

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06316

研究課題名（和文）電気自動車と再生可能エネルギーのシステム統合に関する研究

研究課題名（英文）Research on System Integration of Electric Vehicles and Renewable Energy Sources

研究代表者

太田 豊 (Ota, Yutaka)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：50372537

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：再生可能エネルギーと電気自動車が普及した際の電力系統・配電系統各地点での周波数・電圧品質を模擬する評価モデルをリアルタイム・シミュレータに実装し、電気自動車実車と充電スタンドを連携した試験環境を構築した。再生可能エネルギーからのスマート充電、数十分単位での充放電計画制御、電力系統向け周波数制御、配電系統向け無効電力制御、そして、災害時の自立電力供給、の多様多彩な電気自動車の活用方法を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

再生可能エネルギーと電気自動車は、効率的で運用コストの経済性がある発電・電力機器である。この2つのシステム統合を志向することは、低炭素社会システム実現とスマートシティ・コミュニティへの展開を拓く可能性がある。

本研究では、研究室でのデモンストレーションと大学キャンパスでの実証を交えながら、現在は普及期に差し掛かっている電気自動車の幅広い応用可能性と電力システムとの統合の姿を指し示すとともに、汎用的で相互運用性のある計測・制御・通信インターフェースで実現できることを実証している。

研究成果の概要（英文）：An evaluation model emulating power quality of the power and distribution grid with massive photovoltaic generations and electric vehicles integration is investigated. Unique hardware-in-the-loop test-bed is conducted by a power system real time simulator, electric vehicle fleet, and flexible charging infrastructures.

Multi-purpose experiments are demonstrated considering renewable powered smart charging, minutes order charge and discharge profile for home energy management, fast responding active and reactive power control for the power and distribution grid, and independent power supply at power emergency situation.

研究分野：電力システム工学

キーワード：電気自動車 実証試験 再生可能エネルギー システム統合 低炭素社会システム

# 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

日本、中国、米国では電気自動車、欧州ではプラグインハイブリッド自動車を中心として、電気エネルギーで走行する自動車の世界の販売台数が100万台に達し、2015年末のパリ協定を受けて、2020年代に欧米各国で100万台規模の導入目標も設定されている。電気自動車の普及拡大の流れを受け、太陽光・風力発電など再生可能エネルギーの発電状況に応じてフレキシブルに充電することで、カーボンフリーな走行を実現することが不可欠である。電気自動車の走行距離性能と電池価格低下から電池搭載量は増加する傾向にあり、走行時以外に分散型蓄電池として再生可能エネルギーの変動性(Variability)に対する柔軟性(Flexibility)を提供することで、再生可能エネルギーの導入拡大に貢献することも、電気自動車の新しい価値であり役割となる。

## 2. 研究の目的

電気自動車と再生可能エネルギーのシステム統合のポテンシャルと効果を明らかにするため、再生可能エネルギーが大量導入された電力システムの需給制御モデル、家庭用太陽光発電や電気自動車が導入される住宅周辺を模擬した配電システムモデルと、電気自動車の走行特性を含む実証データを連成させた総合的なシミュレーションを実施する。電気自動車と再生可能エネルギーが電力システム、配電システムに大量導入される条件を大胆に想定し、電気自動車の走行エネルギーが再生可能エネルギー由来となり、かつ、電気自動車の蓄電池としての機能が再生可能エネルギーの導入拡大につながることを示す。電気自動車のフレキシブルな制御として、再生可能エネルギーの発電状況など外部要件に応じて電気自動車を臨機応変に充放電(V2G: Vehicle-to-Grid)制御することとなる。電力システムとの接続や外部から要求される機能を考慮した蓄電池・電力変換・インターフェースの研究が必要となる。分散型蓄電池であるため、多数台制御時のスケラビリティや通信性能も研究課題となる。そこで、電気自動車本体/充電システムを、電力・配電システムモデルを内在したリアルタイムシミュレータに連携させる HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation)を研究室で実施し、これらの研究課題を実験的に解決する。

## 3. 研究の方法

再生可能エネルギーが普及した際の電力システム・配電システム各地点での周波数・電圧品質を模擬する図1(下部)のような評価モデルを利用する。電力システムは電力会社管内の一部地域を模擬した8.3GWの電力需要に対して、2030年目標相当の太陽光発電1.66GWと電気自動車2.88GWの導入割合を想定している。配電システムは、太陽光発電と電気自動車の導入が先行的に進んだ配電フィーダにおける住宅への普及率100%を想定した。

