase1 固定価格にした時の運用、Case2 市場連動価格にし

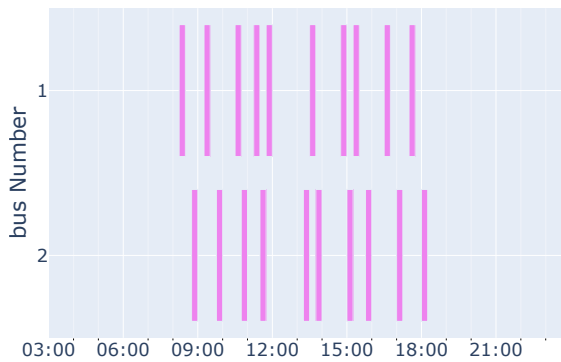


図5 バスの時刻表

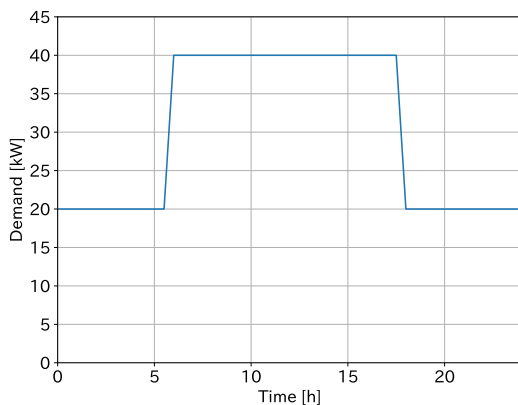


図6 電力需要のモデル

た時の運用、の2パターンで充放電計画を最適化し、それぞれの長所と短所を比較する。なお、計算の期間は2017年～2022年とし、卸電力市場のデータはその期間の実際のものを使用する。

2.2 電気バスのモデル

シミュレーション上の電気バスの挙動を作るために時刻表のデータと車両の性能データを用意し、その動きを模擬する。それぞれについて、詳細を説明する。

(1) 時刻表のデータ

前述の広島市におけるバスの時刻表を参考にし、実際のバス運行に近い時刻表を仮定する。具体的には、図5のように、一日20回の巡回で回っており、それぞれ一周15分で回ると仮定する。なお、二台のバスがあるため、それぞれ交互に運行するという仮定のもとで計算を行う。

(2) 電気バスの性能

BYD社の製品紹介¹⁴⁾を参考にし、電費：1.9km/kWh、電池容量：105.6kWh、充放電出力：30kWと仮定する。

2.3 事業所の需要モデル

電力契約の一長一短を比較するため、事業所における電力需要を図6のように仮定する。この需要は一年を通じて一定で、朝6時までは20kWであり、朝6時から午後6時

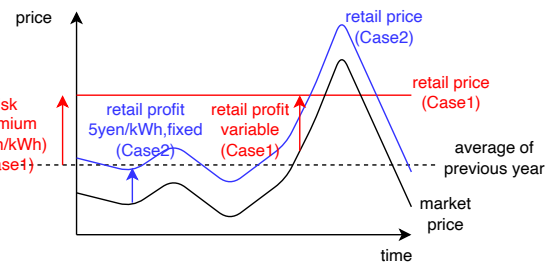


図7 Case 1, 2の小売価格の設定（託送料金を除く）

までは40kW、午後6時以降は20kWに戻るというものであるとする。本論文では、電気バス2台とそれらの蓄電池容量に対応した施設の需要のみを扱い、電力契約全体における消費電力の割合が比較的小さいため、充放電による消費電力のピーク値への影響は小さいものと仮定する。

2.4 小売価格のモデル

小売価格の仮定として基本料金は共通として除き、従量料金として固定価格の場合と、市場連動価格の場合の二通りを設ける。図7に、価格の決められ方の概要を示す。それぞれ、次のように価格が決まるものと仮定する。

(1) Case 1 固定価格におけるモデル

需要家側における従量料金の単価はどの時刻においても一定の価格であるとする。この固定価格は毎年更新するものとし、その値としては、前年度の市場平均価格にリスクプレミアと託送料金などのその他料金を加えたものとする。このリスクプレミアの部分は、固定価格によって小売事業者がリスクを背負っていることになるため、それを価格に転嫁したものである。今回のモデルでは、この価格を7円/kWhとおく。

(2) Case 2 市場連動価格におけるモデル

このケースにおいて、小売価格は卸市場の価格に小売事業者の販管費と託送等その他の料金を上乗せした価格であるとする。今回は年別の比較のため、2017年度から2022年度までのデータ¹⁵⁾を用いる。

