

P2G と P2H を活用した再生可能エネルギーの導入拡大対策技術のシナリオの最適化と解析

Scenario optimization and analysis of power-to-gas and power-to-heat strategy for the increasing share of intermittent renewable energy

北九州市立大学 教授 高 偉俊

(研究計画ないし研究手法の概略)

Power to Gas (P2G) と Power to Heat (P2H) は、長期間のエネルギー貯蔵を可能にし、電力システムに柔軟性を持たせることができるため、電力供給における様々な問題を解決する有望なオプションとして注目を集めている。

Power to Gas (P2G) は再生可能エネルギーの余剰電力を使って水素を生産するシステムである。現在、水素エネルギーの普及と応用に向け、大規模な再生可能エネルギー電力網の導入に伴う問題を解決するための、地域間連系線の増強、蓄電といった、電気貿易の構造改革が進められている。欧米では、燃料電池自動車向けのパイプライン方式水素ステーションの実証実験が実施された。水素と燃料電池の技術開発は、すでに世界のエネルギー利用の主要な戦略となっている。

水素をエネルギーとする燃料電池自動車は、低炭素社会と再生可能エネルギーの大規模導入を実現する重要な手段である。将来、燃料電池自動車 (fuel cell electric vehicles、FCV) が新エネルギー自動車の分野で重要な地位を占めるようになることが予想される。FCV について炭素排出が、他の新しいエネルギー自動車よりもより低く、しかし、容量がより大きく、エネルギー効率がより高い。そのため、水素燃料電池自動車導入の経済性と環境効果を議論することは、再生可能エネルギーの導入と応用において重要な意義を持っている。

本研究では、再生可能エネルギーの余剰電力を使って水素を生産するシステム (P2G) と、水素燃料電池自動車から送電網へ放電する (FCV2G) システムの連携による、再生可能エネルギーの大規模導入に伴う電力網を仮定し、FCV2G の経済的メリットを分析するとともに、P2G 活用可能性の検討を行った。

図 1 は、P2G と FCV2G の連携システムを示している。再生可能エネルギーや電力系統などからの余剰電力が水素を生産し、水素燃料電池自動車はその水素を用いて発電し建物

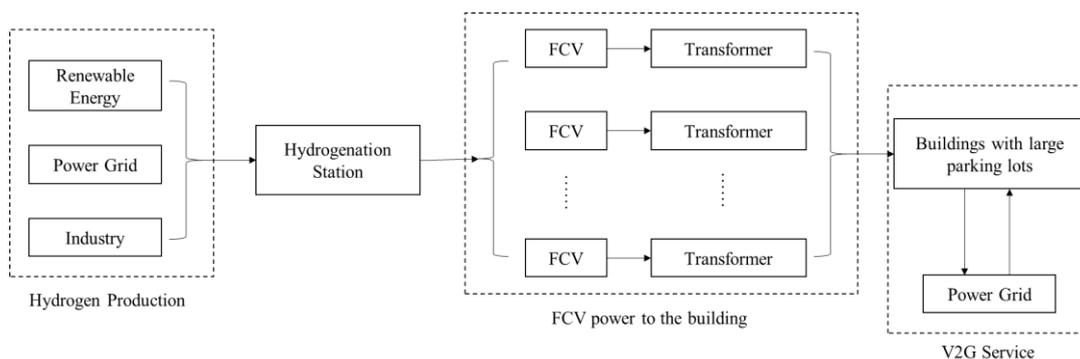


図 1 現在の P2H と FCV2G の連携システム

へ放電することにより、建物で消費される電力と電気自動車（electric vehicles、EV）への充電のための電力を供給する。これにより、P2G を利用できるシステムが構築される。

この研究のプロセスとして、まず年間の消費電力量を把握した上で、国内の大型ショッピングモールを調査シナリオとして選定した。車両の訪問時間、走行距離、退去時間などの基本的なパラメータをシミュレートし、建物のエネルギー消費に対する FCV 放電の影響を分析するため、モンテカルロシミュレーション法（Monte Carlo method）を使用した。次に、FCV の一部を EV に置き換え、FCV と EV からの V2G サービスの仲介役として建物を利用しながら、FCV と EV の電力を、建物だけでなく送電網にも供給した場合についても検討した。

