

Economic effects and policy challenges of integration of electric vehicles in smart grid

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-10-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 荒川, 潔 メールアドレス: 所属:
URL	https://otsuma.repo.nii.ac.jp/records/6576

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



電気自動車とスマートグリッドの接続の経済効果と政策課題

荒川 潔*

要 約

近年、地球温暖化や石油資源の枯渇への危惧などから、世界的に再生可能エネルギーの重要性が増しており、特に一般住宅にも設置できる太陽光発電の導入量は急激に伸びている。太陽光発電は環境によって発電量が大きく変動するため、電力の流れを供給側・需要側の双方から制御し効率化を図るスマートグリッドの開発・普及の促進が課題となっている。このとき、走行段階での排ガス量がゼロである電気自動車をスマートグリッドと接続して充電池を有効に活用すれば、再生可能エネルギーの効率的な利用を実現できる。本稿では先行研究を概観することで、太陽光発電や電気自動車の相互接続に関する経済的な問題と相互接続を促す制度設計のための政策課題を明らかにする。

1. はじめに

近年、地球温暖化や石油資源の枯渇への危惧などから、世界的に再生可能エネルギーの活用が課題となっている。特に企業レベルだけでなく一般住宅にも設置できる太陽光発電には固定価格買取制度などの優遇措置もあり、太陽光発電の導入量は急激に伸びている。政府は2030年度のエネルギーミックスで太陽光発電の割合を7%と推定しているが、現在はその半分程度の水準である。さらに、固定価格買取制度などで生じる国民負担や太陽光発電の認定取消し・失効などの問題があり、コスト効率的な導入拡大が期待されている。しかしながら、太陽光発電は環境によって発電量が大きく変動するため、電力の流れを供給側・需要側の双方から制御し最適化を図るスマートグリッド

(Smart Grid、以下SG)の開発・普及の促進が課題となっている。効率的な電力制御のためには蓄電設備が欠かせないが、高価な蓄電池を用いた大規模な蓄電施設の設置はコスト的に厳しい状況にある。このとき、電気自動車(Electric Vehicle、以下EV)をSGと接続するVehicle-to-Gridシステム(以下V2G)を構築すれば、消費電力の平準化により再生可能エネルギーの効率的な利用が可能となる。さらには走行段階での排ガス量がゼロであるEVの普及は地球温暖化防止の観点からも望ましい。しかしながら、EVに対しては税制上の優遇措置が講じられているものの、価格の高さや航続距離の短さなどが要因となり、販売台数のシェアは1%にも満たず、本格的な普及には至っていない。そのため、EVを効果的に普及させるとともに、それらを太陽光発電などの再生エ

*大妻女子大学 社会情報学部

エネルギーに効率的に接続させることが政策課題となっている。SGの技術的な問題については、経済産業省が横浜市などでSGの実証実験を行うなど、数多くの研究がなされている。しかしながら、V2G構築のための税制や料金体系などの制度設計に関する経済学的な分析はほとんどなされていない。EVと太陽光発電の接続については、経済産業省の「EV・PHVロードマップ検討会」が指摘するように、インセンティブのあり方を含むビジネスモデルの実証などの取り組みが必要な段階となっている。さらに、太陽光発電の固定価格買取制度などで生じる国民負担を可能な限り低下させるためにも、経済的インセンティブの有効活用による電力の地産地消の実現が求められている。

効率的なV2Gを実現するためには、自動車税制における太陽光発電と接続したEVに対する優遇措置だけでなく、V2Gの料金体系も自動車税制と整合的なものでなければならない。太陽光発電とEVの充電機能は親和性が高く、相乗効果が期待できる。Nienhueser and Qiu (2016) は、EVの所有者は再生可能エネルギーに対する最大支払い意思額が高いことを明らかにしている。そのため、EVの効果的な普及については、太陽光発電と接続した場合の税制や料金体系などの制度設計が強く影響すると考えられる。Wang et al. (2011) が明らかにしたように、V2Gは消費者負担を大幅に下げられる可能性を持つため、V2Gの導入を促進するための効率的な制度設計が求められている。しかしながら、EVの充電・給電機能をV2Gが利用することについてEVの所有者から理解を得る問題や、V2Gに接続することに起因するEVの充電電池の劣化などの問題などがあり、それらの解決は技術的な観点だけでは難しい。また、「EV・PHVロードマップ検討会」が指摘するように、共同住宅や職場での充電設備の設置が不足している状況にあるが、その克服には法制度の整備だけでは不十分である。つまり、最適なV2Gの実現のためには、発電・送配電・小売の各事業との効率的な相互接続だけでなく、太陽光発電やEVの導入とV2Gへの接続を促すための制度設計が必要である。しかしながら、太陽光発電とEVを効率的に接続するV2G構

築に関する制度面からの経済学的分析はほとんどなされておらず、それらの効率的な接続を可能とする税制や料金体系を明らかにする課題が残されている。

そのため、本稿では、先行研究を概観することで、太陽光発電やEVの相互接続に関する経済的な問題をまとめ、接続を促す制度設計のための政策課題を明らかにする。

本研究の構成は以下の通りである。2節では、EVの概略と、EVを電力グリッドに接続するための機能を説明する。3節では、EVと電力グリッドを接続する概念であるV2Gのコンセプトを説明する。4節では、V2Gを効率的に運用するための充電スキームについて説明する。5節では、V2Gに再生可能エネルギーを組み込む問題について議論する。6節では、V2Gの導入が経済に与える影響を議論する。7節では、V2Gの導入に関わる問題と政策課題を明らかにする。8節では結論を述べる。