2.5 バスの一日の運行イメージ

ここで、バスの一日の運行のイメージを掴むため、ある一日の運行による車両の充電率（State of Charge：SOC）の変化と、市場価格の推移を図8に示す。バスの巡回は一周約4kmであり、これはSOCに換算すると2%ほどの減少ということになる。バスは交互に回ると仮定したため、一つのバスにつき一日10回の巡回をすることになる。そのため、SOCに換算した場合の一日の消費率は25%ほどとなる。また、今回仮定した時刻表において、12時ごろには昼休みに入っており、バスが出ることはない。

市場価格について見てみると、発電限界費用の安い太陽光発電が多く発電している昼間には市場価格が比較的安く

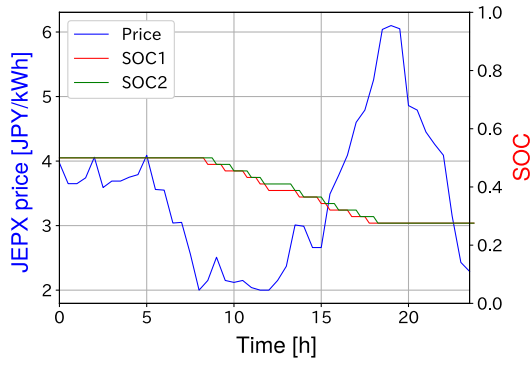


図8 SOCと市場価格の推移(2020年8月1日)

なり、太陽が沈んだ夕方から夜にかけて価格が比較的高くなるという、典型的な価格推移になっていることがわかる。図8に示す通り、バスの営業終了時間は市場価格が比較的高い時間と重なっている。そのため、市場価格連動で電力を調達する場合は、なるべく営業時間終了直後の充電を控え、価格の安い早朝に充電をすることが望ましい。夕方から夜までの価格の高い時間は、安い時間に貯めておいた電力を放電し、なるべく市場から調達する電力を少なくすることが望ましい。

2.6 各種パラメータ

本論文における各種パラメータを表1に示す。施設における需要を考えた場合、昼間に仮定した需要の大きさが40kWであり、二台の電気バスの充電出力は合計で60kWとなる。

2.7 最適化における目的関数

今回の目的関数は、式(1)のようにバス事業者の電力仕入れコストとする。この中で、市場由来の電力 P_t に対するコスト C_t が電力小売契約によって異なる。それぞれの場合におけるコスト C_t を式(2)と式(3)に示す。

$$\min. \sum_t (P_t \times C_t) \quad (1)$$

$$\text{Case 1: } C_t = C_{\text{ave}} + C_{\text{premiere}} + C_{\text{misc}} \quad (\text{固定価格}) \quad (2)$$

$$\text{Case 2: } C_t = C_{\text{market}} + C_{\text{retail}} + C_{\text{misc}} \quad (\text{市場連動}) \quad (3)$$

ただし、各変数の定義は次の通り。

P_t : ステップ t で電力市場から調達する電力量 [kWh]

C_t : 需要家が小売事業者側に支払う電力料金 [円/kWh]

C_{ave} : その年の前年度における平均市場価格 [円/kWh]

C_{premiere} : 固定価格におけるリスクプレミア [円/kWh]

C_{misc} : C_t のうち託送料金などのその他料金 (7円/kWh)

C_{market} : そのステップにおける卸電力市場価格 [円/kWh]

C_{retail} : 市場連動における小売事業者の販管費 [円/kWh]

表1 シミュレーションにおける各種パラメータ

エリア	中国地方
バスの電池容量	105.6 kWh
バスの巡回距離	一周 4.5 km
バスの電費	1.9 km/kWh
充放電出力	± 30 kW
市場連動における小売事業者の販管費	5 円/kWh
固定価格の場合の電力料金設計	前年度平均価格 + リスクプレミア
リスクプレミア	7 円/kWh

なお、最適化で意思決定をする時間幅は1ステップ15分であるとする。また、時刻 t における小売事業者側の収益 C_{revenue} をまとめたものを式(4)と式(5)に示す。

$$\text{Case 1: } C_{\text{revenue}} = C_{\text{ave}} + C_{\text{premiere}} - C_{\text{market}} \quad (\text{時間変動}) \quad (4)$$

$$\text{Case 2: } C_{\text{revenue}} = C_{\text{retail}} \quad (\text{一定料金}) \quad (5)$$