遺伝的アルゴリズム(GA)を使用して、最高の放電価格、最高の経済的利益の条件下での車両放電の選択、および異なる FCV 比率と EV 充電需要の下での建物収入の変化を分析した。感度分析を通じて、建物の 1 日あたりの電気料金、バッテリーコスト、燃料電池コスト、炭素排出量、送電網の炭素排出量、水素コストの 6 つのパラメーターが経済的利益に与える影響を分析する。GA の操作フローを図 2 に示す。

国内大型ショッピングモールの年間の消費電力量を把握して、クラスタリング分析を行った。k - means クラスタリング解析により、中心点が 6 になる場合に違いが最も明白であると結論づけた。負荷変化を図 3 表す 6 つの負荷変化曲線が得られた。

対象地域の 1 日の平均車両来訪率（1 年の最大来訪率）を図 4 に示す。平日（月曜日から金曜日まで）の訪問車両数はほとんど変化がないため、以降のシミュレーションでは月曜日が平日を表すこととする。InD の密度関数に従って、走行距

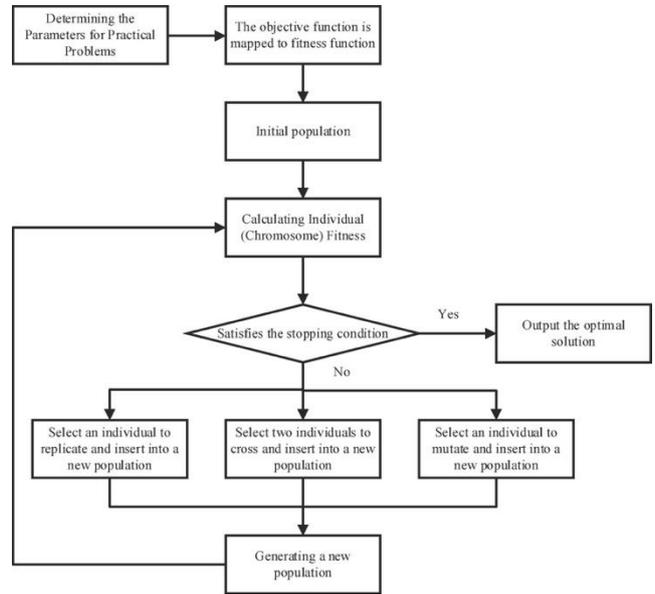


図 2 GA の操作フロー

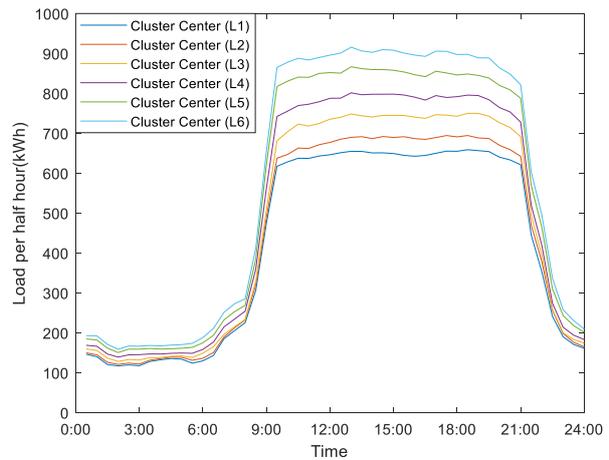


図 3 年間のデータにクラスタリング分析の結果

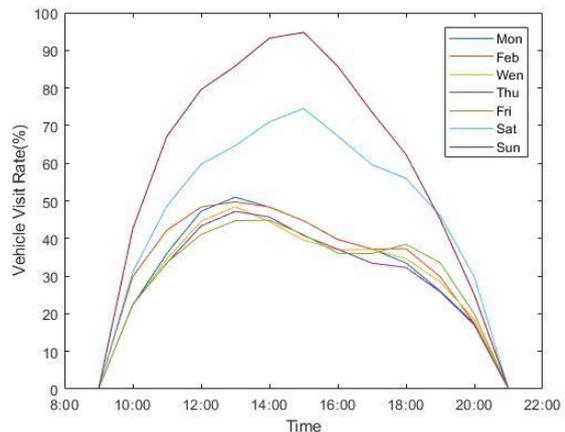


図 4 1 週間の車両訪問率

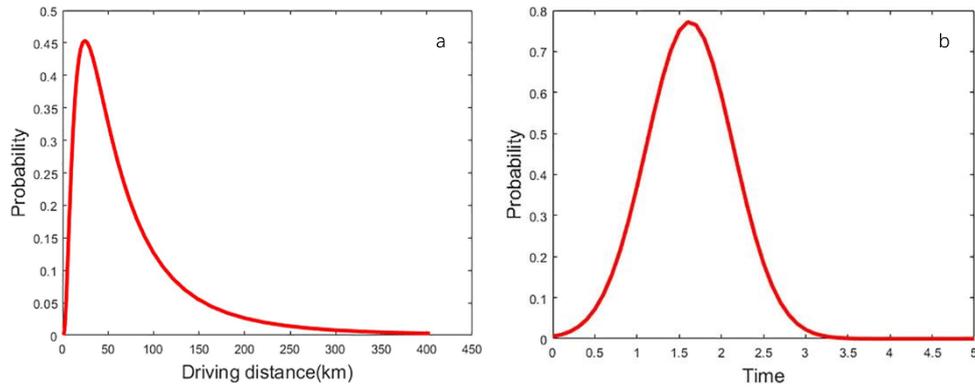


図5 走行距離(a)と滞留時間(b)の確率密度曲線

