

氏 名 ( 本 籍 )	千阪 秀幸 (京都府)
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 授 与 番 号	甲第 6 2 8 号
学 位 授 与 日 付	令和 4 年 3 月 2 5 日
専 攻	工学専攻
学 位 論 文 題 目	電動車を用いた再生可能電力の新たな供給システムに関する研究 (A novel electric power supply system through the use of electric vehicle for renewable electricity)
学位論文審査委員	(主 査) 教授 板谷 義紀 (副 査) 教授 上宮 成之 教授 中川 二彦

## 論 文 内 容 の 要 旨

地球温暖化の抑止は人類の喫緊の課題である。その達成にはエネルギー源のカーボンニュートラル化が必要であり、エネルギー源の再生可能エネルギー化と省エネルギーの推進が重要になる。例えば、我が国の太陽光発電の賦存量は約 3 兆 kWh/年であり、電力需要の約 3 倍に相当する。しかし、消費者負担コストを考慮すると、その賦存量は 1/6 に低下すると環境省より報告されている。従来から、仮想発電所(VPP)や Vehicle to Grid(V2G)など既存の配電網を経由する場合の再生可能電力の余剰低減に関する研究は多いが、太陽光発電の発電から消費に至るコスト要因を根本的に分析し、改善する研究は極めて少ない。

本研究では、太陽光発電を事例に、発生から消費に至るコスト要因として、供給効率と設備コストを考えた。供給効率は供給設備で発生する変換損失、発生と消費の不整合による余剰損失の合計損失で評価するとともに、設備コストについては、供給設備の簡素化を追求した。これらの基礎研究に基づき、電動車(EV)と太陽光発電を統合化した新たな電力配電システムを提案し、様々な電動車を対象にその効果について検討した。

EV には、産業用途のフォークリフト、農機具、建設機械、運輸用途の電車、バス、トラック、家庭・業務用途の自家用車などがある。何れの EV も搭載蓄電池へ電力を充電し、走行で消費しつつ、移動先で蓄電池から電力を供給できる。EV の充電と電力供給は、走行時のサイバー空間での蓄電池の時系列の電力量変化を評価しつつ、電動車が移動先に接続時のフィジカル空間での移動先を含む全体のエネルギー需給状況に応じて行われる。このため、時々刻々状況が変化するエネルギー収支を総合的に解析し、評価するサイバーフィジカルシミュレータを開発した。

供給効率は、制約条件の理論(Theory of constraints)に基づき、太陽光発電の発生から消費に至る供給損失と余剰損失を最小化する方法を評価した。太陽光発電の発生電力と消費を調整する方法として、従来の配電網経由で供給する方法、定置型蓄電池を用いた独立システムで供給する方法、電動車を用いた本提案のシステムの 3 つの方法をシミュレーションで比較した。なお、シミュレーションでは、エネルギー変換効率は実験値、EV の走行や空調の電力消費などは実験で精度を検証した理論モデルを用いた。

様々な EV を用いたシステムの研究では、①間伐材の処理工場でフォークリフトと太陽光発電を統合化し、昼休みや休憩時間にフォークリフトへ太陽光の電力を充電することにより、CO<sub>2</sub>排出量を 45%削減できること。②JR 吉備線(ローカル鉄道線)における太陽光発電と蓄電池電車の統合化では、起点(岡山)と終点(総社)の両駅の駅舎屋根に設置した太陽光電力を電車へ供給することにより、CO<sub>2</sub>排出量を 65%削減できること。③岐阜市内のバス路線における太陽光発電と電気バスの統合化では、鉄道と同様に終点の岐阜大学構内に設置した太陽光電力を電動バスへ供給することにより、CO<sub>2</sub>排出量を 49%削減できること。④様々な家庭(一戸建住宅、集合住宅)における太陽光発電と自家用 EV、貯湯槽の統合化では、家庭と勤務先に設置した太陽光電力を EV への供給することにより、CO<sub>2</sub>排出量を 80%以上削減できることを夫々明らかにした。これらの効果差は、(1)蓄電容量、(2)電動車の駐車・接続時間に伴う充放電時間、および(3)太陽光発電、電力消費と蓄電のバランスに依存すると考えられる。

家庭の CO<sub>2</sub>削減効果が大きい理由は、家庭以外のシステムでは EV に搭載した蓄電池しか使用していないが、家庭のシステムでは EV 蓄電池 40kWh/台に加え、熱として 14kWh の蓄電容量(ヒートポンプ給湯機の COP=3 の場合)が使用できる点である。EV が家庭に接続されていない時に、ヒートポンプ給湯機で電力を熱に変換して蓄える効果が大きい。また、EV の駐車時間は自家用 EV が最も大きく、実測結果や国内の自家用車平均の走行実績からその殆どが 95%以上であり、自家用 EV は定置型蓄電池と同様に使用できることが分かった。提案する家

庭システムの最大の特徴は、走行の電力消費によって充電余力を生じるため、太陽光発電の調整力が高い点と、従来の配電網での供給に比べて、供給損失を最大 30%低減できる点である。特に、後者は、太陽光発電の供給を PCS(Power conditioning system)、EV および V2H(Vehicle to home)のみで構成でき、定置型蓄電池、変電設備、送電設備を全て省くことができ、供給設備の最小化を図れる。この効率向上と設備の最小化によって、太陽光発電から消費に至る電力コストを現状の半分以下にできることを明らかにした。

