

特集 1

# 電気自動車を電源につながる家庭と地域

環境に優しい次世代自動車として世界的に普及が進む電気自動車（EV）。その蓄電池が家庭や地域をつなぐ電源になると期待されている。移動を伴う蓄電池の充放電をいかに適切に計画し、家庭の電気代の削減や地域全体の利益の最大化に役立てるか。名古屋大学大学院工学研究科の鈴木達也教授は、最適な解を見いだすためのアルゴリズムの開発に挑んでいる。



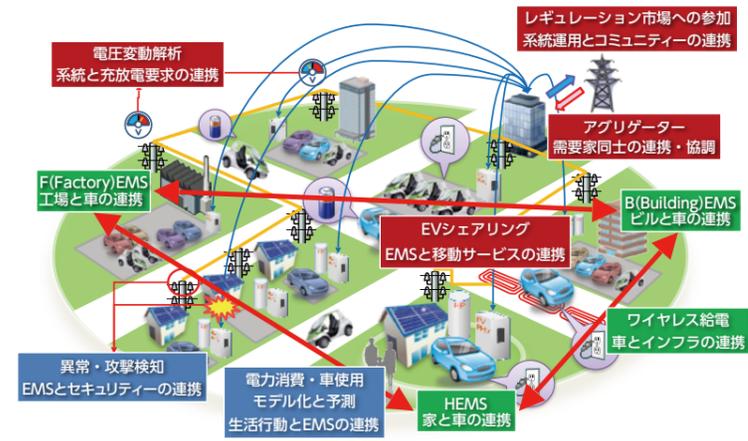
すずき たつや  
**鈴木 達也**  
名古屋大学 大学院工学研究科 教授  
未来社会創造機構モビリティ社会研究所 所長  
2012年よりCREST研究代表者

## 駐車中の車を有効活用 移動する手段から電池へ

自動車業界は100年に一度といわれる変革期を迎えている。その柱の1つである車両の電動化が今、新たなエネルギー・マネジメントシステム（EMS）の未来を拓こうとしている。電気や熱の使用状況を可視化してエネルギーの効率的な利用を図るシステムがEMSだ。一般家庭向けのものを「H（Home）EMS」、地域向けを

「C（Community）EMS」と呼ぶ。HEMSを導入すれば、電気料金が安い日中は太陽光による自家発電に切り替え、夜間に電気を安価に購入して電気代を節約するなど、家庭内で電力を融通できる。太陽光や風力などの再生可能エネルギーは、天候や時間帯によって発電量が大きく変動する。そのため余った電力を蓄電池にためておく必要があるが、定置用蓄電池は高額な上、設置に場所を取る。名古屋大学大学院工

学研究科の鈴木達也教授は、自家用車は1日のうち約9割はどこかに駐車していることに着目した。「電気自動車の保有台数や車載蓄電池の電池容量は年々増えています。車は止まっている時間帯は何の価値も生み出さず、場所を占有しているだけです。これをEMSに使わない手はありません。移動する蓄電池として新たな価値を電気自動車に持たせ、その普及に弾みをつけたいと考えました」。CREST「分散協調型エネルギー管



■図1 「電気自動車を活用したEMSを考える」をテーマとした研究課題の全体像。緑色が局所的なEMS、赤が空間的な広がりを持ったEMS、青がデータや予測に関する課題を示している。車の使用状況を予測し、家庭や地域が調和したモデル予測型EMSを目指す。