離の確率密度曲線を描画する(図5a)。また、対象地域における車両の滞留時間はほとんどが1~2.25時間である。予測値1.625を使用して、負の標準偏差0.5163がないことを確認するために、車両の滞留時間の確率密度曲線を取得した(図5b)。

図6は基本の負荷との比較を示している。FCVの仮定最大訪問台数を50台ごとにシミュレーションし値を出した。400台のFCVが来訪した場合、放電は建物の電力需要を超える。超過放電を保存できることを考慮して、月曜日、土曜日、日曜日の異なる最大訪問台数によって提供される合計放電量が計算され、6つのクラスター中心点の合計電力消費量と比較した(図7)。月曜日は訪問台数が少なく、1日を通して電力需要を満たすためには、月曜日の最大訪問台数を増やす必要があることがわかる。訪問台数が最も多くなる日曜に関しては、必要とされる訪問台数は500台から800台である。訪問車両の放電装置の設置が必要不可欠だとすれば、経済的観点から考えて、部分放電装置が過剰放電により停止する事態を回避するには日曜日に関しては最小数のデータが採用されるべきである。したがって、以降の計算では、訪問車両の最大数を500台~800台に設定する。

FCV2Gの効果を、EVとの比較を通じて具体的に分析した。経済的利益を最大化する目的で、遺伝的アルゴリズムを使用して、月曜日、土曜日、日曜日の3つの異なる状況でのFCVとEVの放電電力価格と収入を比較および分析した。まず、すべてのV2G車を、100%FCV、80%FCV+20%EV、60%FCV+40%EV、40%FCV+60%EV、20%FCV+80%EV、100%EVの6つに分類した。対象地域は九州電力の供用範囲内であるため、電力価格の設定にあたっては九州電力の価格を参考とした。家庭用電気料金について、中間期では、昼