ハードウェア構成は図1(上部)の通りで、リアルタイムシミュレータの中で配電フィーダの末端に研究室が接続されていることを想定した電力システムの実時間演算を行い、接続点の周波数・電圧の品質をパワーアンプで再現し、電気自動車実車と充電スタンドを実際に接続し、電気自動車実車の充放電電力測定値をリアルタイムシミュレータに還すことで、閉ループの実時間試験を実施する HILS 環境を構築している。リアルタイムシミュレータとキャンパス外は汎用のインターネット通信、各種センサからのデータ取得は Modbus、充電スタンドとの通信は ECHONET Lite、そして、充電スタンドと電気自動車車両には CHAdeMO など汎用インターフェースを採用し、柔軟な試験を可能としている。

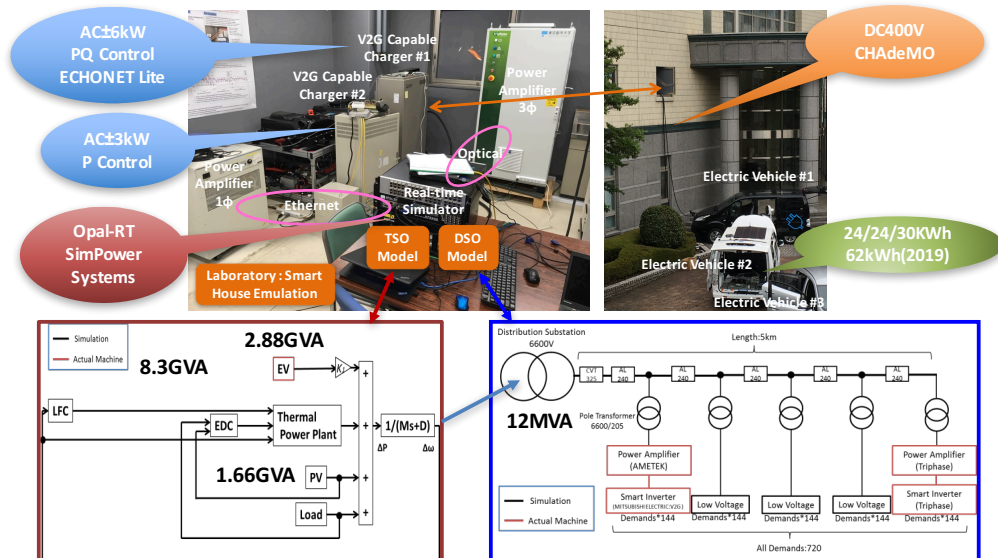


図1. 再生可能エネルギー、電気自動車、電力・配電システムの評価プラットフォーム

図 2 のような研究室の外部のキャンパスの太陽光発電設備や充電スタンドなどのデータ取得も行いながら、通勤・通学を含めた電気自動車の総合試験を実施している。2019 年 10 月の台風被害の関係で 2019 年度内と 2020 年度当初の試験環境構築や試験実施に困難が生じたため、一部試験はシミュレーションによる机上検討にとどめている。

