

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構
築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」
研究課題「エネルギー消費行動の観測と分散蓄電
池群の協調的利用に基づく車・家庭・地域調和型
エネルギー管理システム」

研究終了報告書

研究期間 2015年4月～2020年3月

研究代表者：鈴木 達也
(名古屋大学大学院工学研究科、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

自然条件の影響を強く受ける再生可能エネルギーが大量導入される将来において、発電量の変動を吸収し、需給バランスを適切にとるために蓄電池が果たすべき役割は大きい。このとき、電池の容量・台数・配置の設定、および充放電スケジュールの決定は重要な設計ポイントの一つになる。一方、電気自動車やプラグインハイブリッド車等の電動車両の普及に伴い、これらに内蔵される車載蓄電池を需要家内、あるいはシステムの安定化システムに組み込むことで、より効率的なエネルギーマネジメントが実現される。本プロジェクトでは、電動車両を用いたエネルギーマネジメントに関する諸課題について、(1)データ収集、(2)車利用予測手法の開発、(3)各拠点におけるローカルなエネルギーマネジメント設計、(4)地域やコミュニティにまたがるエネルギーマネジメントの設計、(5)サイバーセキュリティ、の各観点から取り組み、次世代のエネルギーマネジメントとモビリティシステムの融合につながる重要な成果を創出した。

データ収集に関しては、30世帯程度を対象として約2年間にわたり、車の利用と家庭での電力消費の継続的観測を行った。このデータは以後のアルゴリズム開発のベースとなっている。

車両利用予測手法の開発に関して、鈴木グループでは観測された車の使用履歴データをもとに、いつ、どこに向けて出発し、何時に戻るか、を予測するアルゴリズムを時間付きマルコフモデル上で構築した。提案する手法では、車両利用の将来予測に関する最尤推定問題が動的計画法に帰着されて解くことができるため、高速な予測が可能となる。また、この成果を単一の車両ではなく、車群の予測に拡張し、パーソントリップデータを活用してその有用性を検証した。

各拠点におけるローカルなエネルギーマネジメントの設計に関して、鈴木グループではまず、上記の車両利用予測を組み込んだ Vehicle to Home 型の HEMS を提案した。提案した HEMS では、クルマの利用予測に基づいて充放電計画がオンラインで更新され、電気代の削減に大きな効果をもたらす。この成果は IEEE の Trans. on CST 上で公開され、公開後2年足らずで被引用数 20 以上 (Google Scholar 調べ) となっており、注目の高さがうかがえる。また、この成果を拡張し、馬場グループとの連携のもと、電動車両とヒートポンプ給湯器を協調的に利用した HEMS を構築し、その有用性を検証した。ここでは馬場グループで得られたヒートポンプ給湯器の動的モデルが重要な役割を果たしている。また、藤本グループは電動車両に対する路面からのワイヤレス給電の開発に取り組み、その試作結果からワイヤレス給電が社会実装されたときのインパクトを試算し、充放電ステーションが不要となる可能性を見出した。

地域やコミュニティにまたがるエネルギーマネジメントの設計問題では、以下の諸課題に取り組んだ。(a) V2H-HEMS の連携によるコミュニティの電気代削減、(b) 電動車両や V2H-HEMS のアグリゲーションによるアンシラリーサービスへの対応、(c) EV シェアリングとの連携による配電系統電圧の安定化。(a)に関しては、鈴木グループにおいて分散最適化の視点から問題を定式化し、規模の増大に対する計算リソースの分散化、拠点と電動車両との間で電気のやり取りが発生した時の取引価格を合理的に決めることを可能にした。(b)に関しては、米国デラウェア大学の Prof. Kempton の研究グループと連携し、車両を活用したアンシラリー市場への参加形態について先駆的な研究を行った。また、太田グループでは、具体的なアンシラリー信号生成のためのアルゴリズムを開発し、その有用性を検証した。(c)に関しては、薄グループが配電系統の電圧変動解析モデルを構築し、鈴木グループが開発した EV シェアリングにおける車両割り当て、充放電計画と連携させることで、配電系統の電圧変動安定化を考慮した EV シェアリングの運用計画が可能となった。これらの成果は、エネルギーマネジメントとモビリティシステムが融合した次世代のスマートコミュニティデザインの基盤になると期待される。

