

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「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の設計」

## 研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成27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

本チームでは、申請課題に対して鈴木グループ(名古屋大学:以下、鈴木 G)と金森グループ((株)デンソー:以下、金森 G)が共同で取り組み、以下の成果を得た。

#### 【成果 1】 実データの計測・整理 (鈴木 G、金森 G)

豊田市の実家庭(67 世帯)の協力のもと、データ(消費電力、車の使用、太陽光発電量、電力購入量)を 2.5 年間(H24.10~H27.3)に渡り取得し(金森 G)、本プロジェクトで提案する EMS の検証、および電力需要と車の使用に関するモデル化・予測手法の検証に用いた(鈴木 G)。車の使用に関しては別途 30 台のデータを GPS データと併せて 2.5 年間に渡って取得し、データベースの充実を図った(鈴木 G)。

#### 【成果 2】 車載蓄電池を考慮したモデル予測型 HEMS の定式化 (鈴木 G)

家庭において接続と離脱を繰り返す車載蓄電池を明示的に考慮し、24 時間先までの電気代を最小化する蓄電池の充放電計画問題を定式化した。定式化された問題は混合整数計画問題となるが、実時間で実行可能(2~3 分)であることを示した。提案手法を導入しない場合と比べて 30~50%程度の電気代削減効果(車の接続時間に依存)があることを確認した。

#### 【成果 3】 AR モデルによる電力需要のモデル化と世帯のクラスタリング (鈴木 G)

モデル予測型 HEMS では家庭内の電力需要をオンラインで予測する必要があるため、AR モデルを用いた需要予測モデルを構築した。また、電力需要は、家庭の行動様式による影響を強く受けるため、モデルパラメータを特徴量としたクラスタリングにより世帯の分類を行った。

#### 【成果 4】 統計データに基づく車使用時系列の予測 (鈴木 G)

モデル予測型 HEMS では車の使用(出発・帰宅時刻、走行距離)時系列を実時間で予測する必要がある。これは車載蓄電池を活用した HEMS における本質的課題であり、24 時間先までの出発・帰宅時刻を求める組み合わせ最適化問題として定式化した。本プロジェクトでは、Greedy な解探索アルゴリズムとセミマルコフモデルと動的計画法を組み合わせた解法を提案し、70~80%程度の予測正答率を達成した。

#### 【成果 5】 プロトタイプ試験機による HEMS の検証実験 (金森 G)

提案するモデル予測型 HEMS を検証するため、プロトタイプ試験機を開発し、提案手法を実装した。プロトタイプでは【成果 2~4】を統合して実装し、かつ様々な誤差要因を想定した実験を行った。いずれにおいても良好な結果が得られたため、実家庭(16 世帯)に提案手法を実装しながら有用性の実証を開始した。

#### 【成果 6】 HEMS アグリゲータとしての地域 EMS (GEMS) の設計 (鈴木 G)

配電系統における電力需給のバランス調整を目的とし、【成果 2】で述べた各世帯の HEMS の最適化プロセスにおいて得られる予測結果に基づいて、各世帯の HEMS に制約条件をフィードバックする HEMS アグリゲータを提案した。提案手法によりピークカットが可能となることをエージェントベースシミュレーションにより検証した。

#### 【成果 7】 HEMS の拡張による BEMS の設計 (鈴木 G)

【成果 2】の車載蓄電池を考慮したモデル予測型 HEMS を拡張し、車載蓄電池群の共有も含めた包括的制御を行う集合住宅向け EMS(BEMS)を設計した。提案手法により、30%程度の電気代削減効果を達成した。

### (2) 顕著な成果

(CREST 研究で得られた最も顕著な成果を<優れた基礎研究としての成果>と<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>各々 3 点まで挙げ、それぞれについて 200 字程度で説

明してください。研究成果の科学技術上のインパクトや国内外の類似研究の研究動向・状況に対する位置づけについても説明してください。成果は論文、特許、試作品、展示などが挙げられます。)

<優れた基礎研究としての成果>

1. 統計データに基づく車使用時系列の予測(鈴木 G)

概要:(200 字程度) モデル予測型 HEMS では車の使用(出発・帰宅時刻、走行距離)時系列を実時間で予測する必要がある。これは車載蓄電池を活用した HEMS における本質的課題であり、24 時間先までの出発・帰宅時刻を求める組み合わせ最適化問題として定式化した。本プロジェクトでは、Greedy な解探索アルゴリズムとセミマルコフモデルと動的計画法を組み合わせた解法を提案し、70~80%程度の予測正答率を達成した。

<関連成果>

1. Takuma Yamaguchi, Maximum Likelihood Estimation of Departure and Travel Time of Individual Vehicle using Statistics and Dynamic Programming, proc. of IEEE Conference on Intelligent Transport Systems, TuD2.3, pp.1674-1679, 2013.
2. Takuma Yamaguchi, Akihiko Kawashima, Akira Ito, Shinkichi Inagaki and Tatsuya Suzuki, Real-time Prediction for Future Profile of Car Travel Based on Statistical Data and Greedy Algorithm, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.8, No.1, 2015 (to appear).

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 車載蓄電池を考慮したモデル予測型 HEMS の定式化とプロトタイプ試験機による検証実験

概要:(200 字程度) 家庭において接続と離脱を繰り返す車載蓄電池を明示的に考慮し、24 時間先までの電気代を最小化する蓄電池の充放電計画問題を定式化した。定式化された問題は混合整数計画問題となるが、実時間で実行可能(2~3 分)であることを示した。提案手法を導入しない場合と比べて 30~50%程度の電気代削減効果(車の接続時間に依存)があることをシミュレーション、および試験機を用いた検証実験により確認した。

<関連成果>

1. Takuma Yamaguchi, Masahiro Sumiya, Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki, Akira Ito, Mitsuru Fujita, and Junichiro Kanamori, Model Predictive Control of Car Storage Battery in HEMS Considered Car Traveling, proc. of SICE Annual Conference, MoAT15.3, pp.1352-1358, 2013.
2. Akira Ito, Optimal Energy Storage Management in DC Power Networks, proc. of IEEE SmartGridComm 2013, STO1.1, pp.630-635, 2013.
3. POWER SUPPLY SYSTEM、発明者:伊藤章, 金森淳一郎, 藤田充, 鈴木達也, 稲垣伸吉, 山口拓真, 角谷匡広、出願人:株式会社デンソー, 国立大学法人名古屋大学、出願日:2013 年 1 月 24 日、出願番号:2013/0024035、出願国:アメリカ
4. POWER SUPPLY SYSTEM、発明者:伊藤章, 金森淳一郎, 藤田充, 鈴木達也, 稲垣伸吉, 山口拓真, 角谷匡広、出願人:株式会社デンソー, 国立大学法人名古屋大学、出願日:2013 年 1 月 24 日、出願番号:DE102012212878A1、出願国:ド

## 2. HEMS の拡張による BEMS の設計

概要: (200 字程度) 車載蓄電池を考慮したモデル予測型 HEMS を拡張し, 車載蓄電池群の共有、建物内世帯間の電力融通を含めた包括的制御を行う集合住宅向け EMS(BEMS)を設計した。提案手法により、30%程度の電気代削減効果を達成した。

<関連成果>

1. Akihiko Kawashima, Takuma Yamaguchi, Ryosuke Sasaki, Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki and Akira Ito, Apartment Building Energy Management System in Group Optimization with Electricity Interchange Using In-Vehicle Batteries, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.8, No.1, 2015 (to appear).