Case 1 固定価格では、小売価格を固定料金にしているため、単位電力量あたりの小売事業者の収入は一定であるが、支出は市場価格となるため、収益としては時間変動することになる。一方、Case 2 市場連動価格においては小売事業者の収益部分が一定料金に固定化されることになる。ここで、今回の最適化においては契約電力量に関するコストを含めなかった。これは、契約電力を価格に含めると促進された需要の分だけ契約電力が増え、需要家にとってはコスト増となる可能性があり、本末転倒となるからである。デマンドレスポンスを適切に促進する基本料金については、別途議論される必要があると考えられる。

2.8 制約条件

最適化問題を解くにあたっての制約条件を次に示す。

(1) EV 制約

$$0.1 \leq S_{ev,t} \leq 0.9 \quad (\forall ev, \forall t) \quad (6)$$

$$\beta_{ev,t} = 0 \text{ (discharging) or } 1 \text{ (charging)} \quad (\forall ev, \forall t) \quad (7)$$

$$0 \leq \rho_{ev,t} \leq \beta_{ev,t} \times 30 \quad (\forall ev, \forall t) \quad (8)$$

$$0 \leq \delta_{ev,t} \leq (1 - \beta_{ev,t}) \times 30 \quad (\forall ev, \forall t) \quad (9)$$

$$\rho_{ev,t} = \delta_{ev,t} = 0 \quad (\forall ev, \forall t \in T_{ev}) \quad (10)$$

$$S_{ev,t+1} = S_{ev,t} - \frac{C}{EB} \quad (\forall ev, \forall t \in T_{ev}) \quad (11)$$

$$S_{ev,t+1} = S_{ev,t} + \frac{1}{4B} \left(\rho_{ev,t} \varepsilon_c - \frac{\delta_{ev,t}}{\varepsilon_d} \right) \quad (\forall ev, \forall t \notin T_{ev}) \quad (12)$$

ただし、 $S_{ev,t}$ は各EVについてのステップ t におけるSOC、 $\rho_{ev,t}$ と $\delta_{ev,t}$ は各EVについてのステップ t における充電と放電の出力、 T_{ev} はバスが時刻表において巡回しているステッ