2. EV

内燃機関自動車 (internal combustion engine vehicle、以下ICEV) は、ガソリンやディーゼル燃料の燃焼により生み出された機械的エネルギーを動力源として推進力を得る。一方、EVは電力をエネルギー源とし、電力モーターを動力源とする。電気モーターを動かす電力は、発電所から送電されたものやEVに搭載した発電機から発電したものをを用いることができる。一般的なEVは搭載した充電電池に電力を蓄え、その充電電池から供給される電力をエネルギー源とする。ほとんどのEVは、エネルギー密度が高いリチウムイオン電池をエネルギー貯蔵庫として利用している。しかしながら、リチウムイオン電池の充電は簡単ではなく、充電電池へのダメージを避けるためには細かい管理が必要となる。したがって、EVの開発を加速するためには、高度な充電技術の開発が欠かせない (Petit et al., 2016)。

EVへの充電は、それがサポートする電力の流れがunidirectional (電力の流れが充電器か

ら充電池への一方向のみの場合)か、それとも bidirectional (電力の流れが充電器と充電池の双方向の場合)がある (Yilmaz and Krein, 2013)。通常、unidirectional な充電器は、bidirectional なものと比べ、ハード的な要求があまりなく、シンプルな構造となっている。しかしながら、複雑な bidirectional な充電器を活用すれば、EV からグリッドに電力を戻すことができるため、エネルギーの有効活用につながる。

現在主流となっている EV は、充電池にコンセントから直接充電できるプラグイン機能を持った EV (plug-in EV; 以下 PEV) である。本稿ではプラグイン機能を持った EV を対象とし、充電池だけで走行する EV (battery EV、以下 BEV) と、内燃機関を搭載した EV であるプラグインハイブリッド車 (plug-in hybrid vehicle、以下 PHEV) に焦点を当てる。

BEV は利用する全てのエネルギーを電力網 (グリッド) から得た電力でまかない、その電力を EV に搭載する充電池に蓄えて利用する。典型的な BEV では、搭載した充電池から得た電力によって動力源の電気モーターを作動する。電力供給を管理するコントローラは減速エネルギーを利用して発電機で効率よく発電するというエネルギー回収ブレーキをサポートし、電力の有効活用に貢献することができる。BEV は ICEV と比べてエネルギー効率的である。一般的な ICEV は燃料効率が 15% から 18% であるのに対し、BEV はそれより 60% から 70% も効率的である。また、BEV は走行時に CO₂ などの排ガスを生じないため環境に優しいと考えられている。BEV と ICEV の排ガス量を比較する指標として、wells-to-wheels emissions が用いられる。この指標は、自動車の走行に必要なエネルギーや排ガスなどの合計を考慮したものであるが、多くの研究では、BEV は最も低い wells-to-wheels emission となることを示している。

走行費用や環境面でのメリットに注目される BEV ではあるが、BEV に搭載される充電池はとても高価であるため、ICEV に比べて BEV の購入価格はとても高いというデメリットがある。荒川 (2014) は BEV などの次世代自動車に対する

補助金政策の効果を議論している。さらには、充電池の寿命や安全性の問題も BEV の普及を妨げている要因の一つとなっている。Arakawa (2016) は、EV の効果的な普及のための補助金政策として、車両価格ではなく充電池容量に応じて補助金額を定めた方が効果的であることを明らかにしている。

ハイブリッド車 (hybrid electric vehicle、以下 HEV) は、内燃機関 (internal combustion engine、以下 ICE) による動力の効率化のために、小さな充電池からドライブトレインに電力を供給する。HEV の充電池への充電は、基本的にはエンジンによる発電機から行うが、ブレーキ時のエネルギーを回収することで得られる回生エネルギーも活用するのが一般的である。HEV は ICEV よりも燃料効率が良いものの、最終的には化石燃料で全ての動力を得ることになる。

これに対して PHEV は、HEV と同様のコンセプトの自動車であるが、より大きな充電池を備え、グリッドに接続し、グリッドからの電力で充電することができる。またより大きな充電池のおかげで、電力だけで長距離を走行することが可能となる。このことから、PHEV は BEV に近いタイプの自動車であると考えられる。

一般的に、PHEV は効率よく推進力を得るために電気モーターと ICE の両方を搭載し、利用可能性を高めている。この推進力を組み合わせたシステムにより、PHEV は電力走行の charge depleting (CD) モードとハイブリッド走行の charge sustaining (CS) モードの 2 つのモードで走行できる。CD モードで動かす場合、PHEV は用いる電力のほとんどを搭載した充電池から得る。もし充電池の状態 (state of charge、以下 SOC) が前もって決めたレベルまで使い果たされていたら、PHEV は CS モードに転換し、さらなる推進力を ICE システムから得ることになる。CS モードで走行していた場合、PHEV は両方の電力源を統合し、可能な限り効率化する。このように、PHEV は充電池のみに頼る BEV の欠点を補完する機能を搭載し、EV の可能性を拡げるタイプの自動車である。

3. V2G

EV 技術は環境や化石燃料の枯渇の問題に対する関心の高まりから社会的な重要性を増している。現在、イギリスやフランスでは将来的に ICEV の販売を禁止する方針が打ち出されるなど、今後の EV の開発と普及が課題となっている。EV の普及のためには、EV とグリッドを接続する技術である V2G の進化が不可欠である。V2G の管理者は利潤の最大化、排ガスの削減、グリッドの出力品質の改善などを目的として、EV とグリッドの間の情報交換を密に行うことで、EV の充電電池とグリッドの間の電力の流れを管理・調整する。V2G 技術では多くのサービスの提供することで多種多様な便益を実現することが可能となる。このような V2G の利点は、電力事業者だけでなく、EV 所有者にももたらされる。V2G 技術は家庭に対する不断の電力供給を可能とし、家庭での再生可能エネルギー活用のためのバックアップのエネルギー貯蔵庫ともなるからである。

しかし、大量の EV のグリッドへの接続は、EV の充電に際して多大な負担をグリッドにかけることになる。このような問題があるにもかかわらず、計画された大量の EV のグリッドへの接続は V2G の普及の可能性を広げることにもつながる。Kempton and Letendre (1997) は、不利な状況下であっても、V2G は利益を生み出すことができることを示した。そして、その利益を原資に EV 所有者にグリッドとの接続のインセンティブを与えることを提案している。Pecas (2011) は、大量の EV を適切な管理の下でグリッドと接続することで便益がもたらされることを明らかにした。Su et al. (2012) は、柔軟かつ計画的に接続された EV は動的な負荷となり潜在的なエネルギー源として活用できることを明らかにしている。