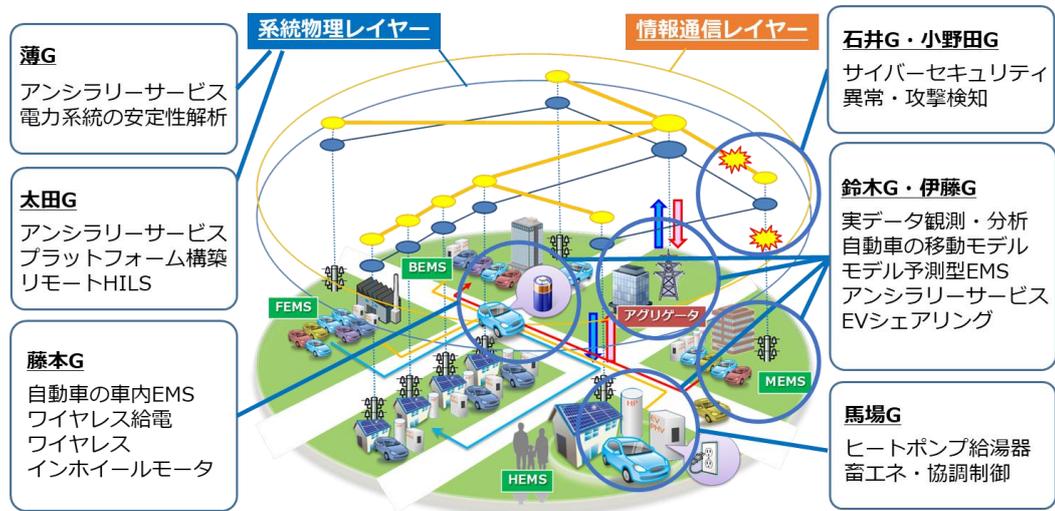
石井・小野田のグループでは、EMS におけるセキュリティ問題に取り組み、データセントリック、およびモデルベースの両着眼点から多くの成果を上げた。

最後に、全グループが協働して、これらの成果を下記の書籍にまとめた (Springer 社)。

Design and Analysis of Distributed Energy Management Systems

-Integration of EMS, EV and ICT-, Edited by T.Suzuki, S.Inagaki, Y.Susuki, A.T.Tran

