

研究成果報告書

研 究 題 目		ダックカーブ改善とV2Hの災害時電源供給を目的としたEVにおけるバッテリー交換アルゴリズムの基礎的検討	実 施 年 度
			令和 6， 7 年度
代 表 研 究 者	所 属	県立広島大学 地域創生学部	
	氏 名	重安 哲也	印
1. 研究の目的・背景 近年、持続可能な社会の実現に向けて、太陽光発電（PV）などの再生可能エネルギーの導入や、二酸化炭素を排出しない電気自動車（EV）の普及が強く期待されている。しかし、PV 発電量は日照条件に大きく左右され、1 日を通して大幅に変動するという特性を持つ。このため、全電力需要から PV 発電量を差し引いた正味の需要である「実質電力需要」において、昼間に需要が急減し、PV 発電が停止する夕方以降に需要が急増する「ダックカーブ現象」が顕在化している。ダックカーブの発生は、従来型の火力発電の稼働効率を低下させ、発電コストを著しく増大させる要因となる。 ダックカーブ現象の主な原因は、発電と需要のタイミングや場所の不一致による「時間的乖離」および「地理的乖離」である。時間的乖離とは、PV 発電のピーク（正午頃）と実質電力需要のピーク（夕方から夜間）との間の時間のズレを指す。一方、地理的乖離とは、PV 発電量が多い地域と電力需要が高い地域が物理的に離れていることによる場所のズレを指す。これらの乖離を解消するため、定置型蓄電池やプラグイン充電型の BEV などの分散エネルギー資源（DER）を活用した電力のタイムシフトや地理的な移送が検討されてきた。 しかし、既存の DER には運用の制約に伴う課題が存在する。定置型蓄電池は設置場所が固定されているため、地理的乖離の解消には寄与できない。また、一般的なプラグイン充電型 BEV は、充電に長時間を要するため運用の制約が大きく、十分な緩和効果を得ることが困難である。これに対し、本研究ではバッテリー交換型 EV（BSEV）とそのインフラであるバッテリー交換所（BSS）に着目する。BSEV はバッテリー自体を交換することで電力補充を行うため、従来の BEV に比べて補充時間を大幅に短縮できる。また、BSS に備えられた多数の予備バッテリーを定置型蓄電池として活用することで、昼間に PV 電力を蓄え、夜間に放電する電力タイムシフトが可能となる。さらに、BSEV が BSS 間でバッテリーを移動させる「電力再配置」を行うことで、BSEV の移動性を活かした地理的乖離の解消も期待できる。 そこで、本研究では、これらの課題を解決し、ダックカーブを効果的に平滑化する新たな動的制御戦略の確立に取り組んだ。具体的には、実質電力需要の変動に応じて充放電出力を動的に調節する比例（P）制御や、過去の偏差を累積して補正する積分（I）動作、急峻な変動を抑制する微分（D）動作を組み合わせた PID 制御を導入し、短期的な電力変動の抑制を図る。同時に、運搬経路の拡張や実施条件の最適化によって交通渋滞を回避しつつ、地理的な電力バランスを適切に維持する効率的な電力運搬手法を提案した。			

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

(1)信頼性の高い評価基盤の確立(計画達成度:100%) 申請時の計画では、研究成果の実社会活用を重視し、ドイツの交通流シミュレータ SUMO を改変した評価基盤の構築を最優先事項としていた。具体的には、初年度に TraCI を用いた Python によるリアルタイム制御環境を整え、EV の走行性能に関する基礎評価を行う計画であった。この計画に対し、本研究では広島市南区を想定した都市部のメッシュ型道路網モデルを SUMO 上に構築し、中国電力ネットワークの実需給データおよび気象庁の気象データを統合した高度なシミュレーション環境を完成させた。これにより、季節や天候による変動を考慮した極めて信頼性の高い評価が可能となり、当初の計画を完全に達成した。

(2)動的充放電制御による電力シフトの実現(サブ項目②の達成度:100%以上) 計画書では、昼間の充電量を夜間にシフトさせる「電力シフトアルゴリズム」の確立を掲げ、機械学習（カーネル法）等による判断を想定していた。実地研究においては、より即応性と安定性に優れた PID 制御（ESRLPID）および回帰直線導出幅拡張方式（ESRL）を導入した。当初想定していた単なる電力シフトにとどまらず、PID 制御の積分（I）動作による定常偏差の補正と微分（D）動作による急峻な変動抑制を組み合わせることで、フェーズ切替時や充放電の早期終了に伴う短期的な電力変動（ FLU_{short} ）を効果的に平滑化することに成功した。これは、計画を上回る高度な制御戦略の確立といえる。

(3)効率的電力輸送による負荷平準化と交通負荷低減(サブ項目③・①の達成度:90%) 計画では、BSS（バッテリー交換所）間の予備バッテリー残量情報を共有し、EV を用いた電力輸送（バッテリー運搬）によって系統負荷を平準化する仕組みを検討していた。本研究では、運搬経路を分散させる効率化運搬（EBC）を提案・実装した。これにより、人口密度や電力需要の偏りに伴う BSS 間の SOC 偏差を迅速に解消しつつ、当初懸念されていた運搬集中による交通渋滞を大幅に回避できることを実証した。自律分散的な情報共有や強化学習の導入については、EBC における閾値判定と経路拡張戦略によって実用的なレベルで代替・実現されており、地理的乖離の解消という目的において極めて高い成果を得た。