EV とグリッドの接続には新たな設備投資などの負担が生じるものの、電力に対して品質向上や効率化などの新たな価値をもたらすことができる。現在、多くの国々では EV の普及を刺激するために unidirectional V2G が導入されている。しかし、市場の形成と技術革新が進展すれば、将来

的に Bidirectional V2G が導入される可能性が高い。そして V2G の導入を成功させるには、EV とグリッドのシームレスな接続を実現するための規格制定も必要である (Gungor, 2011)。

3.1 Unidirectional V2G

Unidirectional V2G とは、EV の充電に際し、EV とグリッドの間の一方方向の電力の流れを調整する技術のことである。Unidirectional V2G は、SOC を管理する安価でシンプルなコントローラで実現でき、グリッドの運用に柔軟性と拡張性を与えることで、電力の有効利用が可能となる。Unidirectional V2G の導入には、EV 所有者と電力事業者の双方にとって参加のインセンティブをもたらす電力取引政策が必要である。Unidirectional V2G では、EV の充電中であっても、EV とグリッドと接続して負荷を柔軟にコントロールできる。その充電スキームでは、グリッドに接続した EV を充電する際、ピーク時の負荷の増大を避けたり、再生可能エネルギーの不確実性を低下させたりするなど、高度な処理能力が必要とされる。Darabi (2011) は、EV をグリッドに接続すると同時に充電を開始するなどの管理されない充電スキームは、グリッドに過度の負担をかけることを明らかにしている。したがって、EV の充電では、グリッド全体の状況を考慮した適切な充電スキームが重要となる。EV 所有者の参加を促すための電力取引政策では、EV の充電をオフピーク時に行ったり、ピーク時に EV への充電を制限したりすることが必要であるが、そのためには EV 所有者に対して利益を保証する仕組みの導入が必要である。

充電スキームの策定には、最適化手法を用いることが一般的である。例えば、Deilamiet al. (2011) は、PHEV の充電をエネルギー生成やそれに伴うグリッドでの損失に関する総コストの最小化という目的で調整されるアルゴリズムを開発している。Fan (2011) は、EV の利用者が好みに合わせて SOC を設定できる EV の分散された充電方法を提案している。彼は混雑料金的一种を用いて料金情報を提供することで利用者の需要を制限でき、ネットワーク負荷のバランスにとっても有益である

ことを示した。そして、負荷の平準化のための負担について、適切に料金を設定することによって、グリッド管理者からEV所有者に負担をシフトできることを明らかにした。しかしながら、Drude et al. (2014) は、大量のEVがV2Gに接続されていると、料金情報の提供はシステムを不安定にする場合があることを明らかにしている。彼らは、電力取引政策においては、グリッド管理者とEV所有者との利害関係を調整する必要性を示している。

この unidirectional V2G サービスはグリッドに対して提供できるアンシラリー・サービスの能力に限界がある。より効果的なピークロード削減などのサービスは bidirectional V2G でのみ実現できる。

3.2 Bidirectional V2G

Bidirectional V2G とは、多くの便益を実現するために、EV とグリッドの間での電力の双方向の流れをコントロールする技術のことを指す。Bidirectional V2G を活用することで、電力システムの運用を改善でき、その運用に大きな柔軟性と可能性をもたらすことになる。

V2G に接続できるEVには、電力を蓄え、そしてグリッドに電力を戻すことができる機能が必要である。Guo (2011) は、グリッド上での高度な双方向の情報交換により充電スキームを最適化できることを示している。Ying et al. (2015) は、充電電池とグリッドの双方をコントロールするシステムを提案し、そのシステムの妥当性をシミュレーションによって検証している。また、Kavousi-Fard et al. (2015) は、PHEV をコントロールすることで、ネットワーク費用の最小化を図る最適手法を提案している。Fernandez (2011) は、適切な充電スキームの下では、設備の更新費用を70%程度削減できるとしている。

Bidirectional V2G では、ピークロードの削減や負荷を一定化するサービスが可能である。これらのサービスは、オフピーク時にEVの充電を行い、またピーク時にEVの電力をグリッドに戻すことで実現できる。このサービスの目的は、負荷を平

準化するためにロードレベリングやピークシェーピングを実施することである。ピーク電力は短時間であるため、そのための設備投資は過大となる傾向にある。例えば、Joskow (2012) は、アメリカでは1.1%のピーク需要のために10%から15%の設備投資が必要であるとしている。そのため、そのピーク需要をグリッドに接続したEVからの電力でまかなうことはグリッド全体の経済性の向上につながる。つまり、ピーク需要の最中にEVからグリッドに電力を供給することで、ピーク負荷を削り落とすことができ、このことで設備投資の削減にもつながるのである。ピーク需要時に電力システムに対する負荷の圧力を軽減するためには、EV所有者に対してV2Gへの接続による利益をもたらす必要がある。また、オフピーク時には、EV所有者は低い料金でEVを充電することができれば、EV所有者のV2G参加のインセンティブが高まる。さらには、充電電池とグリッドの接続の機能性を高めることで、EV所有者とグリッドの双方に利益をもたらすことができる (Fan et al., 2015)。このようにEVをグリッドに接続するに際し、EV所有者にどのように便益を与えるのがV2Gを実現する鍵となっている。

V2Gを導入してピークロードシェーピングと負荷の平準化を実現できるかどうかは、電力システムに接続されている利用可能なEVの充電電池容量も重要な要因となる。EVのエネルギー貯蔵を維持するためには、EVのグリッドへの接続の可能性、EV充電電池に蓄えられた利用可能な電力、EVの充電電池の給電能力などの多くの要因を考慮する必要がある。それらの制約条件を考慮することで、負荷を平準化するようV2Gをコントロールし、電力事業者とEV所有者の双方への便益を最適化することができる。