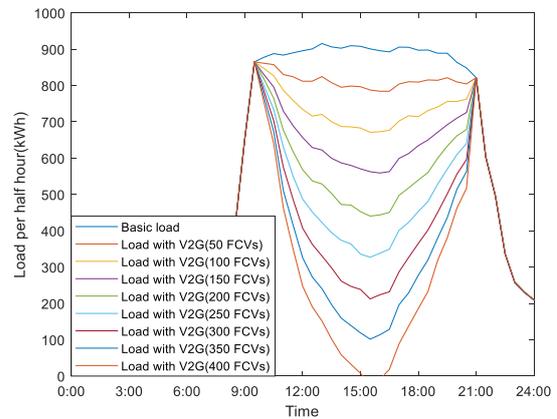


図6 基本負荷およびFCV2G負荷(FCVが50~400の場合)

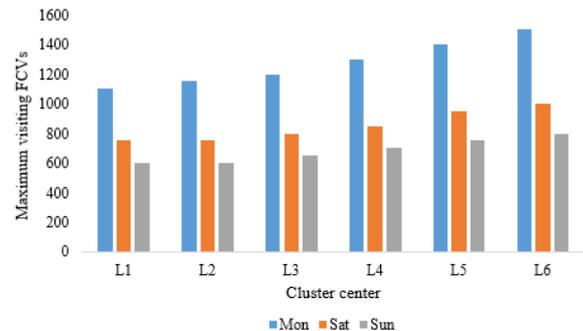


図7 累積放電量が1日の電力消費量を超える場合の最大訪問のFCV

表 1 月曜、土曜、日曜の EV 充電需要下の FCV を最適化した結果

Monday ($Price_{dis}^{EV}=24.02\text{Yen/kWh}$, $Price_{dis}^{FCV}=29.21\text{Yen/kW}$)						
Proportion of FCV	100%	80%	60%	40%	20%	0%
Proportion of EV	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
Peak-cutting income (Yen)	8402	7925	7443	6959	6692	732
V2G income (Yen)	48610	43532	38441	33318	13622	398
Total spending (Yen)	-47049	-42816	-38569	-34290	-16076	-749
Total income (Yen)	9963	8640	7315	5987	4242	381
Saturday ($Price_{dis}^{EV}=26.31\text{Yen/kWh}$, $Price_{dis}^{FCV}=32.91\text{Yen/kW}$)						
Proportion of FCV	100%	80%	60%	40%	20%	0%
Proportion of EV	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
Peak-cutting income (Yen)	22686	21860	21755	20746	19721	18703
V2G income (Yen)	134152	121551	111385	98335	85202	72072
Total spending (Yen)	-91226	-81999	-75661	-65966	-56176	-46419
Total income (Yen)	65611	61412	57479	53115	48746	44355
Sunday ($Price_{dis}^{EV}=26.51\text{Yen/kWh}$, $Price_{dis}^{FCV}=33.15\text{Yen/kW}$)						
Proportion of FCV	100%	80%	60%	40%	20%	0%
Proportion of EV	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
Peak-cutting income (Yen)	29649	28278	27113	26073	25086	24499
V2G income (Yen)	176437	159215	142280	125546	109044	80364
Total spending (Yen)	-121158	-108691	-96047	-83688	-71673	-53876
Total income (Yen)	84928	78801	73345	67930	62457	50987

間料金が 23.51 円/ kWh、夜間料金が 12.97 円/ kWh であり、夏・冬では昼間料金が 26.35 円/ kWh、夜間料金は 12.97 円/ kWh になる。今回の調査では、炭素排出量の影響を分析中に考慮している。炭素排出量が 4320 円/ t-CO₂ であるとして、九州の 1kWh の二酸化炭素排出量は 0.463kg / kWh なので、1kWh の炭素価格は約 2 円/ kWh である。

EV 充電需要下の FCV を最適化した結果を表 1 に示している。表 1 からわかるように、EV 自動車の充電需要の増加により、V2G 中の最高値と最低値間の差が拡大し、それによってピークカット収益が増加した。また、日曜日は訪問車両数が最も多いため、ピークカット収益の伸びも最大である。これらの結果から、FCV による収益は EV よりも高いことが分かった。土曜日と日曜日は建物の電気料金が高いため、FCV の導入による総収益は増加したが、ピーク電力低減への影響は V2G よりも少なくなっている。総収益の増加は、主に FCV の排出量の削減、発電時の二酸化炭素排出量の削減による利益及び V2G サービスの提供による収入に起因している。