(4)総括と達成度合 申請時の計画では、本助成期間内に全体構想の合計 40%程度の達成を見込んでいた（評価基盤 30%+各サブ項目 10%）。しかし、実際には評価基盤の完全な構築に加え、PID 制御による動的な需給平準化および交通負荷を考慮した電力輸送戦略の確立までを完遂した。これにより、バッテリー交換型 EV を用いたダックカーブ現象の緩和という主要目的において、当初の予想を大幅に上回る成果を収めた。災害時の電源供給（V2H）に関する基礎検討についても、BSS 間の SOC 均等化が達成されたことで、地域全体の供給余力を維持する基盤が整ったといえる。

以上のことから、本研究は**申請時の計画を質・量ともに凌駕する水準で達成した**と評価できるとともに、このような研究を行う機会を提供していただいた中国電力技術研究財団には衷心よりお礼を申し上げる次第である。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

申請時と概ね同様の趣旨の経費執行を行うことができた。設備備品費として計上したワークステーションに相当する計算機シミュレーション用 PC はノート型 PC 2 台としたのは、高性能 GPU 1 台よりも、交通流シミュレータの複数台の同時実行の方が効率が良いと判断したためである。

また、当初に比べて計算環境の構築のための経費使用額は減少したものの、その代わりとして、当初計画段階よりも多くの研究成果が得られたことによる、成果発表のための学会参加費などにより使用した。これにより、えられた研究成果の社会への還元機会をより多く得ることができた。

学会発表に際しては、査読を経た国際会議やフルペーパーによる査読を経たワークショップにおいて、それぞれ最優秀論文賞を受賞するなど高い評価を得ることができたのも、研究成果発表の機会が、本研究助成によって十分にえられたためであると考えられる。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

今後は、まずは制御アルゴリズムのさらなる高度化に取り組みたい。実社会における複雑な交通状況や予測困難な気象変動に対しても、常に最適な平滑化効果を維持できるような自律的かつ堅牢な制御系の開発が必要である。

さらに、将来的な実用化とレジリエンス向上の観点から、エネルギー貯蔵能力の抜本的な拡張を検討する。現在のシステムでは実質電力需要におけるダックカーブ緩和効果がバッテリー交換型 EV の予備バッテリーを用いた蓄電システムの物理的な容量に依存するため、長期間の電力シフトや災害時の継続的な電力供給において限界が生じる可能性がある。そこで、蓄電池以上の放電や蓄電が必要となった場合に備え、**水素電気変換システムのモジュール追加によるさらなる蓄電制御の追加可能性**について検討を行いたい。

具体的には、太陽光発電による余剰電力が蓄電池の容量を超える際に水素としてエネルギーを貯蔵し、電力需要が蓄電池の供給能力を上回る際には水素から電力を生成・供給するエネルギー管理システムの構築である。蓄電池の即応性と水素の長期間・大容量貯蔵特性を組み合わせることで、DER としての価値を最大化し、再生可能エネルギーの導入拡大に伴う電力系統の不安定化問題の解決に大きく貢献できると考えている。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

※表彰を受けたものは青字で表記しています

●雑誌論文誌【査読あり】1本

[1]津島, [重安](#): バッテリー交換型 EV の利活用による実質電力需要におけるダックカーブの改善, 情報処理学会論文誌, 67 巻, 2 号, p.428-435 (2026)

●国際会議【査読あり】4本

[2]Tsushima and [Shigeyasu](#): An Efficient Battery Migration Strategy for Duck Curve Alleviation in Battery Swapping EV Infrastructure, Proc. of NBiS-2025, 2025

[3]Hatamoto and [Shigeyasu](#): Utilizing of Stored Electricity for Emergency Situations in Cooperation with Sophisticated Battery Migration of BSEV, Proc. of NBiS-2025, 2025.

[4]Hatamoto and [Shigeyasu](#): A New System for Regulating Electric Power with Battery Swapping EV Considering Transport Delay, Proc. of BWCCA-2025, 2025.

[5]Hatamoto and [Shigeyasu](#): Swap and Carry Strategy for Utilizing Spare Batteries as an Emergency Power Supply on Battery Swapping EV, Proc. of IMIS-2024, 2024.

●国内ワークショップ【査読あり】2本

[6]津島, [重安](#): 適応充放電制御と動的電力再配置により時間的/地理的乖離を解消するダックカーブ対策, 第 33 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, 2025.

[7]畑本, [重安](#): バッテリー交換型 EV による運搬遅延を考慮した災害対応指向型電力輸送システム, 第 33 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, 2025.

[8]津島, [重安](#): バッテリー交換型 EV を用いた実質電力需要におけるダックカーブ改善に関する検討, 第 32 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, 2024.

[9]畑本, [重安](#): 非常時電力供給を目的としたバッテリー交換型 EV を用いた平常時電力輸送システム, 第 32 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, 2024.

●受賞歴2本

Best Paper Award: 1 件[1]

最優秀論文賞: 1 件[2]

最優秀プレゼンテーション賞: 1 件[9]

優秀プレゼンテーション賞: 2 件[6], [7]

優秀ポスター発表賞: 1 件[8]