## § 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

##### 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
鈴木 達也	名古屋大学 大学院工学研究科	教授	H24.10～
稲垣 伸吉	同上	講師	H24.10～
田崎 勇一	同上	助教	H24.10～
川島 明彦	同上	研究員	H25.5～
奥田 裕之	名古屋大学グリーンモビリティ連携研究センター	助教	H24.10～
Blaine Levedahl	名古屋大学国際交流協力推進本部 (G30)	准教授	H26.5～
山口 拓真	名古屋大学未来社会創造機構	D2～3	H24.10～H26.3
角谷 匡広	名古屋大学大学院工学研究科	M1～2	H24.10～H25.3
佐々木 良平	同上	B4, M1～2	H24.10～
佐々木 勇介	同上	M1	H26.4～
姚 弋超	同上	M1	H26.4～

##### 研究項目

- ・ 車載蓄電池を考慮したモデル予測型 HEMS の定式化
- ・ AR モデルによる多様な状況下での電力需要予測とモデルに基づく世帯の分類
- ・ 統計データと機械学習的アプローチによる車使用予測
- ・ HEMS 間の合意形成を実現する CEMS の設計

#### ② 金森グループ

##### 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
金森 淳一郎	株式会社デンソー	室長	H24.10～
藤田 充	同上	課長	H24.10～
伊藤 章	同上	担当係長	H24.10～

##### 研究項目

- ・ 車載蓄電池を活用したエネルギー管理システムのプロトタイプ構築と検証
- ・ モデル予測型 HEMS の要件定義と制約条件の導出

(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  
(研究チーム外での連携や協働についてご記入ください。ライフ分野では臨床医等を含みます。)

FSでの活動を通して、同領域内のいくつかの研究チームと連携を深めた。また、計測自動制御学会主催の国際会議 SICE Annual Conferenceやシステム・情報部門におけるスペシャルセッションの企画等により、領域外の関連研究者との連携をも深めた。さらには米国のデラウェア大やMITメディアラボとも交流を進め、より緊密な連携を実現する足掛かりを得た。

## § 3 研究実施内容及び成果

### 3. 1 実データの計測・整理（鈴木 G、金森 G）

豊田市の実家庭 67 世帯において HEMS の設計に必要な基礎データを入手した。具体的には、表 3.1-1 のように、世帯毎の消費電力、太陽光パネル発電量、電力売買量、自動車の接続・離脱時刻などのデータである。一般家庭 67 世帯のこれらのデータの他に、小学校やコンビニエンスストアのデータも取得した。これらのデータは本研究で提案する HEMS の検証のみならず、CEMS を検証する際のエージェントの作成にも使われる。

本研究で重要となる車の使用状況については実証プロジェクトとは別に、「鈴木」グループが自動車 30 台分の被験者を対象として別途データを取得し、データベースの充実をはかった(図 3.1-1)。H26 年度末までに約 2 年間のデータを獲得したことになる。これらのデータは車使用の予測モデルの検証に用いると共に、祝祭日や季節の変動に対する予測モデルの適応化といったモデルの改良にも使う予定である。

豊田市の実家庭 16 世帯に対して本 HEMS の実装を行い、データの取得を開始した。居住者のアンケート結果や HEMS の効果などのデータを利用できる予定である。これらのデータを元に本 HEMS に対する利用者の受容性を評価した。

表 3.1-1 豊田市の実家庭における電力消費および車用に関する取得データ

豊田市の実家庭データ	67 世帯
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <u>設備構成</u>                      全家庭共通：オール電化、太陽光パネル（3～5kW）、蓄電池（5kWh）、PHV                      一部家庭のみ(30 軒程度)：燃料電池、V2H (Vehicle to Home) 対応充電スタンド</li> <li>● <u>取得データ</u>：世帯毎の消費電力（総消費/分電盤毎）、太陽光パネル発電量、電力売買量、PHV の接続・離脱時刻、PHV 内蔵電池の状態、給湯量、水道使用量など</li> </ul>	
車の使用データ：「鈴木」グループが取得	30 台
<ul style="list-style-type: none"> <li>● <u>被験者構成</u>：若年層～高年層、1～6 人家族、二世帯家族、二台以上の車保有家族など</li> <li>● <u>取得データ</u>：自動車での出発時刻・帰宅時刻、走行距離、車の使用目的</li> </ul>	

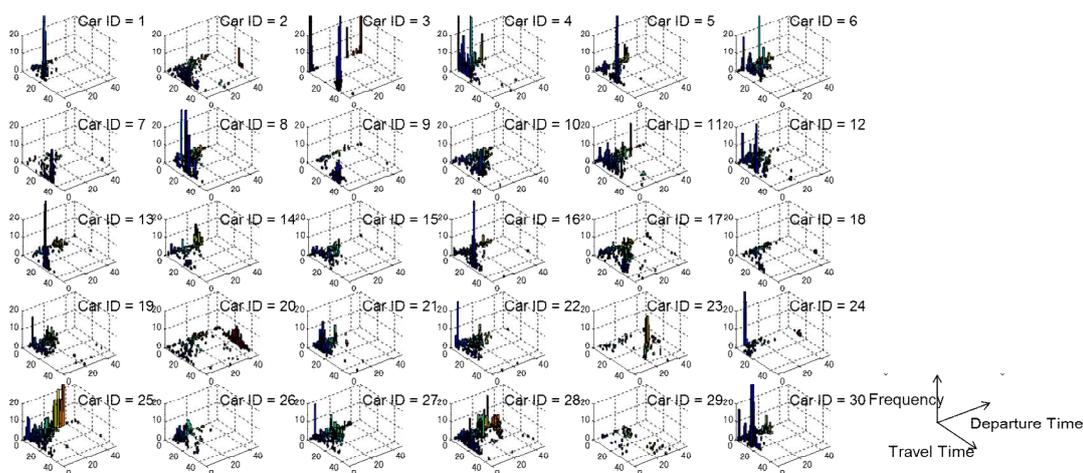


図 3.1-1 車 30 台分の使用状況のデータ（度数分布）

### 3. 2 車載蓄電池を考慮したモデル予測型 HEMS の定式化とシミュレーションによる検証 (鈴木 G、金森 G)

車載蓄電池を用いた HEMS において電気料金を最小化する問題を、車載蓄電池の接続と離脱を明示的に考慮した有限時間区間での混合整数計画問題として以下のように定式化した。

既知変数:

$$\{\tilde{W}^+(k|t), \tilde{W}^-(k|t), \tilde{\gamma}_j(k|t), f^+(k), f^-(k), B_j^{v,init}, B_j^{v,cons}(k|t), B_j^{v,min}(k)\}_{k \in \{t, \dots, t+T-1\}}$$

決定変数:

$$\{p_j^v(k|t)\}_{k \in \{t, \dots, t+T-1\}}$$

目的関数:

$$z = \sum_{t=1}^{t+T-1} F(k)\tilde{W}(k|t)\Delta t, \quad F(k|t) = \begin{cases} f^+(k) & \text{if } \tilde{W}(k|t) \geq 0 \\ f^-(k) & \text{if } \tilde{W}(k|t) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