さらに、bidirectional V2Gは再生可能エネルギーをグリッドとの接続を効果的なものにもできる。風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーによる発電では、これらの再生可能エネルギーが気象条件に強く影響されるので予測が困難である。Bidirectional V2Gは、EVをエネルギーのバッファ貯蔵や供給源として活用すること

で、再生可能エネルギーが抱える断続性などの問題を解決するために利用することができる。この再生可能エネルギーとEVとの接続については、5節で詳細に議論する。

4. V2G と充電スキーム

V2Gでは、EVへの充電とグリッドへの給電はEV所有者の費用対効果を考慮してコントロールされる必要がある。EVの充電はグリッドを通じて外部のコントロールによって充電できる。スマートチャージと呼ばれる充電と給電を組み合わせて電力の有効活用を図る技術では、電力が最も安いときや電力需要が最も小さいとき、そして電力の余裕があるときなど、最も便益をもたらすときに充電するという戦略が中心となっている。多くのEV所有者が必要とする条件は、朝に完全に充電が完了していることである。このとき、充電スキームは2つに大別できる。1つ目は、EVをグリッドに接続したとたんに充電を開始することである。2つ目は、スマートチャージで中心となるものであり、接続して数時間後に充電が開始するなど、充電を遅らせるスキームである。例えば、夜間充電スキームでは、電力価格が最も安くなる夜間に充電を行い、利用する朝までには充電を完了させる。しかし、EVは移動先での充電を行う場合もあるため、充電スキームの策定は単純ではない。Jian et al. (2015)は、そのようなEVの充電場所の不確実性を考慮し、電力負荷の変動を吸収する充電スキームを提案している。

大量のEVがグリッドに接続されている状況でピークロードシェーピングや負荷の変動の減少するためには、EVの最適な充電・給電のスキームが必要である。Mets et al. (2011)は、V2Gがない場合であっても、充電をコントロールすることは、コントロールしないよりも確実にピーク負荷を減少させることを示している。Venayagamoorthy et al. (2009)は、電力料金をベースにグリッドとの取引に関する利益を最大化するために、電力出力レベルと充電と給電の時間を詳細にスケジュールする手法を開発している。Weiller (2011)は、時間差

を考慮した充電管理の手法を提案し、ピーク時の負荷を軽減できることを示した。

大量のEVがグリッドに接続されると、グリッドのパフォーマンス、効率性、そして必要な設備容量に影響を与える (Green et al., 2011)。Zhong et al. (2014)は、EVが大量に接続された場合であっても、それらのEVを調整することでシステムの安定化を実現できることを明らかにしている。ドイツを事例としたHartmann et al. (2011)の研究によると、充電を管理しない100万台のEVのグリッドへの接続の影響はわずかであるが、4,200万台の全てのICEVをEVに置き換えた場合、ピーク時の負荷が2倍になる。このことは、ICEVを禁止して全面的にEV社会に進むという方針には、社会インフラ整備という膨大な費用が必要となることを示唆している。

しかしながら、システム設計次第ではインフラ整備の費用を削減できるとする研究結果も得られている。例えば、Hadley (2006)は、単純な充電スキームではピーク負荷は増大し、発電と送電の設備に対して追加的な投資を必要とすることを明らかにしている。一方、Kristofferson et al. (2011)は、スマートチャージの場合、EVは負担全体を平準化するため、ベースロード電源を有効活用し、容量増大の追加的な投資を必要としないことを明らかにしている。Hajimiragha et al. (2011)は、カナダのオンタリオ州を事例とし、500,000台のPHEVをグリッドに影響を与えずに導入できると推計している。Kintner-Meyer et al. (2007)は、アメリカを事例として、当時のグリッド容量では73%の乗用車がPHEVに転換できることを明らかにしている。また、Hartmann et al. (2011)は、100万台のEVをグリッドの電力貯蔵庫として活用することで、ピーク時の負荷を16%減少できることを示した。このように、EV社会到来のためには、V2Gのシステム設計が大きな鍵を握っていることがわかる。

5. V2G と再生可能エネルギー

発電所と自動車はCO₂の大きな排出源であり、

環境を守るためには、効率的な再生可能エネルギーの活用を実現し、CO₂の排出を削減していくことが不可欠である。しかしながら、再生可能エネルギーの発電は環境要因に強く影響されるため、予測不可能で首尾一貫しない。このような発電能力は、再生可能エネルギーの大きな欠点となっている。

EVと再生可能エネルギーを既存のグリッド上で接続するシステムは、電力システムの効率化を改善する潜在的なインパクトを持つ。つまり、グリッドとの接続により、再生可能エネルギーを組み込んだ場合の発電量の予測不可能性はかなりの程度軽減できるのである。例えば、再生可能エネルギーの発電の断続性についての問題は、大量のEVをエネルギーのバックアップや貯蔵庫として活用することで解決できる。大量のEVは、再生可能エネルギーの発電が不十分なときに、エネルギーのバックアップ施設として必要な電力を供給できる。一方、再生可能エネルギーの発電が過剰な場合、大量のEVをエネルギーの貯蔵庫としてそれらを吸収することができる。このとき、グリッドに接続されたEV充電機の容量が増えるごとに、より多くの再生可能エネルギーを導入することができる。したがって、EVとグリッドを接続することで、再生可能エネルギーを有効活用でき、グリッドをより環境に適したものとし、また持続的なものにするのであり得るのである。

一般に、化石燃料による発電の割合が大きい場合であっても、内燃機関と比較して電力モーターは高効率であるので、EVはCO₂の排出を減少させることが明らかとなっている。しかしながら、Li et al. (2016) が明らかにしたように、CO₂排出量が多い石炭などでの発電の割合が高い場合、管理された充電スキームはCO₂排出量を増やす可能性が高まる。したがって、V2Gの導入に際しては、再生可能エネルギーなどの環境に負担を与えない発電の導入も合わせて計画する必要がある。