なお、太陽光発電、電動バスおよび家庭を統合化したコミュニティを、岐阜大学の実績データを基に設計した結果、コミュニティ全体として CO<sub>2</sub> を 60%以上削減できることが分かった。

今後の課題は発生する余剰電力の活用であり、余剰電力を CO<sub>2</sub> 回収有効利用技術(CCU)や H<sub>2</sub> 製造などの電力源にできれば、カーボンニュートラル社会の実現が飛躍的に進むと考えられる。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、太陽光発電の飛躍的な利用拡大を図るために、電動車を電力輸送と需給調整の手段に用い、太陽光発電の発電から消費に至る供給損失と余剰損失を最小化する方法の開発を目的としている。

まず、解析手法として、電動車が走行時における搭載蓄電池の蓄電変化をサイバー空間で評価しつつ、電動車が移動先のエネルギーシステムと接続時のフィジカル空間でのエネルギー需給状況を時系列に統合評価するサイバーフィジカルシミュレータを開発した。更に、制約条件の理論(Theory of constraints)に基づき、太陽光発電の発生から消費に至る供給損失と余剰損失の合計損失を最小化する供給方法を求めた。その結果、太陽光発電に限れば、電動車を用いた電力輸送と需給調整の方法は、既存の商用系統による配電と比較して、供給損失と余剰損失を最大で 30%低減できることを明らかにした。

この電動車を用いた太陽光発電の供給利用システムは無限の組み合わせがかが得られる。本論文では、具体的に 4 つの異なるケース、すなわち①工場屋根に太陽光発電を設置し、電動フォークリフトと組み合わせた場合、②鉄道路線(JR 吉備線)において、起点(岡山)と終点(総社)の駅舎屋根に太陽光電力を設置し、蓄電池電車と組み合わせた場合、③市内バス路線(岐阜大学病院線)において、岐阜大学構内に設置した太陽光発電と電動バスを組み合わせた場合、④様々な家庭(一戸建、大小の集合住宅)において、家庭と勤務先に設置した太陽光発電と電動自家用車を組み合わせた場合において、CO<sub>2</sub> 排出量を 45~80%以上削減できることを明らかにした。更に、岐阜大学と、上記の④家庭および③路線バスを組み合わせることでコミュニティを形成した場合には、コミュニティ全体として CO<sub>2</sub> 排出量を 70%削減でき、コミュニティ内の電力費用も現状の約半分にできることを明らかにした。

蓄電池については、電動車の搭載蓄電池の利用によって、供給効率の向上だけでなく、太陽光発電の需給調整に必要な定置型の蓄電池の大半が不要になることも明らかにした。

申請された学位論文を慎重に審査した結果、本論文は極めて新規性ある有効な知見を見い出しており、優れた研究成果であることを確認した。学位審査委員会における審査の結果、本論文は学位論文に値するものと判定した。また、岐阜大学大学院工学研究科における課程申請による博士の学位に関する取扱要項第 4 の規定において、提出する学位論文の基礎となる学術論文の数は工学専攻における規定(機械系)に達しているものと確認された。

## 最終試験結果の要旨

学位審査委員会は、提出論文の基礎となる発表論文(査読付き論文 7 編)の内容を確認し、令和 4 年 1 月 27 日に開催された学位論文公聴会において、論文提出者との質疑応答と口頭試問などに基づいて審査を行い、最終試験に合格と判定した。

---

### 基礎となる原著論文

1. Hideyuki Chisaka, Tsuguhiko Nakagawa, "A Novel Energy System Integrated with Solar Power, Advanced Electric Vehicle and Heat Pumps," Proceedings of the ASME 2016 10th International Conference on Energy Sustainability, ES2016-59267, pp.1-8, 2016.
2. 広瀬 拓, 千阪 秀幸, 中川 二彦, "空調機とエンジン発電機を統合した電気自動車の評価", 自動車技術会論文集, **48**(3), 679-685, 2017.
3. Nakagawa Tsuguhiko, Chisaka Hideyuki, Notoji Yu, "A novel SMART energy system for using biomass energy effectively", RENEWABLE ENERGY, **116**, 492-499, 2018.
4. 千阪 秀幸, 小林 信介, 板谷 義紀, 中川 二彦, "再生可能エネルギーの利用を拡大する車載蓄電池の運用方法", 自動車技術会論文集, **51**(1), 113-119, 2020
5. 千阪 秀幸, 小林 信介, 板谷 義紀, 中川 二彦, "様々な住宅への電動車両による再生可能電力の輸送の評価", 自動車技術会論文集, **52**(3), 726-731, 2021.
6. 千阪 秀幸, 小林 信介, 板谷 義紀, 中川 二彦, "電動車(バスと自家用車)を用いた統合エネルギーシステム", 自動車技術会論文集, **52**(5), 1033-1039, 2021.
7. 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 ―バーチャルグリッド―", 自動車技術会論文集, **53**(1), 38-44, 2022.