結果は、日々の電気料金が一定して高い場合は V2G 収入が総収入を支配することを示しており、その場合における最適化の方法はできるだけ多くの車両を V2G サービスに参加させることである。一方、日々の電気料金が一定せず高かったり安かったりする場合にはピークカットのメリットが支配的になり、最適化の方向としてはピーク負荷の削減が最も経

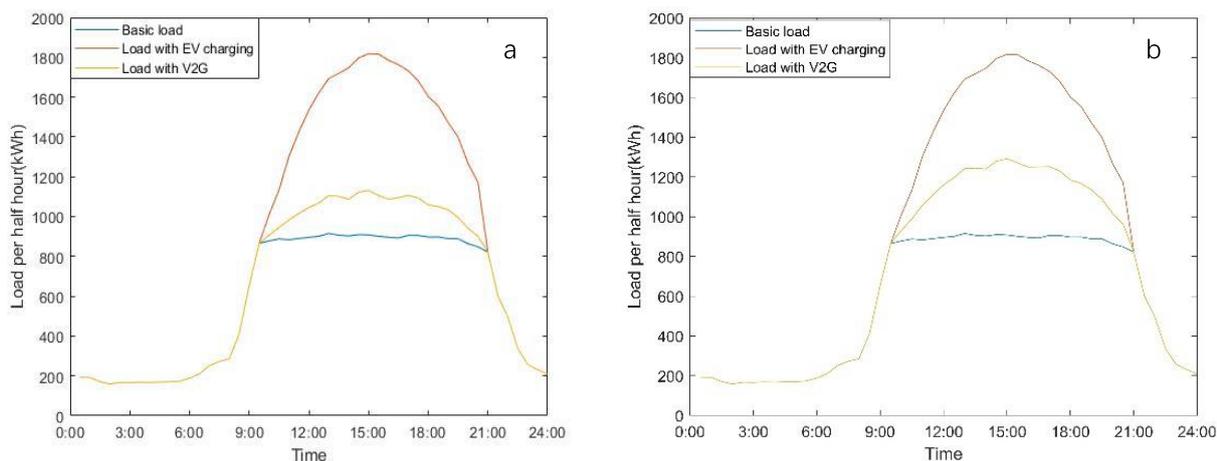


図 8 EV 充電の負荷と V2G の負荷 (日曜日、a は 100%FCV、b は 100%EV)

表 2 感度分析の結果

Daily electricity price (Yen/kWh)	20.62	18.62	16.62	14.62	12.62	10.62
Total income (EV100%, Yen)	56234	33202	21445	11706	701	418
Total income (EV85%+FCV15%, Yen)	60104	41394	27899	16188	6775	1572
Δ income, %	6.88	24.67	30.09	38.29	866.63	276.26
Battery cost (Yen)	806,250	645,000	483,750	322,500		
Δ income, %	6.88	3.45	1.04	-0.79		
Fuel cell cost (Yen)	1562,500	1250,000	937,500	625,000		
Δ income, %	6.88	9.71	12.36	15.42		
Carbon emission price (Yen/kg)	4.32	6.47	8.63	10.79		
Δ income, %	6.88	12.61	18.97	26.03		
Battery cost (Yen)	806,250	645,000	483,750	322,500		
Electricity grid carbon emission (kg/kWh)	0.394	0.417	0.440	0.463		
Δ income, %	5.28	5.80	6.22	6.88		
Electricity grid carbon emission (kg/kWh)	0.486	0.509	0.532			
Δ income, %	7.40	7.92	8.49			
Hydrogen cost (Yen/kg)	40	35	30	25	20	
Δ income, %	-10.28	-3.98	6.88	24.56	50.50	