——鈴木チームが目指すEMSの全体像——



空間的な広がりをもって移動する次世代自動車とその車載蓄電池群を活用したローカルEMS群による車・家庭・地域が調和したエネルギー管理システム

図 1.1: 鈴木チームが目指す EMS の全体像

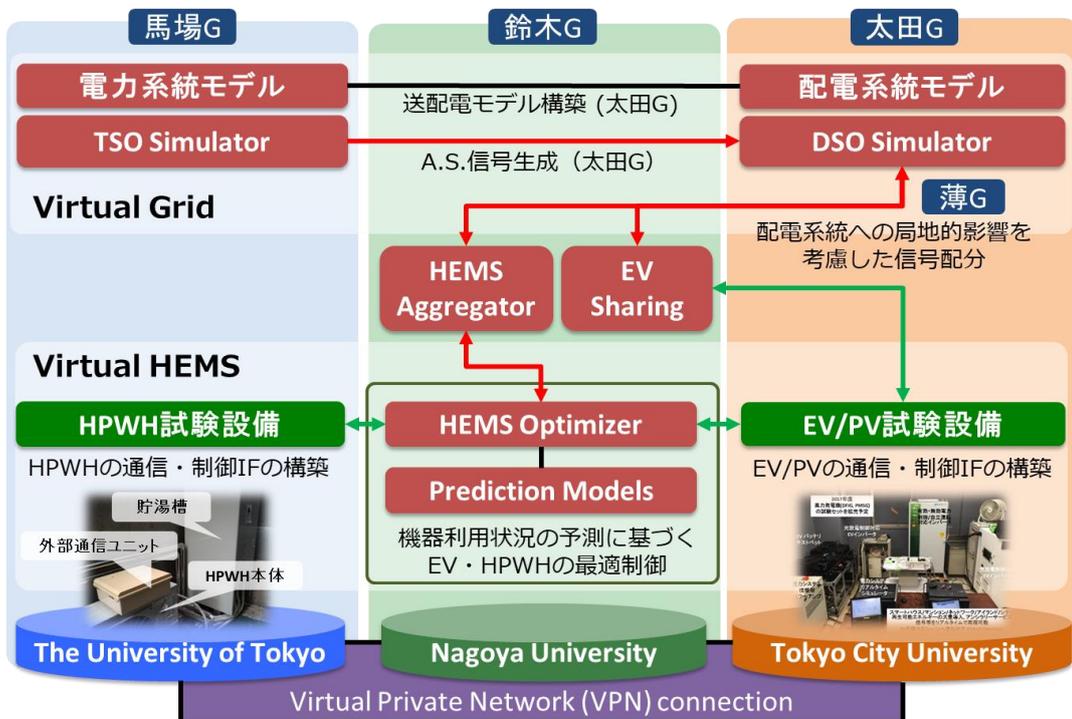


図 1.2: 鈴木チームにおけるシステム構築 (Remote HILS)

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 車の使用予測に基づく車載蓄電池を活用したモデル予測型 HEMS の開発【学術論文】

(鈴木・伊藤グループ)

概要：車載蓄電池を活用した家庭向けエネルギー管理システム(HEMS)のための充放電制御手法を構築した。家庭内での電気機器の使用状態予測と太陽光発電の予測に、独自に開発した車の使用状態予測を組み合わせ、家庭での電気代をリアルタイムで最小化する充放電計画の最適化により、車の使用に関する制約が明示的に考慮された車載蓄電池のモデル予測型充放電制御を実現できる。HEMS のプロトタイプを用いた検証実験により、日本の平均的な家庭において 10%~40%程度の電気代を削減できる可能性があることが明らかになった。

2. 電力システムの状態推定機構に対するセキュリティ向上【学術論文】

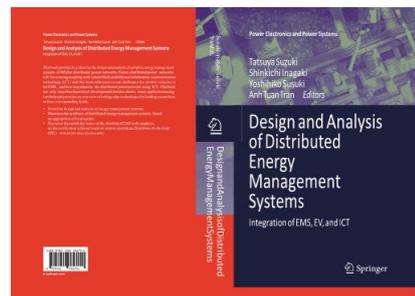
(石井・小野田グループ)

概要：電力システムの安全で効率的な運用に、状態推定機構は不可欠である。しかし、系統の計測情報は送信中にサイバー攻撃を受ける危険性がある。攻撃者がデータを改ざんした場合、推定精度に影響を与え得るが、さらに従来の異常検知では分からないクラスの攻撃が存在する。本研究では、とくに系統のトポロジーや物理パラメータのデータが改ざんされる状況を考えた、そのような悪意性の高いサイバー攻撃を検知し、その影響を抑制するために、ロバスト統計の分野における最小二乗列込み法を適用し、その有効性およびセキュリティ向上のための手段を考案した。

3. Design and Analysis of Distributed Energy Management Systems【書籍】

(鈴木チーム)

概要：電気自動車などの普及に伴い、これらに内蔵される車載蓄電池を駐車時に需要家内、あるいは系統の安定化システムに組み込むことで、より効率的なエネルギーマネジメントが実現される。一方、再生可能エネルギーが大量導入される将来において、発電量の変動を吸収し、需給バランスをとるために蓄電池が果たす役割は大きい。電池の容量・台数・配置の設定、および充放電スケジュールの決定は重要な設計ポイントである。本書は、車載蓄電池をエネルギーマネジメントに使う際に必要な要素技術やそれらのインパクト、今後の可能性について述べた書籍である。(出版社：Springer)



< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 車載蓄電池を活用したモデル予測型エネルギー管理システムに関する特許技術

(鈴木グループ・伊藤グループ)