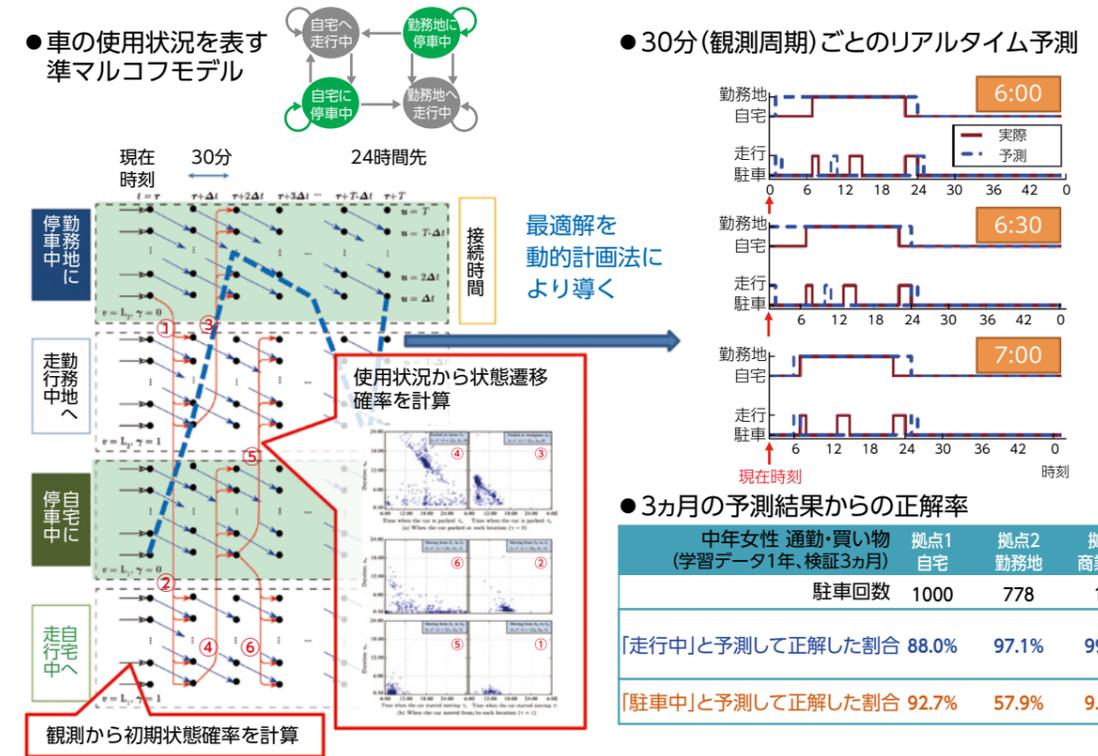
理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」研究領域（研究総括：藤田政之）は、ユニークなチーム編成で運営されている。2012年度に研究領域が発足し、23の小規模なチームで各分野の要素技術の研究を行った。3年かけて異分野との融合を進めて目標を共有し、ステージゲート評価を経て、15年度から5つの

「最強チーム」に再編された。鈴木さんは最強チームの1つを率いる研究代表者として、車載蓄電池を活用して電力を安定供給できるEMSの解析と設計に取り組んだ。移動手段である自動車は複数の場所をつないで回る。「家庭ごとのHEMSにとどまらず、地域のCEMSに発想を広げることで、地域全体に大きな利益をもた

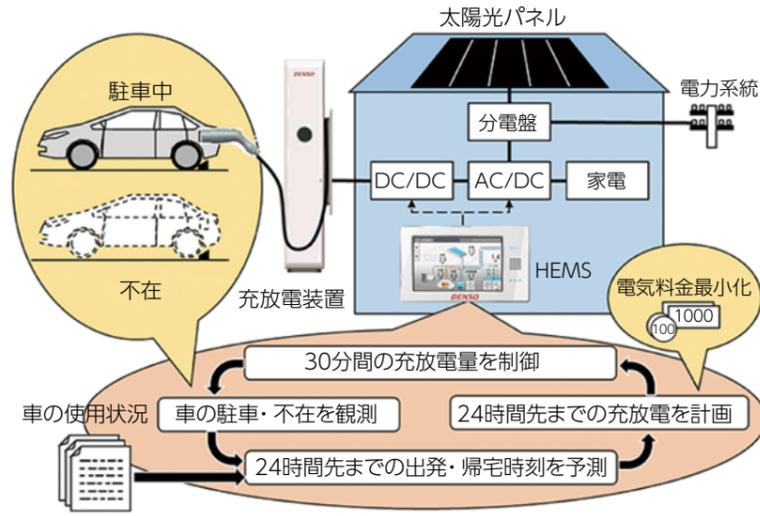
らす可能性を秘めています」。さまざまな場所に駐車されている車載蓄電池を分散型の電源と見なし、最適な運用を目指すことにした（図1）。