制約条件:

$$\forall k \in \{t, \dots, t+T-1\},$$

$$\tilde{W}(k|t) = \tilde{W}^+(k|t) + \eta^{pv}\tilde{W}^-(k|t) + \eta^{acdc} \sum_{j=1}^N p_j^v(k|t) + P^{standby}, \quad (2)$$

$$\tilde{W}(k|t) \leq W_{\max}, \quad (3)$$

$$p_j^v(k|t)\tilde{\gamma}_j(k|t) = 0, \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^{t+T-1} \tilde{W}(k|t)\Delta t \leq J_{\max}, \quad (5)$$

$$\tilde{W}^+(k|t) + \eta^{acdc} \sum_{j=1}^N p_j^v(k|t) + P^{standby} \geq 0, \quad (6)$$

$$P_j^{v,dis} \leq p_j^v(k|t) \leq P_j^{v,char}, \quad (7)$$

$$B_j^{v,min}(k|t) \leq b_j^v(k) \leq B_j^{v,max}, \quad (8)$$

$$b_j^v(k+1|t) = b_j^v(k|t) + \{1 - \tilde{\gamma}_j(k|t)\} \times H p_j^v(k|t)\Delta t - \tilde{\gamma}_j(k|t)\tilde{B}_j^{v,max}(k|t), \quad (9)$$

$$H = \begin{cases} \eta^{char} & \text{if } p_j^v(k|t) \geq 0 \\ \eta^{dis} & \text{if } p_j^v(k|t) < 0 \end{cases}$$

符号	変数/パラメータ	単位	符号	変数/パラメータ	単位
$\tilde{W}^+(k t) \geq 0$	電力使用量予測	W	$B_j^{v,max} > 0$	車載蓄電池容量	Wh
$\tilde{W}^-(k t) < 0$	太陽光発電量予測	W	$B_j^{v,min}(t) \geq 0$	車載蓄電池最低残量	Wh
$\tilde{\gamma}_j(k t) \in \{0,1\}$	車両接続有無 1:接続、0:離脱	—	$B_j^{v,init} \geq 0$	初期蓄電量	Wh
$f^+(t) > 0$	買電単価	Yen/kWh	$B_j^{v,cons}(t) \geq 0$	E V 走行消費電力量	Wh
$f^-(t) > 0$	売電単価	Yen/kWh	$p_j^v(k t) \geq 0$	車載電池充放電電力	W
$W_{\max} > 0$	最大瞬間電力	W	$\eta^{acdc}$	電力変換器の変換効率	—
$J_{\max} > 0$	最大積算電力量	Wh	$P^{standby}$	電力変換器の待機電力	W
$P_j^{v,char} > 0$	最大充電電力	W	$\eta^{char}$	車載蓄電池充電効率	—
$P_j^{v,dis} < 0$	最大放電電力	W	$\eta^{dis}$	車載蓄電池放電効率	—
$b_j^v(k)$	車載蓄電池蓄電残量	W			

現行の電気事業法では、蓄電池から系統電力網への逆潮流が禁止されている。また、実システムでは機器の変換効率や待機電力などの特性が無視できない。これら実運用する上で考慮すべき事項を制約条件に盛り込み(上記(2)、(5)、(9)式参照)、より実用的な定式化を行った。

以下ではシミュレーションにより、①効果の予備検証、②計算量評価、③モデル予測制御(MPC)の制御周期の影響、の3点を検証した。なお、太陽光発電量については、実績と予測を一致すると仮定した(図3.2-1)。買電単価は電力会社の料金プランを参考に3段階料金体系とし、売電単価は48yen/kWhとした(図3.2-2)。

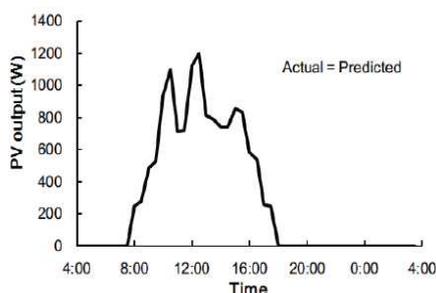


図 3.2-1 太陽光発電量 (予測=実績)

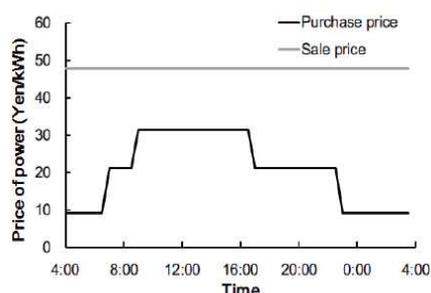


図 3.2-2 買電と売電単価

#### ① シミュレーションによる HEMS 効果の予備検証

AR モデルによる電力使用量の予測と Greedy アルゴリズムによる車両使用の予測結果を、図 3.2-3 と図 3.2-4 に示す。電力使用量、車両の使用予測ともに、モデル予測制御と同一の周期で現在の消費電力や車両の接続情報に基づいて予測を更新するため、時刻の経過に伴い予測精度が向上していることがわかる。

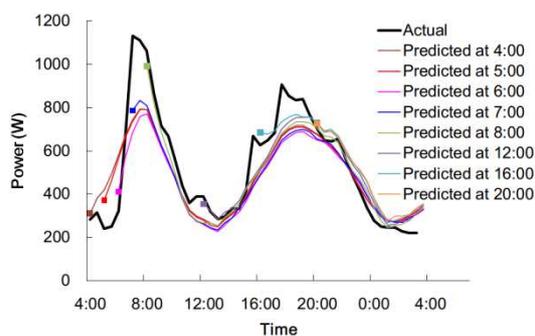


図 3.2-3 家庭電力使用量実績と予測

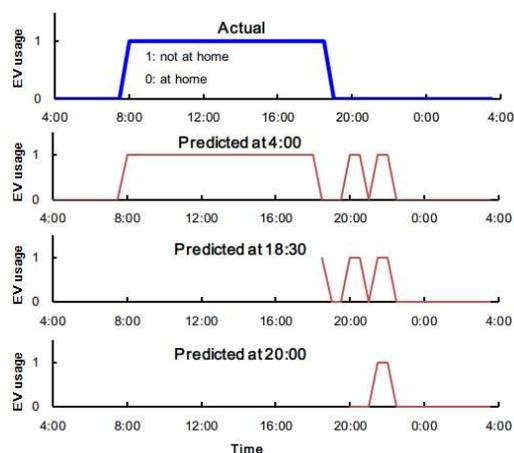


図 3.2-4 EV使用実績と予測

上記予測結果に基づき、最適化問題の求解、車載蓄電池の充放電を実行した結果を図 3.2-5 に示す。縦軸のプラス側が電力消費であり、マイナス側は電力供給を意味している。車載蓄電池は買電単価の安い時間帯(2:30-4:00)に充電し、買電単価の高い時間帯(7:00-8:00、18:30-20:00)に放電するように計画され、実行されている。