済的な方法になる。分析を通じて、EV と比較して、FCV はより低い毎日の電気料金で最適化の方向が変わる。これは、FCV が EV よりも優れた客観的条件下での全体的な利益を確実にすることを示していることを示している。

日曜日の 100%FCV と 100%EV の充電時の V2G の負荷を図 8 に示す。FCV が 100%の場合、EV が 100%の時よりも総収入は 51.0%高い。その中で、ピークカット収益は 30.5%高く、V2G サービスの収益は 95.0%である。FCV には、放電損失が少なく、容量が大きく、放電電力が大きという利点がある。V2G サービスに則れば、FCV2G のプロモーションは FCV プロモーションの大きな後押しとなる。

最後に、FCV 比 15%をベンチマークとして感度分析を行った。パラメータ設定と最適化

プロセスの結果を参照し、1.建物の日々の電気料金、2.バッテリーコスト、3.燃料電池コスト、4.炭素排出量、5.送電時炭素排出量、6.水素コストの6つのパラメータについて感度分析を実行した。上記のパラメータの導入と国際機関の統計を参考にしながら導いたパラメータの変化を表2に示している。この表の値は、FCV2Gの全体的な利点が、時間とともにより良い方向に発展するであろうことを示している。

FCV2Gシステムの潜在的および経済的利点を分析することにより、現在主流となっている従来のEVよりも、FCVの方がV2Gシステムに適していることがわかった。また、FCV2Gシステムによって得られる経済的メリットは、FCVプロモーションプロセスの経済的制約を部分的に相殺することが可能であることも明らかになった。

本研究では、P2G、P2H供給事業推進と水素燃料の未来社会の構築を提案した。この研究により得られた成果が、FCV加速促進の一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] BP World Energy Prospect 2019
- [2] Fuel Cell Promotion Office of Japan Agency for Natural Resources and Energy, 'About Fuel cell automatic vehicles', 2014: 13-14.
https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/003_02_00.pdf
- [3] M.Hassen, S. K.Loudiyi. Electrolytes behavior during hydrogen production by solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70(2017)1331-1335.
- [4] K. Petrov, S.Z. Baykara, D. Ebrasu, M. Gulin, A. Veziroglu. An assessment of electrolytic hydrogen production from H₂S in Black Sea waters. *International Journal of Hydrogen Energy*44 (2019) 5303-5313
- [5] Chen, Bin, et al. "Thermal modelling of ethanol-fuelled Solid Oxide Fuel Cells." *Applied Energy* 237 (2019): 476-486.
- [6] Kojima, Yoshitsugu. "Hydrogen storage materials for hydrogen and energy carriers." *International Journal of Hydrogen Energy* (2019).
- [7] Environment and Energy Research Division, Mitsubishi Research Institute, Inc, 'Report for Energy conservation rationalization promotion project (Investigation on energy saving measures for mechanical appliance)',2016: 16-17. https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2016fy/000547.pdf

(発 表 論 文)

Fanyue Qian, Weijun Gao, Yongwen Yang, Dan Yu, Economic optimization and potential analysis of fuel cell vehicle-to-grid (FCV2G) system with large-scale buildings, *Energy Conversion and Management*, Volume 205, pp.1-12 2020 (SCI Impact Factor 7.181)

Fanyue Qian, Weijun Gao, Yongwen Yang, Dan Yu, Potential analysis of the transfer learning model in short and medium-term forecasting of building HVAC energy consumption, *Energy*, Volume 193, pp1-9,2020 (SCI Impact Factor 5.537)

Fanyue Qian, Weijun Gao, Yongwen Yang, Dan Yu, Jinming Jiang, Potential Analysis of Fuel Cell Vehicle-to-Grid (FCV2G) System with Large-scale Building, *Journal of Asian Urban Environment*, Annual 2019, pp. 229-232

謝辞

本研究は、公益財団法人前田記念工学振興財団の助成を受けたものです。ここに記して、深甚なる謝意を示す。