概要：車載蓄電池を活用したHEMSやBEMS、その実現のために必要な車使用予測モデルといった、ローカルEMSの構築に必要な特許技術と、EMS拠点が多数存在する地域社会をターゲットとして、HEMS群をアグリゲーションするシステムの特許技術を取得した。このHEMSアグリゲーションシステムは、地域の電力系統安定化に貢献するアンシラリーサービスを提供するための要素技術である。ワンウェイ型EVシェアリングにおける車両運用の最適スケジューリング手法を開発し、特許を取得した。これらCRESTの研究成果となる要素技術をもとに、社会実装を視野に入れた民間企業との共同研究への展開が2019年度より開始している。

2. 走行時のワイヤレス給電可能なワイヤレスインホイールモータの開発 (藤本グループ)

概要：藤本グループでは、インホイールモータの動力線等の断線防止のために、ワイヤレス電力伝送と無線通信を用いて電力・制御信号を供給する機構であるワイヤレスインホイールモータ 1 号機を開発した。世界で初めて、この開発に成功した本研究は下記論文において機構の概要及び解析・設計手法、実機実験の結果を報告したところ国際的に高く評価され IEEE Trans. POWER ELECTRONICS の Best Paper Award を受賞することになった。さらに藤本グループでは、現在この成果をさらに発展させ、走行中給電に対応したワイヤレスインホイールモータ 2 号機を開発した。

3. モビリティとエネルギーの統合マネジメント技術 (薄・鈴木グループ)

概要：電力配電網の空間的電圧分布に関する物理モデルと車両運行分布の実測データを組み込んだフレームワークを提案し、EV カーシェアリングの実測データを用いて有効性を示した。これは、超スマート社会の構築に関わるモビリティ・エネルギー統合管理のベースとなる技術であり、本研究の課題であるエネルギーアウェアな EV カーシェアリングシステムという新しいシステム創出につながる成果である。

< 代表的な論文 >

1. Akira Ito, Akihiko Kawashima, Tatsuya Suzuki, Shinkichi Inagaki, Takuma Yamaguchi and Zhuomin Zhou, "Model Predictive Charging Control of In-vehicle Batteries for Home Energy Management based on Vehicle State Prediction", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 26(1), pp. 51-64, 2018.

※概要は<優れた基礎研究としての成果>の 1. に記載の通り。

2. Y. Chakhchoukh and H. Ishii, "Enhancing robustness to cyber-attacks in power systems through multiple least trimmed squares state estimations", IEEE Transactions on Power Systems, 31(6), pp. 4395-4405, 2016.

※概要は<優れた基礎研究としての成果>の 2. に記載の通り。

3. N. Mizuta, Y. Susuki, Y. Ota, and A. Ishigame, "Synthesis of spatial charging/discharging patterns of in-vehicle batteries for provision of ancillary service and mitigation of voltage impact", IEEE Systems Journal, Vol. 13(3), pp. 3443-3453, 2019.

概要：本論文では、車載蓄電池 (EV) 群の協調的利用によるアンシラリーサービス提供に必要な、EV 群に対する充放電指令値の決定アルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは、移動手段としての EV の利用と調和しながら、電力システム運用者に対して周波数ならびに電圧の調整に関するアンシラリーサービスを EV 群から提供することを可能にする。シェアリングとして供された EV 群の実運行データ及び実システムを模倣した配電網モデルを用いて、提案アルゴリズムの有効性を示した。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「鈴木グループ」

研究代表者: 鈴木 達也 (名古屋大学大学院工学研究科 教授)

研究項目: エネルギー消費行動の観測と分散蓄電池群の協調的利用に基づく車・家庭・地域
調和型エネルギー管理システム

② 「伊藤グループ」 ※2015年度～2016年度まで研究参加

主たる共同研究者: 伊藤 章 ((株)デンソー)

研究項目: エネルギー消費行動の観測と分散蓄電池群の協調的利用に関する実証実験

③ 「石井グループ」

主たる共同研究者: 石井 秀明 (東京工業大学情報理工学院 准教授)

研究項目: エネルギーデータと通信データを利用した動的モデルベースによる異常・攻撃検知

④ 「小野田グループ」

主たる共同研究者: 小野田 崇 (青山学院大学理工学部 教授)