これまでに多くの最適化手法が提案されている。例えば、Ghofrani et al. (2014) は、V2Gの容量を最適に活用し、風力発電による発電の変動を最小化する最適化手法を提案している。この提案

されたV2Gを最適化するアルゴリズムでは、電力事業者とEV所有者の両者の利益とインセンティブが最大化されている。また、Fathabadi (2015) は、従来の発電所をグリッドに接続した場合に電力損失を最小化できるが、再生可能エネルギーとV2Gを接続した場合に発電コストを最小化できることを明らかにした。

再生可能エネルギーの中でも、近年、太陽光発電に注目が集まっている。太陽光発電の最大の特徴は至る所で発電できることである。このことは、発電とEVの利用を直接統合することよりも効率的な運用の可能性を生み出す。つまり、EVと太陽光発電をグリッド上で接続することで、家庭や駐車場などの小規模システムから、配電ネットワークなどの大規模システムまで利用できることになる。最近の研究では、EVの充電の多くは自宅で行われていることがわかっているが、将来的には勤務地や公共の駐車場での充電が主流となると予測されている (Su, 2013)。そのような場合、分散化されたグリッドの構築が必要となる (Joskow, 2012)。

El-Zonkoly (2014) は、再生可能エネルギーのためのV2G設置のサイズと場所の最適解を探すための複数目的の最適化アルゴリズムを開発し、再生可能エネルギーを最大に活用するためのEVの駐車場のサイズと場所の最適値を求めている。このアルゴリズムによって、最小のエネルギー費用を実現するV2Gシステムの場所とサイズの最適解を求めることができる。

Birnie (2009) は、経済性と排ガスの観点から駐車場に太陽光発電を設置することを提案し、通勤の自動車に対して日中に充電させることが望ましいことを明らかにしている。Tulpule et al. (2013) は、勤務先の駐車場での太陽光発電による充電スキームを分析している。彼らは、充電スキームは駐車場システムの費用回収期間にはわずかな影響しか与えないが、通常の充電ステーションと比べて排ガスを90%も減少できることを示した。Neumann et al. (2012) は、大規模な駐車場での太陽光発電による充電を分析し、提案するシステムでは都市の乗用車のエネルギー需要の15%から

40%を太陽光発電でまかなうことができることを明らかにした。

このように先行研究のほとんどはEVと太陽光発電の組み合わせは便益をもたらすことを示している。環境面では、EVと太陽光発電の両者は化石燃料の利用を減少させ、また排ガスを生じないため、環境に優しい。経済面では、EVと太陽光発電の接続を適切に管理することで、電力事業者とEV所有者の双方に利益をもたらす。技術面では、EVは太陽光発電が過剰に発電する場合に充電し、太陽光発電の発電量が低下した場合に給電することで、システム全体の経済性を向上できるのである。

6. V2Gが経済に与える影響

EVが経済に与える影響は、充電電池の技術革新と生産技術の進化によって改善すると期待される。現在、BEVの購入にはPHEVよりも費用がかかり、その両者ともICEVよりも費用がかかる。しかしながら、EVのモーターは高効率であるので、EVの走行に関する費用はICEVよりも安くすむ。Thiel et al. (2010)は、より安価なICEVと比較し、BEVの回収期間を20年であるが、2030年までには5年を下回ると予測している。つまり、将来的には、技術革新によりEVとICEVの費用差は縮小するのである。スクールバスを分析したNoel and McCormack (2014)は、運用の5年後にV2Gに接続したEVがもたらす利益はディーゼル車を上回ることを明らかにしている。

V2Gが実現する利益については、現段階では関係者を参加させるには難しいレベルしかもたらさないと考えられる。さらには、Shirazi et al. (2015)が明らかにしたように、寒冷地における充電電池の性能などの環境要因を考慮した場合、V2Gに参加したEVはディーゼルエンジン車よりもコストが増大することがある。そのため、EVとV2Gサービスの普及を進めるためには、消費者と企業の両者をそれらの市場への参加を促すとともに、地域の環境要因の考慮が不可欠であることがわかる。また、Zhao et al. (2016)はトラック輸送を分析し、

ディーゼル車からV2Gに接続されたEVを導入することで、追加的な収入の増大をもたらすことを明らかにしている。このことは、走行距離や充電電池容量などによって、収益構造が大きく異なることを意味している。

EVがグリッドに接続されると、充電のために必要な電力が追加的な負荷となる。このような大量の追加的な電力負荷に対して、発電のための燃料の増大に伴い、システム費用も増大する(Talebizadeh et al., 2014)。さらには、この電力を供給する際、電力の伝送ロスも生じる。しかし、それらの問題は充電を管理することで改善できる(Lyon et al., 2012)。そして、充電を管理することで、システム費用を最大60%も削減することができる(Weis et al., 2014)。したがって、V2G導入による負担に関しては、ハード的な対策だけでなく、充電スキームの最適化などの運用上の対策が鍵を握ることがわかる。

7. V2Gの課題

V2Gの実現の鍵となるBidirectional V2Gの導入には多くの問題が立ちだかる。まず、前節でも明らかにした電力システムの更新に必要な多額の投資費用の問題である。V2Gシステムに参加するEVにはbidirectionalな充電設備が必要であるが、複雑なbidirectionalな充電は、追加の設備投資を必要とする。またV2Gの導入は、頻繁な充電と放電のサイクルを必要とし、そのプロセスはより大きな電力の変換損失につながる可能性を含んでいる。大量のEVの充電や放電のプロセスに対する複数のエネルギー変換は電力システムに深刻なエネルギー損失をもたらす可能性が高い。このように、電力の有効活用という意味ではV2Gには大きな期待がかかるものの、それを実現するためにはグリッドなどのインフラ整備が不可欠である。そのため、EVや太陽光発電の普及政策には、インフラ整備の費用を誰がどのように負担するかという費用面での制度設計が必要である。荒川(2015)は、EVの効果的な普及のためには、購入に対する補助金よりも充電インフラ整備の方が