本手法による電気料金削減効果を図 3.2-6 に示す。車載蓄電池を EMS で利用しない場合に比べ、利用した場合の 1 日電気料金は、車両の接続時間が 55% (13 時間)、75% (18 時間) の場合に対し、各々 27%、52% の削減を達成した。接続時間が長いほど、EMS の需給調整に車載蓄電池が活用できる機会が増すため、削減効果が高いことが確認できた。予測、最適

化、充放電実行の一連の手順が、モデル予測制御の周期に対し十分余裕のある時間内で実行できており、提案手法の実現可能性が証明できた。

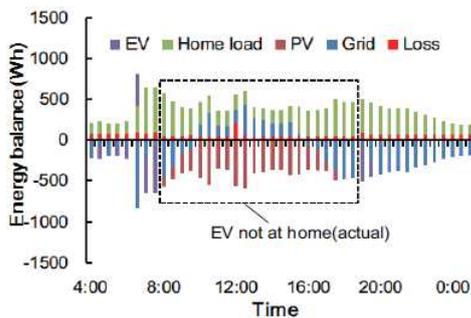


図 3.2-5 車載電池充放電計画と実績

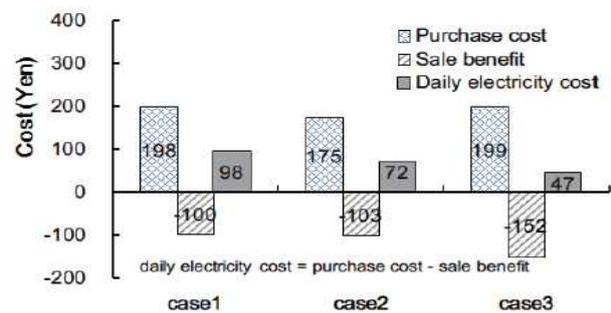


図 3.2-6 1日の電気料金比較(Case1:車載蓄電池利用せず、Case2:車両接続時間 55%、Case3:車両接続時間 75%)

## ② 計算量評価

MPC の制御周期に対する最適化演算時間を以下の表にまとめる。各制御周期での演算時間は制御周期に比べて十分短く、いずれも実用上許容できる演算時間と言える。

制御周期(min)	15	30	60
計算時間(s)	6	4	3

## ③ MPC の制御周期の影響

MPC 制御周期を 15 分、30 分、60 分に設定した場合の 1 日の電気料金を図 3.2-7 に示す。各制御周期間でシミュレーションと実機の結果に大きな差異が見られない。蓄電池充放電特性に基づく蓄電池モデル(9)式を最適化演算に導入したことにより、蓄電池 SOC のモデルと実測値との誤差が大幅に減少したため、SOC フィードバック効果が顕著に表れなかったことが原因と考えられる。一方、本検証では考慮しなかった太陽光発電量の変動の大きさを考えると、より短い周期で現状を把握して予測値、充放電計画を更新することが望ましいと考えられる。今後の課題として、太陽光発電量の変動に対する制御周期の効果検証が挙げられる。

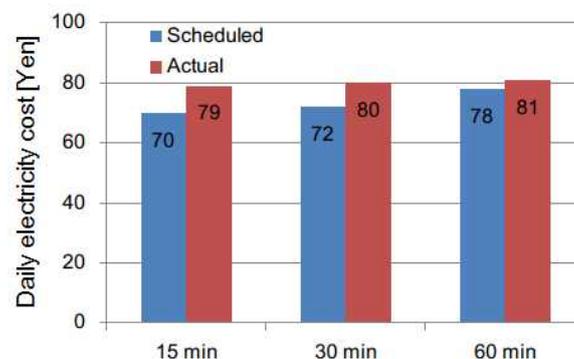


図 3.2-7 MPC制御周期と電気料金削減効果の比較

### 3. 3 ARモデルによる電力需要のモデル化と世帯のクラスタリング (鈴木 G)

EMS の効果検証においては、車と電力を需要する仮想エージェントを現実的な構成比で多数用意する必要がある。しかし、実測データが得られる需要家の数には限りがあり、多様性を持った仮想エージェント群を用意することは容易ではない。そこで、実測した車の利用や電力消費パターンから特徴量を抽出し、それら特徴量を類型化することで分類毎の特徴と分類の構成比を明らかにすることで、分類に基づいた仮想エージェントを作成することを目指す。電力需要については、①実測データより同定した AR (Auto Regressive) モデルの係数を特徴量として用い、階層的クラスタリングにより類型化する手法、②特徴量として時刻毎の消費電力量の確率分布を使い、階層的クラスタリングを用いて類型化する手法、を用いた。また、車の使用については、③特徴量として出発時刻と使用時間の確率分布を用い、階層的クラスタリングを用いて類型化する手法を試みた。

### 3. 4 統計データに基づく車使用时系列の予測 (鈴木 G)

統計データに基づいた 1 日における車使用时系列の予測問題を定式化し、二種類の解法を提案し、検証を行った。図 3. 4-1 に 24 時間先までの車使用の予測問題を示す。この最適化問題は組合せ最適化問題であり、全探索で解いた場合最適解を得るために多大な時間を必要とする。したがってこの問題を直接解いてしまうと各時刻において変化する車使用の変化に対応することが出来ず、最適解を高速に予測することが可能なアルゴリズムを構築する必要があった。そこで本プロジェクトでは、この予測問題の解法として ① 貪欲法に基づく準最適解の探索アルゴリズム、および ② 動的計画法による最適解の高速解法のアプローチをそれぞれ提案した。そして車使用の実データを用いてそれぞれの手法を検証し、各手法が有効に機能することを示した。さらに本年度は、③ 複数の目的地間における車の走行を考慮した車使用の予測手法を提案し、複数の EMS における蓄電池の共有を可能にした。

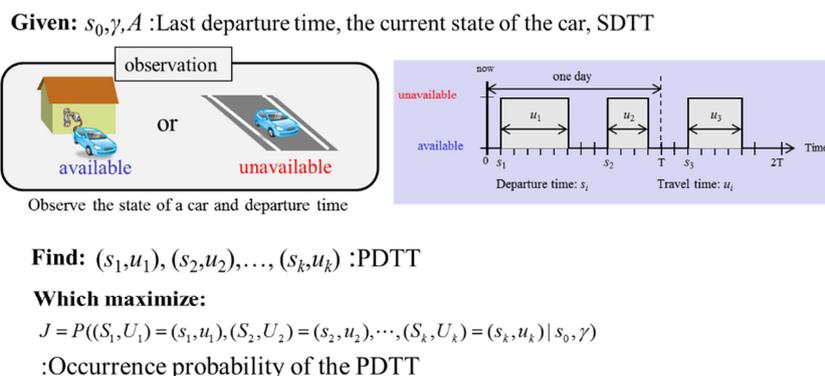


図 3. 4-1 24 時間先までの車使用の予測問題

#### ① 貪欲法に基づく解法

組合せ最適化問題の準最適解を高速に得ることを目的とし、Greedy な解探索アルゴリズムを提案した。図 3. 4-2 に探索アルゴリズムの概要を示す。車使用の統計を左上図に示すような出発・到着時刻に関する度数分布表として集計し、出現頻度の高い出発・到着時刻の組を順番に抽出していくことで 24 時間後までの車使用を効率的に予測する。