## 車使用状況のモデル化 24時間先まで充放電を予測

HEMSの導入による電気代の削減は、電気料金が安い時間帯に車載蓄電池を充電し、電気料金が安い時間帯に家庭に放電することで実現する。車から家庭への放電には、出発時刻と帰宅時刻をあらかじめ入力して、車載蓄電池を十分に充電しておく必要があるが、充電時間を長く見積もり過ぎると、自家発電した電気が無駄になってしまう。車載蓄電池は移動を伴う特殊な電池で、駐車中はHEMSに接続して電池になるが、走行中はHEMSから離脱して電池としては機能しなくなる。車の移動手段としての利便性を損なわずに、家庭内の電力需要に応じて車載蓄電池の充放電を制御する



■図2 (左) 自宅と勤務地の2拠点間の移動を考慮した車の使用予測例。自宅に到着した時刻と駐車時間、勤務地に到着した時刻とそこでの駐車時間、家を出る時刻と勤務地に到着するまでの移動時間、勤務地を出る時刻と家に到着するまでの移動時間の準マルコフモデルを作成し、過去の車の使用状況から出発時刻と帰宅時刻を予想する問題を解いた。(右上)リアルタイム予測例。青の点線は予測、赤の直線は実際の走行パターンを示す。30分ごとに予測を更新するため、一度外れても修正され、予測と実際が一致するようになる。(右下)1年分のデータに基づき、3拠点間の移動を3か月間検証したところ、駐車回数が多い拠点で予測と実際が一致する割合が高かった。



■図3 モデル予測型HEMSは車が駐車しているかかを観測し、観測情報と車の使用状況の統計データに基づいたモデルを用いて、24時間先までの出発時刻や帰宅時刻を予測し、24時間先までの充放電を計画する。

には、車の使用状況を予測することが不可欠だ。

車の使用時間や太陽光発電量、家庭内での消費電力量を統計データに基づいて予測した上で、車載蓄電池の最適な充放電を計画できる手法を確立したいと、鈴木さんは考えた。幸いなことに、小規模チーム時に参画していたデンソー（愛知県刈谷市）が、車の使用状況と家庭内の消費電力量とを連動させた統計データを保有していた。これが予測精度の向上に大いに役立ったという。「問題は、走行データからどのような数理モデルを構築し、予測アルゴリズムを導くかという点でした。車の数や駐車する拠点の数が増えれば増えるほど、最適化問題を解くのに膨大な時間がかかってしまいます」。

そこでひらめいたのが、「準マルコフモデル」と呼ばれる数理モデルを構築する方法だ（図2）。「深層学習を使うことも頭をよぎりましたが、そのためには大量のデータが必要です。問題を準マルコフモデルとして表現することにより、深層学習よりもデータ数が少なく済みます」。車の出発時刻と帰宅時刻および走行中に使用する電力量の予測を、準マルコフモデル上で定式化し、計算量を劇的に低減させるアルゴリズム（動的計画法）を適用した。「少ないデータ数でも、通勤や

買い物で頻繁に行く場所、すなわち駐車回数が多い拠点であれば、車の使用状況の予測問題を非常に短い時間で解けるようになりました」。

鈴木さんは車の使用状況予測を組み込んだモデル予測型HEMSを開発し、24時間先までの車使用状況や移動に使われる電力量、家庭での消費電力量、太陽光発電量の数値をリアルタイムに自動予測することに成功した。これを基に電力需要と車使用の予測モデルを組み立てれば、電気代を最小化する24時間分の車載蓄電

池の充放電を計画できる（図3）。車の使用形態や電気代の価格設定にもよるが、日本の平均的な家庭なら10～40パーセント程度、1日の電気代を削減できる可能性が検証実験で明らかとなった。「ヒートポンプ給湯器と組み合わせれば、電力を太陽光発電で完全に自給自足できるという結論が得られました」。