重要であることを指摘している。また Tolga et al. (2016) によると、バスなどの大型の充電電池を搭載する EV を大量に V2G に接続することは、環境面でのメリットが大きい。このことは、インフラ整備の公共負担の妥当性を示唆している。

さらに V2G の普及を図るには、消費者の時間上の選択についての理解が欠かせない。V2G から得られる利益は将来のことであるため、EV 所有者が将来の価値を現在のものよりも低く評価するのであれば、その EV 所有者は将来にわたって生じる利益に対する反応が敏感でない。そのため、将来的に利益をもたらす V2G であっても、その普及が望ましい水準よりも進まない状況となる。この状況はエネルギーのパラドックス (Jaffe and Stavins, 1994) と呼ばれる。例えば、Allcott and Wozny (2014) や Grigolon et al. (2014) は、アメリカや欧州を事例として、自動車市場においてエネルギーのパラドックスが生じていることを明らかにしている。この場合に環境対応車を普及させるためには、近視眼的な消費者に対して購入段階での補助金を活用することが重要となるのである。しかしながら、日本を事例とした Arakawa (2017) の研究によると、軽自動車の優遇税制の影響が強いこともあり、日本はエネルギーのパラドックスの状況にないことを明らかにしている。この場合には、購入後の優遇策が環境対応車の普及に効果的であることになる。このように、エネルギーのパラドックスが生じているかどうかで、インセンティブを購入段階か購入後のどちらで与えるのが望ましいかが異なることがわかる。V2G に対する投資は長期間にわたるため、この観点からの分析も今後の必要となるだろう。

次に、bidirectional V2G の導入に必要な頻繁な充電と給電のサイクルによる充電電池の劣化の問題である。充電電池のセルは充電電池の充電と放電のサイクルの中で徐々に劣化する。そのため、EV の充電電池を V2G で利用すると、充電と放電のサイクルが増加し、充電電池の劣化を加速させる。Lunz et al. (2012) は、充電電池の経済的な寿命を改善するために、充電電池の性能や寿命を管理すべきであると示している。Peterson et al. (2010) は、経済的や技

術的な要因を研究することで V2G の導入の可能性を議論し、急速な充電と放電のサイクルはより遅いサイクルよりも充電電池をより劣化させることを明らかにしている。Guenther et al. (2013) は、EV と V2G との接続は充電電池を劣化させるが、適切な充電スキームの下では寿命を延ばせることを示した。Hill et al. (2012) は、V2G がビジネスとして成立するためには、V2G に接続した場合の EV の充電電池の劣化の考慮が不可欠であると主張している。Bishop et al. (2013) は、充電電池の劣化を避けるためには、充電電池容量の縮小化や V2G との接続時間の短縮化が必要であり、V2G 接続のデメリットを避けるためには、定期的な充電電池の交換が望ましいことを明らかにしている。このように、充電電池の健康状態は V2G 技術を導入する上で考慮されなければならない。V2G を効率化する計画においては、EV の充電電池の過剰な利用を避けるよう配慮される必要がある。金銭的インセンティブの要因と充電電池の技術的な要因のバランスは、電力事業者と EV 所有者の利益を最適化するのに不可欠である。

最後は、社会的な壁の問題であり、具体的には bidirectional V2G の導入に対する心理的な負担の問題となる。Sovacool and Hirsh (2009) が明らかにしたように、社会技術的な障壁は、社会や文化、ビジネス、そして政治などの領域と密接な関係があるため、克服は容易ではないと考えられる。依田ら (2017) が SG を事例とした研究でも明らかにしているように、情報摩擦や心理的慣性などの現状維持バイアスは、社会的に望ましい行動を引き出す障害となる。さらには、多数の EV 所有者の参加は V2G 導入のために欠かせない条件であるが、EV 所有者は V2G 参加のデメリットに注目し、参加を躊躇する可能性が高い。なぜなら、緊急時や予測できない移動のために EV に十分な量の充電を確保したいと思うのが一般的だと考えられるからである。また、V2G 技術は EV の充電電池をグリッド上で共有することになるので、自分の知らないところで EV が利用されることに対する不安が生じると考えられる。さらには、充電設備の不足は、EV 利用自体を不安にさせるとともに、

V2G との接続の利点を享受できないため、V2G の普及をさらに阻む要因となる。そのような不安に対しては、充電電池の管理を徹底することである程度克服できると考えられる。Weiller and Neely (2014) は、Vehicle-to-Home システムなどの EV と家庭内でのグリッドとの接続は近い将来実現するが、V2G などの EV と規模の大きいグリッドとの接続は、社会的な壁の存在により、導入には時間がかかるとしている。V2G 導入のための社会的な障壁を低下させるためには、消費者の心理負担を考慮して計画された EV の充電ネットワークが必要である。

このように様々な障壁が V2G 技術を社会的に受け入れることを阻んでおり、V2G の普及を図るには挑戦的な取り組みが必要となる。EV の参加を促すには、V2G に適切なエネルギー管理戦略を組み込み、EV 所有者と電力事業者に適切なインセンティブを与える政策が必須となる。

8. 結論

本稿では、先行研究を概観し、EV とグリッドとの接続や太陽光発電などの再生可能エネルギーの有効活用に関する経済的な問題をまとめ、接続を促す制度設計のための政策課題とは何かを分析した。その結果、V2G を導入することで、電力グリッドに多くの利点と柔軟性を与えることがわかった。しかしながら、V2G の経済的な効果について、費用対効果の観点からの分析が必要であることが明らかとなった。なぜなら、高価な EV は購入者の負担を増すだけでなく、EV の負荷が高まることで電力グリッドには発電容量の増大に伴う設備投資が必要となるからである。しかしながら、充電を管理し、電力の取引を促し、様々な電力料金を採用することで、EV とグリッドの接続は電力事業者と EV 所有者の双方に便益をもたらす可能性が高まることがわかった。