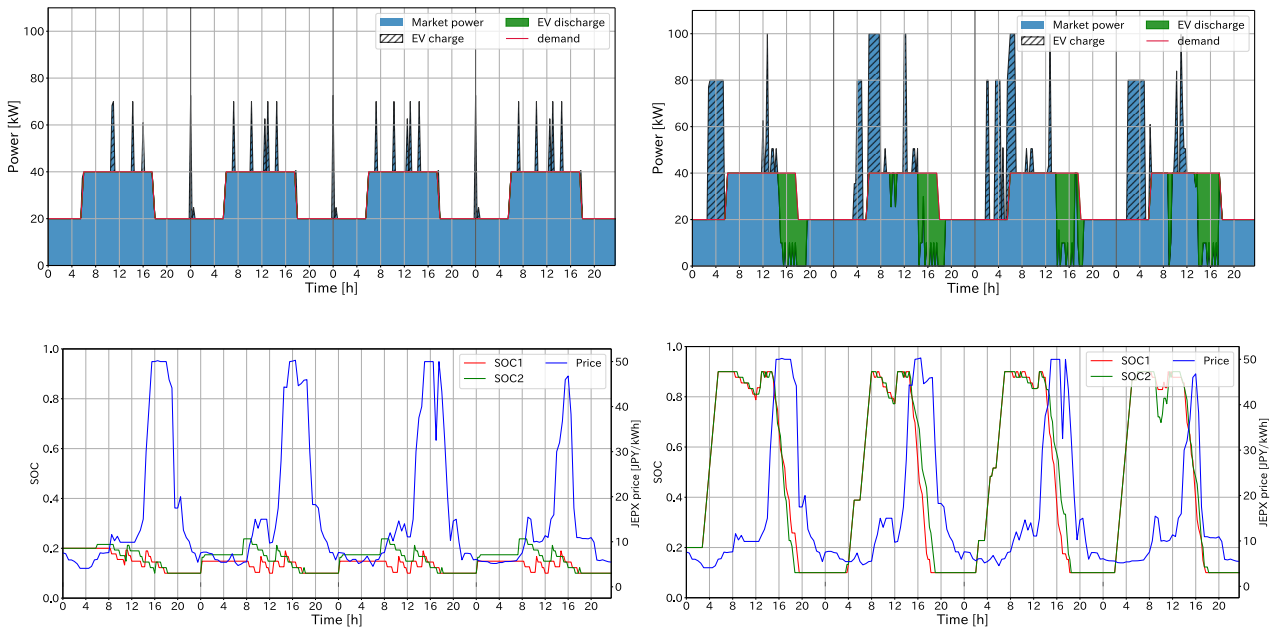


図9 2020年9月1日～4日における（上段）電力の内訳と（下段）SOC推移. 左側のCase 1は青線の市場価格を考慮せず固定料金（2019年平均市場価格約7円/kWh+リスクプレミア7円/kWh+託送料金7円/kWh）で充電を行い、右側のCase 2は青線の市場価格（+販管費5円/kWh+託送料金7円/kWh）に合わせて最適化した充放電を行う。

プの集合（EVごとに設定）とする。それ以外のステップにおいては、バスは充電、あるいは放電する（あるいは何もしない）ものとする。また、 C は一巡回における走行距離、 E は電費、 B はバッテリー容量を表している。今回のシミュレーションにおいては、モデルの簡略化のため電費は一年を通じて一定であると仮定する。実際の運行データを参考にすると、気温によっては1日の運行を通し最大15%程度追加で電力を消費することがわかっている。バスの空調使用が増えた場合電力消費が増加し、事業所に戻った際に放電に使える電力量が減少すると考えられる。逆に、バス内の空調の需要が少ない春と秋は充電時間が短く放電できる電力量が大きくなる。実際の走行データから算出した電費を用いた分析は今後の課題である。

なお、式(12)において、1ステップ15分であるため、次の式のようにkWからkWhへの変換の際に変化する電力を4で割っている。

$$(15 \text{分} \text{で} \text{変} \text{化} \text{す} \text{る} \text{電} \text{力} \text{量}) [\text{kWh}] = (\text{電} \text{力}) [\text{kW}] \times \frac{15 [\text{min}]}{60 [\text{min}]}$$

充放電時のロスを加味し、充電時のロス係数を ϵ_c 、放電時のロス係数を ϵ_d とする。なお、値はいずれも0.9である。充放電状態を表すバイナリ $\beta_{ev,t}$ を設けたため、この問題は混合整数計画となる。

(2) 需給バランス制約

$$P_t = D_t + \sum_{ev} (\rho_{ev,t} - \delta_{ev,t}) \quad (\forall t) \quad (13)$$

D_t はステップ t における建物の需要とする。建物の需要の一部はバスからの放電で賄われることもある。

2.9 計算のパターン

- Case 1：固定価格による電力契約の場合
- Case 2：市場連動価格による電力契約の場合

のそれぞれの場合について運用の最適化を行う。年度による変化を確認するため、2017年度から2022年度までについてそれぞれ計算を行った。なお、最適化は0時に行われるものとする。

3. 評価

3.1 それぞれのケースにおける運用の違い

まずは、それぞれのケースにおける運用の違いを、4日間の運用に着目して比較する。図9に、固定価格の場合と市場連動価格の場合のそれぞれの運用の様子を示す（日付は2020年9月1日から2020年9月4日までの4日間についてのものである）。上段が電力の内訳、下段が市場価格と各電気バスのSOCの推移をそれぞれ示す。また、それぞれについて左がCase 1 固定価格の場合で、右がCase 2 市場連動価格の場合を示している。図9の上段において、斜線になっている部分が電気バスを充電している部分である。また、青色が系統から仕入れてくる電力、緑色が電気バスの放電によって建物の需要を賄った分を表している。

Case 1 固定価格においては、どの時刻に電力を調達しても価格は一定のため、電気バスは昼休みのまとまった時間等に充電し、わざわざ施設の需要を賄うために放電を行うということはない。一方、Case 2 市場連動価格の場合、価格の安い早朝にも系統から電力を購入することで充電を行っていることがわかる。そして、価格の高い夕

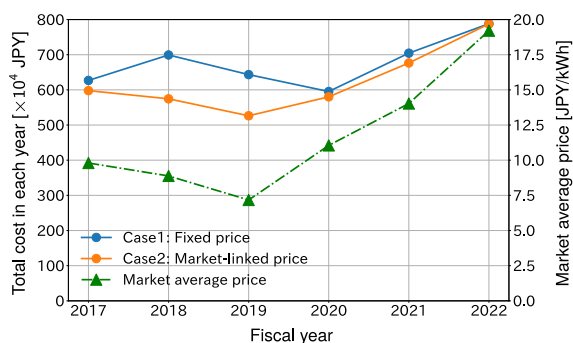


図 10 各契約パターンにおける需要家のコストの比較とその年の市場平均価格

方以降はなるべく系統から電力を買わないように、電気バスから放電していることがわかる。下段の SOC の推移と市場価格の様子を見るとわかる通り、Case 1 固定価格では運行に最低限必要な SOC の変化しかない（走行時の SOC の減少と充電時の SOC の上昇のみ）。Case 2 市場連動価格においては、市場の価格が安い時に SOC が大きく上昇し、逆に市場の価格が高い時に SOC が大きく減少していることがわかる。