モデル予測型HEMSは、電力供給の変動にも強靱なEMSを構築するための革新的技術となり、また、車載蓄電池から家庭へ電力を供給するV2H（Vehicle to Home）技術の普及促進にも貢献すると期待されている。

### 分散するEMSが連携地域の電力を安定化

車載蓄電池は、家や勤務地、施設など、これまで別々に運用されてきた複数のEMSの連携を可能にする。鈴木さんは広く地域全体に目を向けて、「複数の電気自動車が増えることを考慮し、分散しているEMSが協調するような充放電計画を設計したい」と語る。

鈴木さんが期待しているのが、地域に点在する車載蓄電池を家庭やビル、工場などの需要家を介して電力システムに接続することで地域の電力を

安定化するV2G（Vehicle to Grid）技術への展開だ。通常、電力システムに電力を流すと周波数が不安定になるが、V2Gでは車載蓄電池を電力システムに直接接続しても周波数を安定に保つことができる。

欧米ではV2Gを活用して、短期間の需給調整を目的にリアルタイムで電力を売買するレギュレーション市場が稼働している。V2Gは日本ではまだ認可されていないが、レギュレーション市場に参画するための日本ならではの方策はないかと、鈴木さんは米国デラウェア大学のウィレット・ケンプトン教授に共同研究を持ちかけた。ケンプトン教授はV2Gの世界的権威で、車載蓄電池を使ったレギュレーション市場を切り拓いてきた。

鈴木さんはV2Gの代わりに、これまで取り組んできたV2Hの電力をたくさん集めることでレギュレーション市場への参画を検討することにした。各家庭から提供もしくは消費可能な電力量を算出し、それに基づきレギュレーション市場に入札する。応札の結果、返ってきたデータを基に、各家庭に最適に電力を分配するアルゴリズムを考案した。

HEMSを導入した200軒の家庭で1週間シミュレーションしたところ、レギュレーション市場に参加した場合に発生する経済的な損失よりも報酬の方が多く、提案手法がビジネスとして成立し得ることが確認されたという。「このような仕組みはV2Gが認められていない国や地域にとって有効であり、波及効果は高いと考えられます。実証実験は始まっており、いずれ当たり前前の技術になっていくと予想されます。今後は、V2Gの規制緩和の動向を見ながら技術の社会展開を検討していく計画です」。

電力システムからの購入価格を地域全体で最小化する課題にも取り組んだ。「余った予算や売電によって得た利益を、公共施設の充実などに役立てることができるでしょう」。そのためには、車載蓄電池が各拠点間で充放電する際の電力価格の設定を考える必要が

あった（図4）。「自宅だけでなく勤務地や商業施設など、さまざまな場所で充放電する可能性があります。例えば勤務地で充放電する場合、電力価格をどのように決定すれば合理的なのか、最適な価格設定を導くアルゴリズムを考案しました」。地域全体の利益を車と拠点の電力取引の価格設定という形に還元できると期待される。

将来、電気自動車は所有のみならず、共同使用の形で普及していく可能性もある。車を予約して使うカーシェアリングは、利用時間や走行距離をある程度事前に予測できるので、EMSへの拡張という点で非常に有効だ。鈴木さんは、シェアリングとの連携によって配電システムの電圧を安定化することにも着手した。この問題はまだまだ完全には解けていないが、配電の運用事業主からシェアリングマネージャーに送った各充電ステーションでの望ましい充放電量の情報を基に、シェアリングマネージャーが各車両に利用予約を割り当てて充放電計画を実行する方法で、配電システムを安定化できると考えられる。

このような電気自動車とEMSが連携した地域設計の仕組みが稼働するようになれば、「AI、IoTなどの新技術やデータを活用したスマートシティの実現に、大きな一歩を踏み出せませ」と鈴木さんは意気込む。