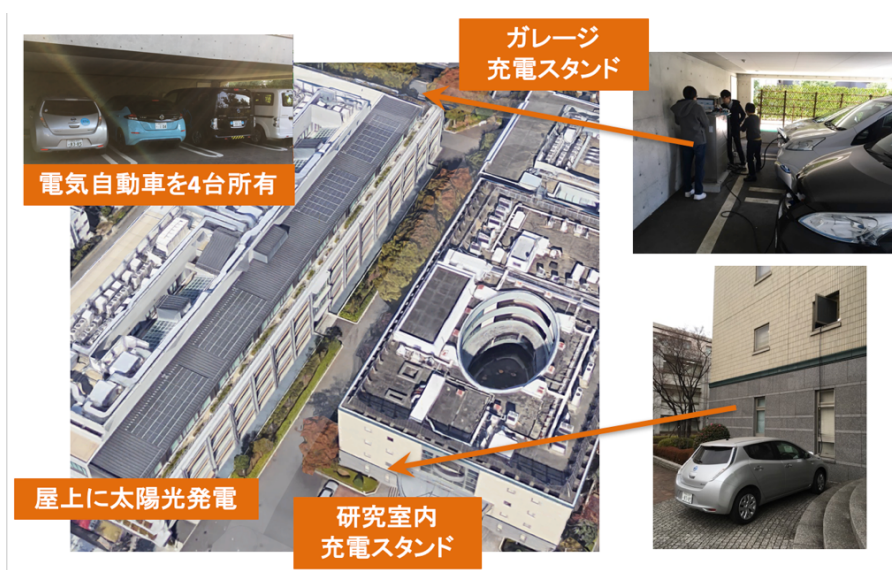


図 2. 研究室外部のキャンパス設備の活用

#### 4. 研究成果

前項の研究設備のシミュレーションと総合試験を通して、電気自動車の再生可能エネルギーからのスマート充電、数十分単位での HEMS(Home Energy Management System)制御、電力系統向け周波数制御、配電系統向け無効電力制御、そして、災害時の自立電力供給、を実証する多様な研究成果が得られている。

##### (1) RE100/EV100 Laboratory のポテンシャル評価

図 2 の左側の講義棟の太陽光発電設備(40kW)から電気自動車ガレージの充電スタンドでのスマート充電、および、図 2 の右側の研究室への放電を行う RE100/EV100 Laboratory のシミュレーション解析と総合試験を実施した。研究室電力需要はおおむね 6kW 以下であり、研究室内充電スタンドでの放電でまかなうことが可能であり、複数台の電気自動車の分散電力貯蔵としての利用方法について研究を行った。

##### (2) HEMS(Home Energy Management System)との協調

名古屋大学のキャンパスとの VPN(Virtual Private Network)による遠隔協調制御試験の環境を構築し、名古屋大学の HEMS による充放電計画にしたがった電気自動車の充放電制御試験を実施した。大学間の通信プロトコル・データフォーマット等を規定して、電気自動車の充放電電力、充電状態、運用状態、位置情報などの情報共有と制御用双方向通信を含むリアルタイム試験を実施し、HEMS 制御に支障の無いことを確認した。

##### (3) 電力系統・配電系統向けアンシラリー・サービスの規定と HILS 試験

電力系統の需給調整サービスとして、需給調整用発電所と協調をとった周波数制御、および、高速応答に特化した自律分散型周波数応答の 2 つの制御手法を設計し、電力系統モデルと電気自動車試験設備を連携した HILS により効果検証した。

配電系統の電圧品質維持サービスとして、配電系統の電圧分布をモデルで考慮することによる DSO(Distribution System Operator)向けの電圧管理手法、および、電気自動車が電圧・無効電力制御を実施する電気自動車アグリゲータ向けである自立分散手法の 2 つの制御手法を設計し、配電系統モデルと電気自動車試験設備を連携した HILS により効果検証した。