このような結果から、市場連動価格にすることで効果的に需要家にデマンドレスポンスを促せることがわかる。ただし、SOC の変動が大きくなることで電池の寿命に影響が及ぶことも考えられる。その影響を踏まえた分析は今後の課題とする。

3.2 年間の需要家電力コストと小売事業者収益の比較

続いて、このシミュレーションを年別に一年ずつ動かし年別の比較を行う。それぞれの場合における需要家側の年別コストを図 10 に、小売事業者側の年別収益を図 11 に示す。また、図 10 と図 11 において、参考としてその年の平均市場価格も合わせて示す。

まず、コストや収益に影響を及ぼすと考えられる市場価格の動向について確認する。傾向として、2017 年度から 2019 年度は比較的市場が安価であった。一方、2020 年度以降については、市場の価格が上昇傾向にあるということがわかる。これを元に図 10 の需要家側のコスト推移を見ると、Case 1 固定価格と Case 2 市場連動価格のどちらも 2020 年以降は増加傾向にあるという大まかな推移は同じであることがわかる。ただし、Case 2 市場連動価格の方が、Case 1 固定価格による契約よりも電力コストが安い傾向にある。これは前述のデマンドレスポンスによって安い時間の電気を効果的に使うことができたことによるものだと考えられる。2021 年度以降は市場価格の上下のサイクルが 1 日単位以上の長周期になっておりバスでデマンドレスポンスができる周期を超えている。デマンドレスポンスは市場価格の

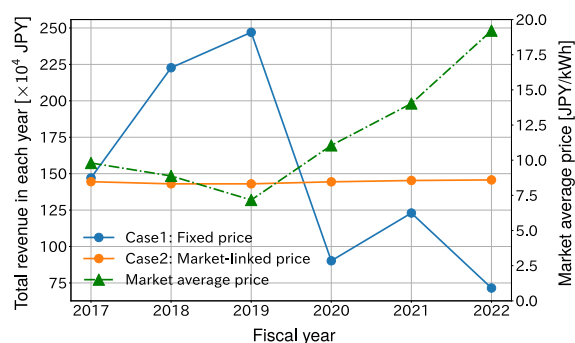


図 11 各契約パターンにおける小売事業者の収益の比較とその年の市場平均価格

日較差が大きい時に有利になるため、市場価格の日較差によっては事業の採算が合わない可能性がある。

また、図 11 に小売事業者側の収益の推移を示す。この図を見ると、Case 1 固定価格の場合は収益が大きく上下しているが、Case 2 市場連動価格の場合はほぼ横ばいで推移していることが分かる。これは、固定価格契約では市場価格が安くなった場合は大きく利鞘を取ることができるが、その反面市場価格が高くなったときには収益性が悪化することによるものだと考えられる。図 9 の左側のグラフのように、固定価格契約の場合、価格の高い時間に市場由来の電力を抑制できなかったこととも関わりが深いと考えられる。

以上の考察より、Case 1 固定価格においては、小売事業者のためにリスクプレミア（固定価格において、前年の市場平均価格に対しての 7 円/kWh のプラス分）があったが、そのようなプレミアは事業を安定化させる上ではあまり効果的ではなく、需要家と市場価格連動の契約を結ぶ方がより効果的であると言える。

年別の収益についてさらに注目すると、固定価格の場合、前年の平均価格をベースに価格を設定したため、平均価格が上昇傾向にある期間は、収益が悪化する傾向にあることがわかる。一方、価格が下降傾向にある期間は収益が改善している。しかし、次の年の平均価格がどうなるかについては固定価格を設定する際に見通すことは容易ではなく、市場価格連動にした方が収益性が見通しが良くなると言える。一方、単に価格体系を変えるだけでは必ずしも需要家に対してメリットをもたらすとは限らないが、電気バスのようなリソースを活用することで、需要家においてもコスト削減を達成できる可能性があるということが確認できる。