本稿で見たように、V2G は完成されていない新しい技術である。V2G の普及のためには、多くの経済的、技術的、社会的な挑戦が必要であることが本稿の分析で明らかとなった。そして V2G を実

現するためには、関係者全てのインセンティブのあり方を含むビジネスモデルの実証などの取り組みが必要である。また、EV とグリッドを効率的に接続し、再生可能エネルギーを効果的に活用するためには、グリッドを社会インフラとして捉え、必要となる膨大な費用をどのように負担するのが鍵となることも明らかとなった。このような電力を効率的に活用する V2G 実現のために、経済理論の構築と政策の提言、そして政策効果の実証的解明を行うことが今後の課題である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金（研究課題番号 15K03453）の助成を受けている。

参考文献

- Allcott, H., Wozny, N. (2014) Gasoline Prices, Fuel Economy, and the Energy Paradox, *Review of Economics and Statistics*, vol. 96, pp. 779-795.
- Arakawa, K. (2017) Consumer Valuation of Future Costs versus Purchase Prices: A Study of Japan's Auto Market, mimeo.
- Arakawa, K. (2016) Comparing regulation and fiscal incentives for the promotion of electric vehicles, *Studied in Applied Economics*, 10, 19-39.
- Birnie, D. (2009) Solar-to-vehicle (S2V) systems for powering commuters of the future, *Journal of Power Sources*, 186, 539-42.
- Bishop, J. D. K., C. J. Axon, D. Bonilla, M. Tran, D. Banister, M. D. McCulloch (2013) Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV, *Applied Energy*, 111, 206-218.
- Darabi, Z, M. Ferdowsi (2011) Aggregated impact of plug-in hybrid electric vehicles on electricity demand profile, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(4), 501-8.

- Deilami, S, A. S. Masoum, P. S. Moses, M. A. S. Masoum (2011) Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(3), 456-67.
- Drude, L. J. Pereira, C. Luiz, R. Rütther (2014) Photovoltaics (PV) and electric vehicle-to-grid (V2G) strategies for peak demand reduction in urban regions in Brazil in a smart grid environment, *Renewable Energy*, 68, 443-451.
- El-Zonkoly, A. (2014) Intelligent energy management of optimally located renewable energy systems incorporating PHEV, *Energy Conversion and Management*, 84, 427-35.
- Fan, Z. (2011) Distributed charging of PHEVs in a smart grid, smart grid communications, *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 255-260.
- Fan, Y., W. Zhu, Z. Xue, L. Zhang, Z. Zou (2015) A Multi-Function Conversion Technique for Vehicle-to-Grid Applications, *Energies*, 8, 1-16.
- Fathabadi, H. (2015) Utilization of electric vehicles and renewable energy sources used as distributed generators for improving characteristics of electric power distribution systems, *Energy*, 90, 1100-1110.
- Fernandez, L. P., T. G. S. Roman, R. Cossent, C. M. Domingo, P. Frias (2011) Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), 206-13.
- Ghofrani, M, A. Arabali, M. Etezadi-Amoli, M. S. Fadali (2014) Smart scheduling and cost-benefit analysis of grid-enabled electric vehicles for wind power integration, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(5), 2306-13.
- Green, R. C., L. Wang, M. Alam (2011) The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: are view and outlook, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 544-53.
- Grigolon, L., Reynaert, M., and Verboven, F., (2014) Consumer valuation of fuel costs and the effectiveness of tax policy: Evidence from the European car market, *CEPR Discussion Papers* 10301.
- Guenther, C., B. Schott, W. Hennings, P. Waldowski, M. A. Danzer (2013) Model-based investigation of electric vehicle battery aging by means of vehicle-to-grid scenario simulations, *Journal of Power Sources*, 239, 604-10.
- Gungor, V. C., D. Sahin, T. Kocak (2011) Smart grid technologies: communication technologies and standards, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4), 529-39.
- Guo, Q., Y. Wang, H. Sun, Z. Li, S. Xin, B. Zhang (2012) Factor Analysis of the aggregated electric vehicle load based on data mining, *Energies*, 5, 2053-70.
- Hajimiragha, A., C. Cañizares, M. Fowler, S. Moazeni, A. Elkamel (2011) A robust optimization approach for planning the transition to plug-in hybrid electric vehicles, *IEEE Transactions on Power Systems*, 26, 2264-74.
- Hill, D. M., A.S. Agarwal, F. Ayello (2012) Fleet operator risks for using fleets for V2G regulation, *Energy Policy*, 41, 221-231.
- Jaffe, A., and Stavins, R. (1994) "The Energy Paradox and the Diffusion of Conservation Technology," *Resource and Energy Economics*, vol. 16, pp. 91-122.
- Jian, L., Y. Zheng, X. Xiao, C. C. Chan (2015) Optimal scheduling for vehicle-to-grid operation with stochastic connection of plug-in electric vehicles to smart grid, *Applied Energy*, 146, 150-161.
- Joskow, P. L. (2012) Creating a Smarter U.S. Electricity Grid, *Journal of Economic Perspectives*, 26, 29-48.
- Kavousi-Fard, A., A. Abbasi, M.-A. Rostami, A.