##### (4) 災害時の電気自動車からの自立電力供給試験

当初の研究計画には盛り込まれていないが、2019 年 10 月から年末にかけて、台風被害による大学キャンパスの長期停電時に、電気自動車・充電スタンドのソフトウェア調整と、研究室内の電気配線の調整等を万全に重ね、電気自動車からの自立電力供給試験を実施した。述べ数日間の実証結果から、電気自動車バッテリーの運用方法や電気配線の知見などが得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 S. Kamo, H. Toda, Y. Ota, and T. Nakajima	4. 巻 USB
2. 論文標題 Autonomous Voltage and Frequency Control by Smart Inverters of Photovoltaic Generation and Electric Vehicle	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. The 2nd E-Mobility Power System Integration Symposium	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H. Toda, Y. Ota, T. Nakajima, K. Kawabe, and A. Yokoyama	4. 巻 USB
2. 論文標題 Implementation and Verification of V2G Control Schemes on Multiple Electric Vehicles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. The 2nd E-Mobility Power System Integration Symposium	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 太田豊	4. 巻 138
2. 論文標題 電気自動車と電力システムの統合 ~Zero Emission Societyへのチャレンジ~	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気学会誌	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjournal.138.542	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 太田豊	4. 巻 138
2. 論文標題 電力システムにおける電気自動車の活用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気学会電力・エネルギー部門誌	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.138.753	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Ota and T. Nakajima	4. 巻 1
2. 論文標題 Electric Vehicle Charge-and-Share -Campus Demonstration on Sustainable Charge, Energy Mobility and Sharing-	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. The 1st E-Mobility Power System Integration Symposium	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Toda, Y. Ota, T. Nakajima, K. Kawabe, and A. Yokoyama	4. 巻 1
2. 論文標題 HIL Test of Power System Frequency Control by Electric Vehicles	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. The 1st E-Mobility Power System Integration Symposium	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Kamo, Y. Ota, T. Nakajima, K. Kawabe, and A. Yokoyama	4. 巻 1
2. 論文標題 "HIL test on Smart Inverter Control of Photovoltaic Generations and Electric Vehicles	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. The 7th Solar Integration Workshop	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Su, Y. Hu, S. Wang, W. Wang, Y. Ota, K. Yamashita, M. Xia, X. Nie, L. Chen, and X. Mao	4. 巻 1
2. 論文標題 Reactive Power Compensation using Electric Vehicles considering Drivers' Reasons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IET Generation, Transmission and Distribution	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/iet-gtd.2017.1114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 貝塚正明, 立花武, 小坂卓, 道木慎二, 太田豊	4. 巻 139
2. 論文標題 自動車の電動化における最新技術動向	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会産業応用部門誌	6. 最初と最後の頁 535-542
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.139.535	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 太田豊	4. 巻 39
2. 論文標題 電気自動車と再生可能エネルギーと電力システムの統合	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気設備学会誌	6. 最初と最後の頁 24-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14936/ieiej.39.310	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Ota	4. 巻 207
2. 論文標題 Electric Vehicle Integration into Power Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electrical Engineering in Japan	6. 最初と最後の頁 3-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eej.23168	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 太田豊	4. 巻 73
2. 論文標題 電気自動車・電力システムの統合を見据えたエネルギーマネジメントの取組みとキャンパス実証	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 自動車技術	6. 最初と最後の頁 86-91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N. Mizuta, S. Kamo, H. Toda, Y. Susuki, Y. Ota, and A. Ishigame	4. 巻 7
2. 論文標題 A Hardware-In-the-Loop Testing of Multi-Objective Ancillary Service by In-Vehicle Batteries: Primary Frequency Control and Distribution Voltage Support	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 161246-161254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2019.2951748	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Oshikubo, Y. Ota, T. Nakajima	4. 巻 USB
2. 論文標題 Design and Implementation of Integrated V2G Control for House, Building, and Power System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The 3rd E-Mobility Power System Integration Symposium	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 太田豊
2. 発表標題 Energy Connectedな電気自動車が創造する多彩なサービス
3. 学会等名 電気学会自動車/交通・電気鉄道合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 戸田英邦, 太田豊, 中島達人
2. 発表標題 複数台の電気自動車によるV2G制御の実装と検証
3. 学会等名 電気学会自動車/交通・電気鉄道合同研究会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 加茂章太郎, 太田豊, 中島達人
2. 発表標題 配電系統に連系された複数台のスマートインバータによる電圧と周波数制御のHIL試験
3. 学会等名 電気学会自動車/交通・電気鉄道合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ota
2. 発表標題 Grid Integration of EVs for Grid Services
3. 学会等名 IEEE PES General Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ota
2. 発表標題 Vehicle Grid Integration HILs for Designing Vehicle Charging and Grid Ancillary Services
3. 学会等名 International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Super Session : Real Time Simulation(RTS) Technology and Its Application (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ota
2. 発表標題 Vehicle-Grid Integration HIL for Designing Advanced Ancillary Services for Power Systems
3. 学会等名 OPAL-RT 's 9th International Conference on Real-Time Simulation (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 太田豊
2. 発表標題 再生可能エネルギーから充電し、エネルギーを運び、シェアする電気自動車実証プロジェクト
3. 学会等名 電気学会自動車・交通・電気鉄道合同研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加茂章太郎
2. 発表標題 EVのスマートインバータ制御による配電システムの電圧管理の実証試験
3. 学会等名 電気学会自動車・交通・電気鉄道合同研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 戸田英邦
2. 発表標題 電気自動車を用いた電力系統周波数制御の実証試験
3. 学会等名 電気学会自動車・交通・電気鉄道合同研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 太田豊
2. 発表標題 電気自動車と電力システムの統合 ~Zero Emission Societyに向けて~
3. 学会等名 電気学会自動車研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 押久保勇太
2. 発表標題 電気自動車による建物/住宅/電力システムへの放電機能の実現
3. 学会等名 電気学会自動車/交通・電気鉄道合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本桂樹
2. 発表標題 電気自動車を組み込んだ電力管理システムの構築
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 明石典
2. 発表標題 EV社会到来時の配電系統評価用モデルの構築
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----