研究項目: エネルギーデータと通信データを利用した機械学習に基づく異常・攻撃検知

⑤ 「馬場グループ」

主たる共同研究者: 馬場 旬平 (東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授)

研究項目: 車載蓄電池充放電とヒートポンプ蓄熱の協調制御

⑥ 「藤本グループ」

主たる共同研究者: 藤本 博志 (東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授)

研究項目: ワイヤレス給電を活用した走行時の車内 EMS の設計

⑦ 「薄グループ」

主たる共同研究者: 薄 良彦 (大阪府立大学大学院工学研究科 准教授)

研究項目: 分散車載蓄電池群を活用したアンシラリーサービスの設計

⑧ 「太田グループ」 ※2016年度に⑤馬場グループから独立

主たる共同研究者: 太田 豊 (東京都市大学工学部 准教授)

研究項目: 分散車載蓄電池群を活用した電力システムのアンシラリーサービスの設計とシステム構築

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

「鈴木グループ」

- ・ 米 Delaware 大学, Prof. Willett Kempton
Vehicle-to-Grid (V2G) に関する技術交流
- ・ 米 Clemson 大学, Prof. G. Kumar Venayagamoorthy
エネルギー管理システムのIslandモデルに関する技術交流

「石井・小野田グループ」

- ・ 米 アリゾナ州立大学, V. Vittal, G Heydt

- 送電系統の状態推定において PMU を用いた場合のサイバー攻撃の検知
- 米 アイオワ州立大学, M. Govindarasu
電力システムに対するサイバーセキュリティの教育支援
 - イタリア CNR-IEIIT, Roberto Tempo
マルチエージェント系におけるレジリエント合意
 - 米 ニューヨーク大学, Quanyan Zhu
ゲーム理論的アプローチによるサイバーセキュリティ
 - 中国 香港城市大学, Jie Chen
ネットワーク化制御システムの情報理論に基づく性能限界解析
 - 米アイダホ大学, Yacine Chakhchoukh
電力システムに対するサイバー攻撃の検知システムの構築
 - 米 EPRI, Matt Wakefield
電力系統のサイバーセキュリティ検証のためのテストベッド構築
 - 中国 浙江大学, Jiming Chen, Peng Cheng
機械学習に基づくデータのプライバシーを保護する手法の開発
 - スペイン セビリア大学 Jose M. Maestre
分散型モデル予測制御に対するセキュリティ手法の開発
 - スペイン カタルーニャ工科大学 Carlos C. Ocampo-Martinez
モデル予測制御に基づくマイクログリッド間連携のセキュア化
 - スウェーデン KTH 王立工科大学 Karl H. Johansson, M. Skoglund, H. Sandberg
データ改ざん攻撃に対する制御系のロバスト化のための符号化法の開発
 - オランダ グローニンゲン大学 Pietro Tesi, Claudio De Persis
最小通信量下における遠隔制御系のジャミング攻撃に対する安定性解析
 - ドイツ ベルリン工科大学 Volker Mehrman
大規模ネットワークの構造を利用した分散型アルゴリズム構築
 - ノルウェー SINTEF 研究所 Boye Hoverstad
スマートグリッドにおける制御通信データを用いたセキュリティ対策の検討

「藤本グループ」

- ノルウェー SINTEF, Guidi 博士

「薄グループ」

- SINTEF Energy Research, Norway
洋上風力発電に関する国際共同研究を実施
- The University of California, Santa Barbara
クープマン作用素の応用に関する国際共同研究を実施
- Hong Kong Applied Science and Technology Research Institute
制御システム技術に関する国際共同研究を実施

「太田グループ」

- デンマーク工科大学:VGI(Vehicle Grid Integration)研究の国際拠点
設備情報共有や解析方法の知見を共有
- ニューキャッスル大学:VGI 研究拠点
車載システムの情報収集のノウハウを習得
- 自動車メーカーの研究所
研究に利用した電力系統・配電系統モデルについては、自動車メーカー研究所から引き合いがあり、モデルを利用した共同研究に至っている。