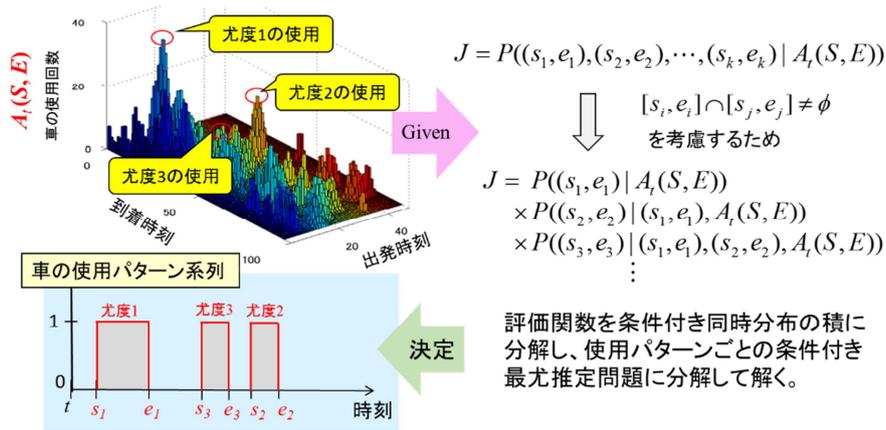


図 3.4-2 貪欲法に基づく最適解の探索アルゴリズム

② 動的計画法による解法

1日の車使用を確率モデルにより表現し、動的計画法を適用することで最適解を高速に求める予測問題の解法を提案した。図 3.4-3 に車使用を表すセミマルコフモデルの概要を示す。モデルにおける状態は家に戻るまでの時間（ステップ）を表す。過去の車の使用履歴と現在時刻における観測情報をもとにセミマルコフモデルの状態遷移確率および初期状態確率を計算し、現在時刻から24時間後までの車使用を表す確率モデルを作成する。作成したモデルに対し動的計画法を適用し、最適な状態系列を求めることで未来の車使用を高速に予測する。

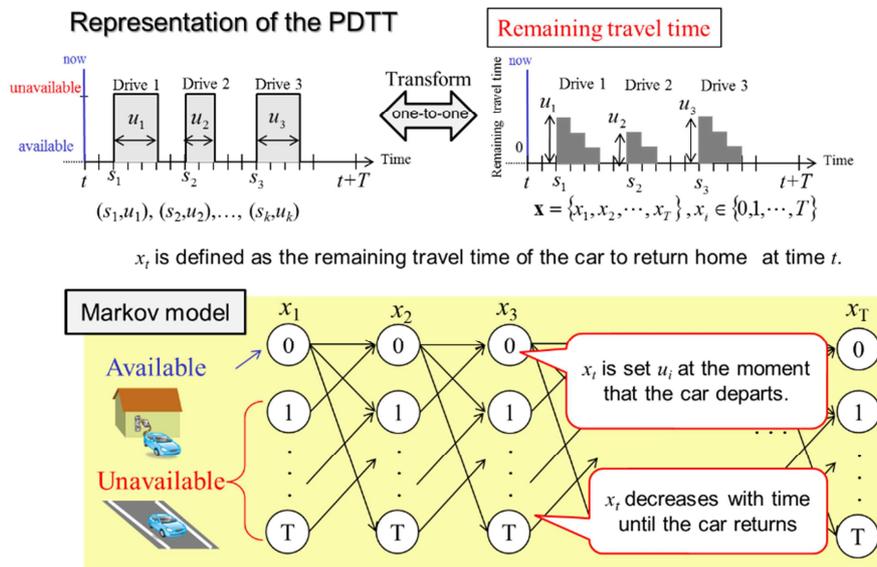


図 3.4-3 セミマルコフモデルによる車使用のモデル化の概要

3.1節により得られた実データを用いて、動的計画法による高速解法の評価を行った。図 3.4-4 は60代女性の255日間に渡る車の使用データに対し、動的計画法により24時間分の車使用の予測を30日間行った結果である。右上図が255日間の車使用状況における統計データ、左図がある日時における30分刻みの予測の移り変わりである。この例では約86%の精度で予測でき、また1回の予測は十分短い時間（50msec）で行うことが出来た。なお、

Greedy な解法を用いた場合でもほぼ同様の精度が得られた。

### ③ 複数の目的地に対応した車の使用予測

一昨年度に提案した動的計画法による予測手法を拡張し、複数の目的地間における車の移動を考慮した車使用の予測問題を定式化した。図 3. 4-5 に複数の目的地に対応した車使用モデルの概要を示す。この場合、車使用として自宅と勤務地に頻繁に停車する場合を表している。この確率モデルは一昨年に提案した予測手法における車使用モデルの拡張となっており、動的計画法を適用することで最適解を高速に求めることが可能である。また、各時刻における停車地点を利用することができるため、その情報に基づき各時刻における予測を更新することで停車地点を予測に反映することが可能になった。

3. 1 節に示した車の使用データを用いて本手法の評価を行った。図 3. 4-6 は通勤で車を使用することが多い被験者の走行履歴に対し 24 時間の車使用予測を 1 ヶ月行った時の予測の移り変わり (左図)、および正答率 (右下図) である。また、図中右上は被験者の走行履歴をもとに作成した各出発地点と到着地点における出発時刻・走行時間の度数分布表を表している。予測の移り変わりをみると、車の走行状態だけでなく未走行時の停車地点を取得することができ、その情報を元に予測結果を更新することが出来ていることが確認できる。これにより、自宅以外における車の使用状況についても予測することが可能になったことが示された。今後は曜日や使用目的など各走行における観測情報を用いることでより適応的なモデル構築を可能にし、予測精度の向上を図る。また、本手法を HEMS に組み込み複数の EMS 間における車載蓄電池の共有を可能にした EMS の蓄電池運用手法を定式化し、その検証を行う予定である。