4. まとめと今後の展望

本論文では、電気バスをデマンドレスポンスに活用する場合の市場価格連動契約の有効性を検証した。結果として、市場価格連動契約にすることでデマンドレスポンスが適切に促進され、バス事業者の電力コストの削減や、小売事業

者の収益性の改善がなされた。

今後の展望として、電気バスと再生可能エネルギーのさらなる活用のため、電気バスが多数ある場合や、電気バスの充電拠点に再生可能エネルギーがある場合の自家消費最大化をする場合について電気バスの活用の有効性についての分析が望まれる。

特に、交通事業者の持つバスにおける電気バスの割合が今後増加してきた場合においては、電気バスの充電による電力需要増加分が、最大消費電力のピーク値にもたらす影響を無視することができなくなるため、同じ受電点内の他の建物や電力需要まで総括して、最大受電電力を制約条件として考慮する必要があると考える。また、電力市場価格自体には送配電の最大容量の情報が含まれていないこともあり、電力市場価格のみに追従するようなデマンドレスポンスでは、送配電システムの容量上限を満たさない可能性も存在する。

以上より、現実の需要データを用いたモデル化や同じ受電点内の他の建物や電力需要まで総括した最適化、契約電力の上限値を制約条件とした、あるいは契約電力の増加まで選択肢としたコスト削減の全体最適化、地域内の送配電の最大容量を考慮したデマンドレスポンスなどについては今後の課題とする。

謝辞

電気バスの運用の実情について、現地調査や意見交換に協力して下さった広島交通様に、この場をお借りしまして感謝の意を表します。

参考文献

- 1) International Energy Agency ; Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer (2021).
<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer> (アクセス日 2024.10.23)
- 2) 環境省 ; 脱炭素イノベーションによる地域循環共生圏構築事業 (2019).
https://rcespa.jp/wordpress/wp-content/uploads/H31_datsutanso-innov_setumeiponchie.pdf (アクセス日 2024.10.23)
- 3) Corchero, C. and Sanmarti, M. ; Vehicle-to-Everything (V2X): Benefits and Barriers, in 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM), (2018), pp.1-4.
- 4) 内閣官房 ; 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2021).
<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf> (アクセス日 2024.10.23)
- 5) 広島交通 ; 電気バス導入のお知らせ (2022).
<https://www.hiroko-group.co.jp/kotsu/evbus.html> (アクセス日 2024.10.23)
- 6) Energy Information Administration ; EIA Data Reveals California's Real and Growing Duck Curve (2017).
<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=32172> (アクセス日 2024.10.23)
- 7) Klinge Jacobsen, H. and Schröder, S. T. ; Curtailment of renewable generation: Economic optimality and incentives, *Energy Policy*, 1-49 (2012), pp.663-675.
- 8) Sarthak Mohanty, et al. ; Demand side management of electric vehicles in smart grids: A survey on strategies, challenges, modeling, and optimization, *Energy Reports*, 8 (2022).
- 9) Upadhaya, B., Feng, D., Zhou, Y., Gui, Q., Zhao, X., Wu, D. ; Optimal decision making model of battery energy storage-assisted electric vehicle charging station considering incentive demand response, 8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019), (2019), pp.1-8.
- 10) Zheng, Y., Yu, H., Shao, Z., Jian, L. ; Day-ahead bidding strategy for electric vehicle aggregator enabling multiple agent modes in uncertain electricity markets, *Applied Energy* 280-115977 (2020), pp.1-9.
- 11) X. Luo, X. Zhu, E. Lim and W. Kellerer ; Electric Vehicles Assisted Multi-Household Cooperative Demand Response Strategy, 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring), (2019), pp.1-5.
- 12) Elliott, M. and Kittner, N. ; Operational grid and environmental impacts for a V2G-enabled electric school bus fleet using DC fast chargers, *Sustainable Production and Consumption*, 30 (2022), pp.316-330.
- 13) 富澤 勇輝, 井原 雄人, 児玉 安広, 飯野 穰, 林 泰弘, 池田 欧世, 吉永 淳 ; バスの段階的な電動化を考慮した充電スケジュール最適化による PV 地産地消費能力の評価, *電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌)*, 142-2 (2022), pp.67-76.
- 14) BYD ; 小型電気 (EV) バス J6 (2023).
<https://byd.co.jp/products/j6/> (アクセス日 2024.10.23)
- 15) 日本卸電力市場 ; 取引市場データ (2023).
<https://www.jepx.jp/electricpower/market-data/spot/> (アクセス日 2024.10.23)