### 分野の垣根を越えて車が生む新たな価値

自動車業界変革のもう1つの柱が車両の知能化だ。「車は今後、電動化に加えて、自動運転に代表される情報通信技術と融合した知能化技術がさらに進み、大きな変化を遂げるでしょう」と鈴木さんは予想する。電気自動車とEMSの新たな連携が分野の垣根を超えて生まれると期待され、異分野の相互理解が欠かせない。

鈴木さん自身、「電気自動車を活用したEMSを考える」というテーマの下、さまざまな領域の専門家が集結した最強チームを率いてきた。V2G、配電システム、ヒートポンプの他、車とインフラの新しい関係である路面からの走行中ワイヤレス給電、ネットワーク化されたEMSへの攻撃や異常を検知するサイバーセキュリティなど、多岐にわたる研究開発を進め、安全で柔軟なEMSの構築を目指す。「こうした異分野融合が図れるのはCRESTならではと感じています」と振り返る。

家や勤務地、施設のEMSと電気自動車との融合は今後ますます進み、これまで接点のなかった人や物を結び付けていく。全てが繋がった時、どのような価値が生まれ、その価値はどのように循環していくのか。鈴木さんの探究は尽きることがない。

#### ● 24時間分の充放電計画問題（主問題）

決定変数	$\{p_h^{EMS}(k,t)\}_{h \in \mathcal{H}, k=t, \dots, T}$ : 拠点 $h \in \mathcal{H}$ に駐車する車両の合計充放電電力 [kw] $\{p_v^{EV}(k,t)\}_{v \in \mathcal{V}, k=1, \dots, T}$ : 車両 $v \in \mathcal{V}$ の充放電電力 [kw]
目的関数 (最小化)	地域のコスト = $\sum_{h \in \mathcal{H}} z_h^{EMS}(t) + \sum_{v \in \mathcal{V}} z_v^{EV}(t)$ = EMSの総コスト(24時間の電気代) + EVの総コスト(電池の劣化)
制約条件	• $p_h^{EMS}(k,t) = \sum_{v \in \mathcal{V}} (1 - \tilde{y}_{h,v}(k,t)) p_v^{EV}(k,t)$ ( $\tilde{y}_{h,v}(k,t)$ : 拠点 $h$ に車 $v$ が駐車、その他1) • 各車、各建物に関する制約

#### ● 双対問題

#### ⇔ 双対定理から等価

決定変数	$\{\lambda_h(k,t)\}_{h \in \mathcal{H}, k=t, \dots, T}$ : ラグランジュ乗数=シャドープライス
目的関数 (最大化)	$\min_{\{p_h^{EMS}(k,t)\}, \{p_v^{EV}(k,t)\}} \left[ \sum_{h \in \mathcal{H}} z_h^{EMS}(t) + \sum_{v \in \mathcal{V}} z_v^{EV}(t) + \sum_{h \in \mathcal{H}} \sum_{k=1}^{t-1} \lambda_h(k,t) \left[ p_h^{EMS}(k,t) - \sum_{v \in \mathcal{V}} (1 - \tilde{y}_{h,v}(k,t)) p_v^{EV}(k,t) \right] \right]$ $= \sum_{h \in \mathcal{H}} \min_{\{p_h^{EMS}(k,t)\}} \left[ z_h^{EMS}(t) + \sum_{k=1}^{t-1} \lambda_h(k,t) p_h^{EMS}(k,t) \right] + \sum_{v \in \mathcal{V}} \min_{\{p_v^{EV}(k,t)\}} \left[ z_v^{EV}(t) - \sum_{h \in \mathcal{H}} \sum_{k=1}^{t-1} \lambda_h(k,t) (1 - \tilde{y}_{h,v}(k,t)) p_v^{EV}(k,t) \right]$
制約条件	• 各車、各建物に関する制約

■図4 電力システムからの購入価格を地域全体で最小化するという評価関数の下、その双対問題を考えることで合理的に最適な価格設定を導くアルゴリズムを考案した。双対問題は主問題と対になる問題であるため、2つの問題の最適値は等しくなる。



「電気自動車を活用したEMSを考える」ことを軸に、多様な研究分野の専門家が集結した最強チーム