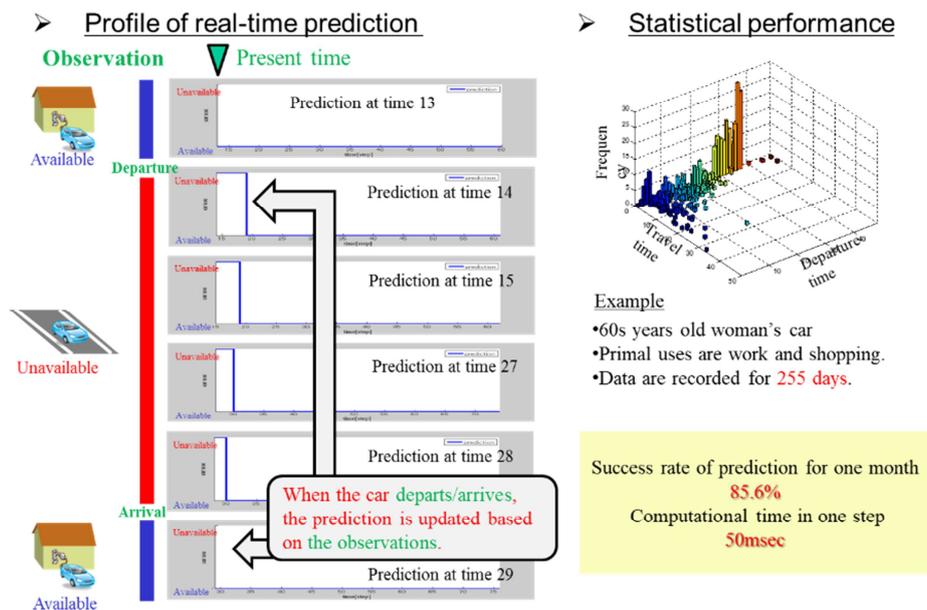


図 3. 4-4 動的計画法に基づく車使用予測の結果



図 3. 4-5 自宅と勤務地間の走行を考慮した車使用モデルの概要

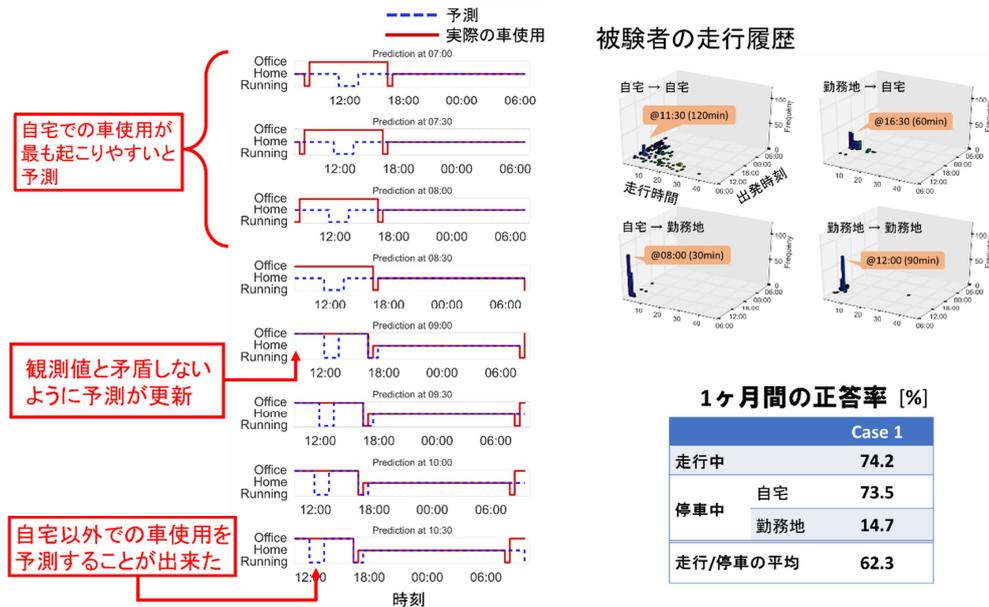


図 3. 4-6 複数の地点を考慮した場合の予測結果

### 3. 5 プロトタイプによる実機検証と実家庭への実装 (金森 G)

標準家庭の1/3の電力仕様で図3.5-1に示すHEMS検証実験用プロトタイプ試験機を構築し、3.2で開発した制御手法を実装し、以下の項目を実施した。

- ① 電力変換器入出力と蓄電池充放電特性に基づくモデルの構築と精度検証
- ② MPCによるロバスト性向上効果
- ③ 車載電池容量増加による電気料金削減効果

④ 実家庭での実証試験



図 3.5-1 HEMS 検証実験用プロトタイプ試験機

① 電力変換器入出力特性と蓄電池充放電特性モデルの構築と精度検証

電気回路の挙動や化学反応に基づいて詳細モデルを構築する方法も考えられるが、モデルが複雑になり、最適化問題への組み込みが困難である。目的を達成するために本質的に必要な情報は、入出力特性であり、極力単純なモデルで入出力特性を表現することを目指す。

モデル構築に際し、電力変換器は、図 3.5-2(a)に示すように AC/DC、DC/DC を一つの電力変換器とみなし、 $P_{ac}$  と  $P_{dc}$  間の入出力特性を考える。一方、蓄電池の充放電を担う DC/DC は、負荷による電圧変動が少ないため、図 3.5-2(b)に示すように、蓄電池と DC/DC 間の電力  $P_{in}^{batt}$ 、または  $P_{out}^{batt}$  が、計画値  $P_j^v(k|t)$  と一致するように制御している。計画値  $P_j^v(k|t)$  は、HEMS コントローラにより、蓄電池の残量をはじめ家庭の消費電力、太陽光発電電力、車両使用有無の予測値に基づいて決定される。そのため、充放電電力  $P_{in}^{batt}$ 、 $P_{out}^{batt}$  と蓄電容量変化の関係を正確に把握することは、精度の高い計画立案を可能にする。ゆえに、蓄電池の充放電電力と容量変化分の関係に焦点を当て、モデル化することを考える。

実機計測より得られた、電力変換器の入出力特性、蓄電池の充放電特性を図 3.5-3～図 3.5-5 に示す。上記特性より、3.2(2)式の電力変換器のパラメータを、 $\eta^{acdc} = 1.03$   $P^s = 155$  とし、3.2(9)式の充放電パラメータを、 $\eta^{char} = 0.996$   $\eta^{dis} = 1.086$  とした。

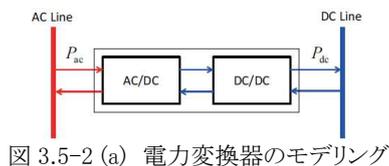


図 3.5-2 (a) 電力変換器のモデリング

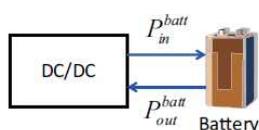


図 3.5-2 (b) 蓄電池充放電のモデリング

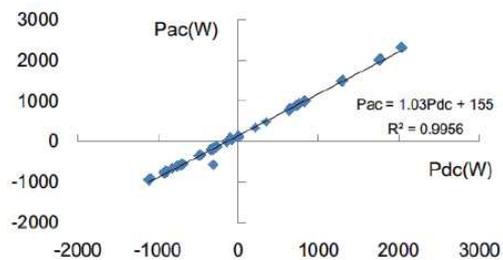


図 3.5-3 電力変換器の入出力特性

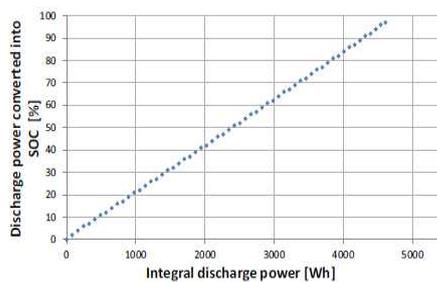
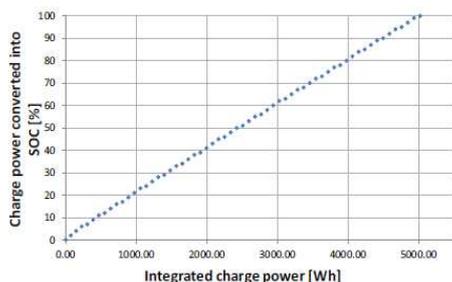


図 3.5-4 車載電池の充電積算値とSOCの関係 図 3.5-5 車載電池の放電積算値とSOCの関係

次に、モデルの精度検証結果を示す。前記モデル導入前後の1日の電力料金を Fig. 3.5-6 に示す。導入前は、計画(=シミュレーション)と実績の間に 128 円の誤差があるのに対し、導入後は、誤差が 17 円となり、約 87%減少した。モデルの導入により、最適化演算において電力変換器の待機電力、蓄電池充放電損失が陽に考慮されたため、計画と実績の乖離が減少したと考えられる。