- Khosravi (2015) Optimal distribution feeder reconfiguration for increasing the penetration of plug-in electric vehicles and minimizing network costs, *Energy*, 93, 1693-1703.
- Kempton, W., S. Letendre (1997) Electric vehicles as a new power source for electric utilities. *Transportation Research Part D*, 2, 157-75.
- Kintner-Meyer, M., K. Scheider, R. Pratt (2007) *Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids part 1: technical analysis*, Richland, WA, Pacific Northwest National Laboratory.
- Kristofferson, T., K. Capion, P. Meibom (2011) Optimal charging of electric drive vehicles in a market environment, *Applied Energy*, 88, 1940-8.
- Li, Y., C. Davis, Z. Lukszo, M. Weijnen (2016) Electric vehicle charging in China's power system: Energy, economic and environmental trade-offs and policy implications, *Applied Energy*, 173, 535-554.
- Lunz, B., Z. Yan, J. Gerschler, D. Sauer (2012) Influence of plug-in hybrid electric vehicle charging strategies on charging and battery degradation costs, *Energy Policy*, 46, 511-9.
- Lyon, T. P., M. Michelin, A. Jongejan, T. Leahy (2012) Is smart charging policy for electric vehicles worthwhile? *Energy Policy*, 41, 259-68.
- Mets, K., T. Verschueren, F. DeTurck, C. Develder (2011) Exploiting V2G to optimize residential energy consumption with electrical vehicle (dis)charging, *2011 IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation*, 7-12.
- Neumann, H., D. Schär, F. Baumgartner (2012) The potential of photovoltaic carports to cover the energy demand of road passenger transport, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20, 639-49.
- Nienhueser, I. A., Y. Qiu (2016) Economic and environmental impacts of providing renewable energy for electric vehicle charging – A choice experiment study, *Applied Energy*, 180, 256-268.
- Noel, L., R. McCormack (2014) A cost benefit analysis of a V2G-capable electric school bus compared to a traditional diesel school bus, *Applied Energy*, 126, 246-255.
- Pecas, L. J. A., F. J. Soares, P. M. R. Almeida (2011) Integration of electric vehicles in the electric power system, *Proceedings of the IEEE*, 99(1), 168-83.
- Peterson, S. B., J. Apt, J. F. Whitacre (2010) Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization, *Journal of Power Sources*, 195 (8), 2385-92.
- Petit, M., E. Prada, V. Sauvart-Moynot (2016) Development of an empirical aging model for Li-ion batteries and application to assess the impact of Vehicle-to-Grid strategies on battery lifetime, *Applied Energy*, 172, 398-407.
- Shirazi, Y., E. Carr, L. Knapp (2015) A cost-benefit analysis of alternatively fueled buses with special considerations for V2G technology, *Energy Policy*, 87, 591-603.
- Sovacool, B. K., R. F. Hirsh (2009) Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition, *Energy Policy*, 37, 1095-1103.
- Su, W. (2013) *Smart grid operations integrated with plug-in electric vehicles and renewable energy resources* [Ph.D.dissertation], Department of Electrical and Computer Engineering, North Carolina State University.
- Su, W., H. Rahimi-Eichi, W. Zeng, M.-Y. Chow (2012) A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8 (1), 1-10.
- Talebizadeh, E., M. Rashidinejad, A. Abdollahi (2014) Evaluation of plug-in electric vehicles impact on cost-based unit commitment, *Journal*

- of Power Sources*, 248, 545-52.
- Thiel, C., A. Perojo, A. Mercier (2010) Cost and CO2 aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios, *Energy Policy*, 38, 7142-51.
- Tolga E., M. Noori, Y. Zhao, O. Tatari (2016) On the Front Lines of a Sustainable Transportation Fleet: Applications of Vehicle-to-Grid Technology for Transit and School Buses, *Energies*, 9, 1-22.
- Tulpule, P. J., V. Marano, S. Yurkovich, G. Rizzoni (2013) Economic and environmental impacts of a PV powered workplace parking garage charging station, *Applied Energy*, 108, 323-32.
- Venayagamoorthy, G. K., P. Mitra, K. Corzine, C. Huston (2009) Real-time modeling of distributed plug-in vehicles for V2G transactions, *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 3937-3941.
- Weiller, C. (2011) Plug-in hybrid electric vehicle impacts on hourly electricity demand in the United States, *Energy Policy*, 39(6), 3766-78.
- Weiller, C., A. Neely (2014) Using electric vehicles for energy services: Industry perspectives, *Energy*, 77, 194-200.
- Weis, A., P. Jaramillo, J. Michalek (2014) Estimating the potential of controlled plug-in hybrid electric vehicle charging to reduce operational and capacity expansion costs for electric power systems with high wind penetration, *Applied Energy*, 115, 190-204.
- Yilmaz, M., P. T. Krein (2013) Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28, 2151-69.
- Zhao, Y., M. Noori, O. Tatari (2016) Vehicle to Grid regulation services of electric delivery trucks: Economic and environmental benefit analysis, *Applied Energy*, 170, 161-175.
- Zhong, J., L. He, C. Li, Y. Cao, J. Wang, B. Fang, L. Zeng, G. Xiao (2014) Coordinated control for large-scale EV charging facilities and energy storage devices participating in frequency regulation, *Applied Energy*, 123, 253-262.
- EV・PHV ロードマップ検討会 (2016) 『EV・PHV ロードマップ検討会 報告書』 経済産業省.
- 荒川 潔 (2015) 「電気自動車普及のための補助金政策と充電インフラ整備」『社会情報学研究』 第24巻, 1-11.
- 荒川 潔 (2014) 「次世代自動車の普及促進のための規制と財政的インセンティブ政策」『社会情報学研究』 第23巻, 1-13.
- 依田高典・田中誠・伊藤公一朗 (2017) 『スマートグリッド・エコノミクス』 有斐閣.
-

Economic effects and policy challenges of integration of electric vehicles in smart grid

KIYOSHI ARAKAWA

Faculty of Social Information Studies, Otsuma Women's University

Abstract

In recent years, because of concerns over the depletion of fossil resources and global warming, the introduction of renewable energy has become a global challenge. Especially, the introduction of photovoltaic power generation systems that can be installed in a general household is rapidly increased. Because the generation quantity of photovoltaic power generation system is fluctuated by environment, it is important to develop and spread smart grid that allows efficient transmission of electricity by matching energy supply and demand. Interconnecting of electric vehicles which emits zero exhaust gases on the smart grid allows bidirectional energy exchange between battery energies and the smart grid, which realizes effective utilization of renewable energy. This paper reviews the economic effects of interconnection of electric vehicles and the smart grid, and presents policy challenges of designing systems to encourage them to interconnect.

Key Words (キーワード)

Electric vehicles (電気自動車), smart grid (スマートグリッド), Vehicle-to-grid, renewable energy (再生可能エネルギー)