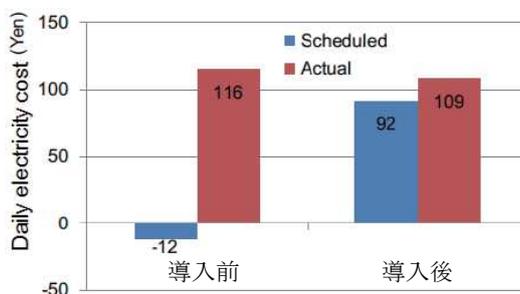


図 4.5-6 モデル導入前後計画と実績の誤差

乖離が減少した要因について、更に分析する。モデル導入前後の系統電力使用量の計画と実績値の関係を、各々図 3.5-7 と 3.5-8 に示す。モデル導入前後の平均誤差はそれぞれ 186W と 52W であり、モデル導入後は 72%減少している。

次に、モデル導入前後の蓄電池SOCの計画と実績値の関係を、各々図 3.5-9 と 3.5-10 に示す。なお、モデルの効果を正確に評価するため、モデル導入前後の充放電計画は、ともに 2000W の充放電を 3 回繰り返す設定としている。モデル導入前は、3 回繰り返し充放電後約8%の誤差が生じたのに対し、モデル導入後は、ほぼ誤差はなく、モデルの効果が表れていることが分かる。

以上より、電力変換器、蓄電池モデルの導入により、系統電力使用量と蓄電池 SOC を正確に把握することが可能になり、計画と実績の乖離の大幅な減少を達成したと考えられる。

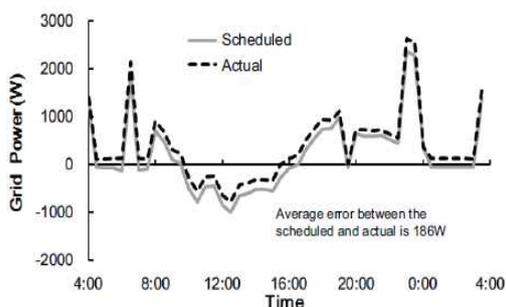


図 3.5-7 電力使用量の計画と実績 (モデル導入前)

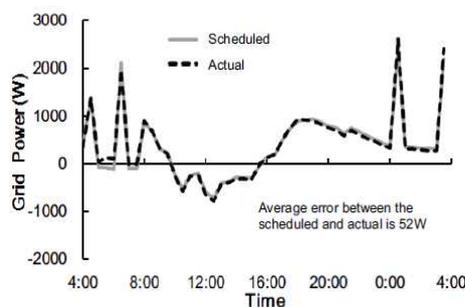


図 3.5-8 電力使用量の計画と実績 (モデル導入後)

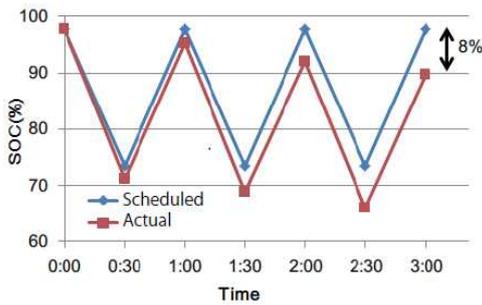


図 3.5-9 車載電池SOCの計画と実績  
(モデル導入前)

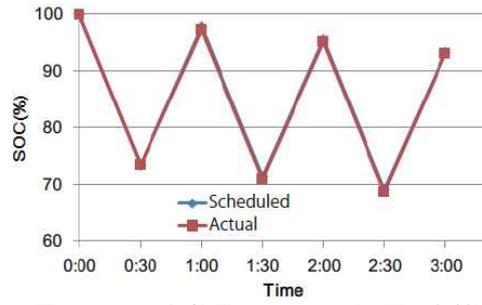


図 3.5-10 車載電池SOCの計画と実績  
(モデル導入後)

### ② MPCによるロバスト性向上効果

MPCなしの場合では、1日の開始時に24時間分の電力需要、車両予測を行い、24時間分の蓄電池充放電計画を立案している。ゆえに、予測、計画立案完了後に、予測と実際の状況が異なっても制御に反映されることはない。その結果、図3.5-11、3.5-12に示す通り、予測と実際の状況が異なる(17:00-19:00の間離脱している予測に対し、実際はこの時間帯に接続されている)と充放電指示が出せず、車載蓄電池が有効に活用できない。これに対し、MPCありの場合、制御周期毎に電力需要、車両使用予測、蓄電池充放電計画を更新するため、図3.5-13、3.5-14に示す通り、車両予測が11:30に更新され、充放電計画も再立案されるため、充放電指示が行われていることがわかる。これらの結果から、MPCの持つフィードバック構造が、予測誤差に対するロバスト性を向上させていることがわかる。

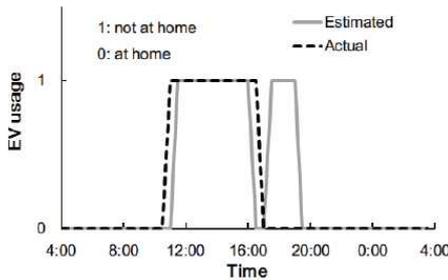


図 3.5-11 車両使用の予測と実績  
(MPCなし)

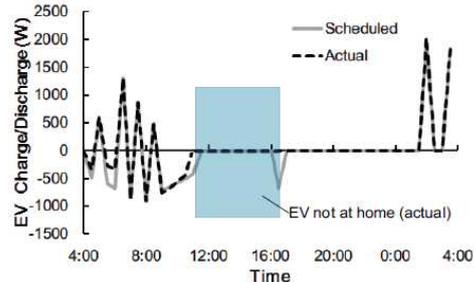


図 3.5-12 車載電池充放電電力の予測と実績  
(MPCなし)

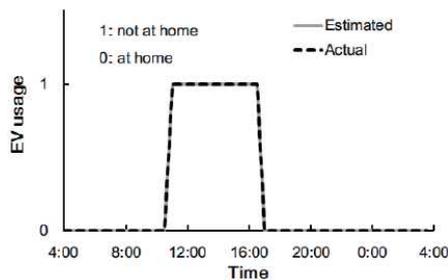


図 3.5-13 車両使用の予測と実績  
(MPCあり)

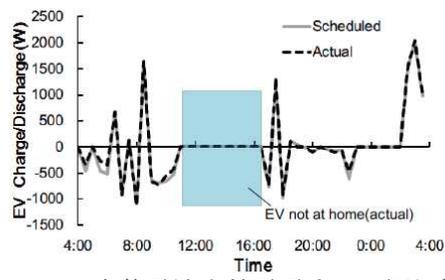


図 3.5-14 車載電池充放電電力の予測と実績  
(MPCあり)

### ③ 車載電池容量増加による効果

3kWh と 8kWh の車載蓄電池を想定し、接続時間を各々75%、55%として運用し、容量と接続時間が電気料金削減効果に与える効果を検証した。結果は、以下の通り。

車載電池容量	接続時間	1日の電気料金
--------	------	---------

3kWh	75%	61 円
8kWh	55%	42 円

車載電池 3kWh の場合に比べ、8kWh の場合では家庭への接続時間が短くても、1 日の電気料金が安いという結果が得られた。その理由は容量の増加に伴い、接続時に放電可能な電力容量が増加したためである。図 3.5-15 と 3.5-16 にエネルギー収支を、図 3.5-17 と 3.5-18 に車載蓄電池の SOC の推移を示す。車載電池 3kWh の場合、17:00 に帰宅時の放電可能な電力量は 1.16kWh $((72\%-33.33\%)\times 3\text{kWh})$ であるのに対し、8kWh の場合、19:00 に帰宅時の放電可能な電力量は 4.28kWh $((87\%-33.3\%)\times 8\text{kWh})$ であり、3kWh 以上の差があることが分かる。その結果、放電可能な電力量が増加し、より蓄電池の電力を活用した充放電計画を立案することが可能になり、電気料金の削減効果が高まったと考えられる。

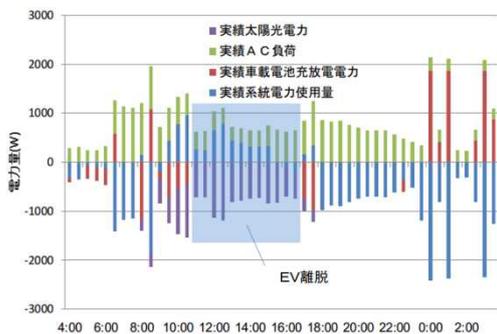


図 3.5-15 エネルギー収支(車載電池 3kW、接続時間 75%)

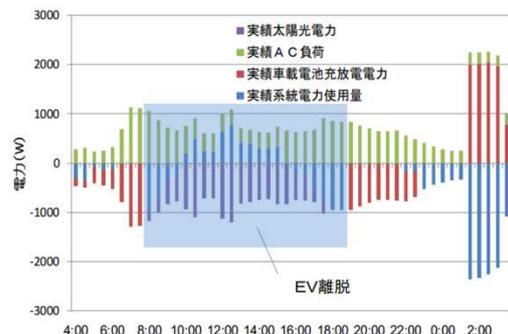


図 3.5-16 エネルギー収支(車載電池 8kWh、接続時間 55%)

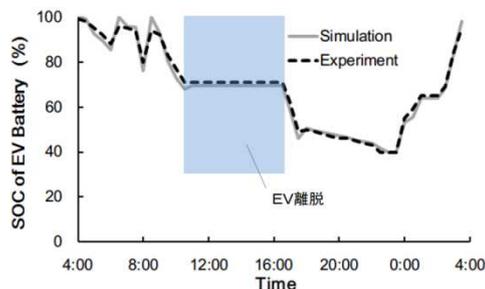


図 3.5-17 車載電池SOC(車載電池 3kW、接続時間 75%)

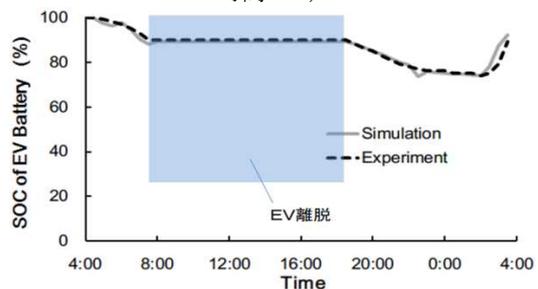


図 3.5-18 車載電池SOC(車載電池 8kWh、接続時間 55%)

#### ① 実家庭での実証試験

HEMS の受容性に対して調査するため、提案手法を実装した HEMS を実家庭（1 1 軒）に導入し、アンケート調査を実施した。車載電池を活用した HEMS の印象について、良いと答えた家庭は 35%に留まった。主な意見として、外出先で車載蓄電池を使い切り、家に接続されている時間が極めて少なく、車載蓄電池から家へ放電することがほとんどない、車使用時に満充電されていないなどがあつた。今後、受容性を向上させるために、車使用時までには満充電状態にしておくなど、車視点での評価指標を HEMS の最適化問題へ取り込んでいく必要があると考えている。

### 3. 6 HEMS アグリゲータとしての地域 EMS (CEMS) の設計 (鈴木 G)

3.2 で定式化した各 HEMS の最適化プロセスにおいて得られる予測結果を収集し、予測情報に基づいて各 HEMS に電力需給の制約を与え、地域全体の電力需給の統制を行う HEMS アグリゲータ(図 3.6-1)を設計した。

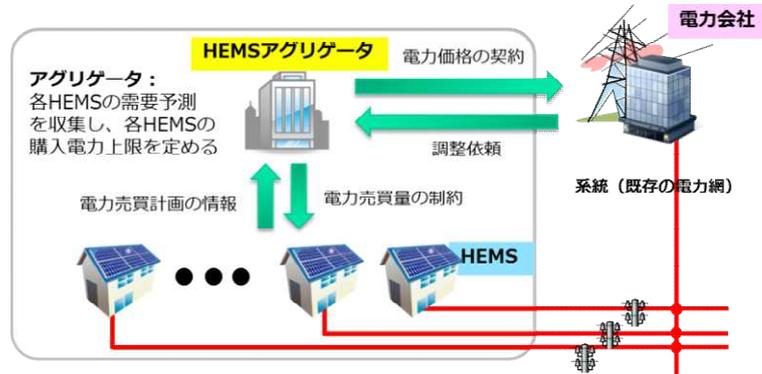


図 3.6-1 HEMS アグリゲータ

① 各 HEMS 定式化の拡張

3.2 で示した HEMS では車載蓄電池の電力を家庭内において積極的に有効活用することで、電気料金を削減することができた。しかし、このような HEMS を備えた家庭が集まる地域におけるエネルギー管理を考えた場合、単に各家庭が利己的に振る舞うだけでは、地域の電力需給平滑化は実現されない。そこで、図 3.6-2 に示す各 HEMS の充放電計画において、HEMS がアグリゲータからの指示として、購入/販売電力の上限を制約  $C_h^{max}(k|t)$ ,  $C_h^{min}(k|t)$  として受け取る。HEMS はそれらの制約に対する違反量を評価関数  $Z_h(t)$  に組み込み、違反量を最小化させる。すなわち、購入/販売電力の上限をソフト制約として組み込んでいる。ソフト制約として組み込むことで、アグリゲータの制約に対する HEMS の実行可能性を保証している。

<b>Given :</b>	
$\bar{w}_h^+(k t) \geq 0$ $\bar{w}_h^-(k t) \leq 0$ : 時刻 t に予測された時刻 t+k での家庭 h の消費/発電電力 (kW)	
$f^+(t) > 0$ $f^-(t) > 0$ : 時刻 t における購入/販売電力の単価 (円/kWh)	
$\tilde{x}_{h,j}(k t) \in \{0,1\}$ : 車使用の有無を表わす論理変数の予測 (0:不使用, 1:使用)	
$\bar{B}_{h,j}^{max}(k t)$ : 時刻 t に予測された時刻 t+k での車の走行による消費電力量 (kWh)	
$C_h^{max}(k t)$ $C_h^{min}(k t)$ : 家庭 h の購入/販売電力上限 (アグリゲータの指示)	
<b>Find :</b>	
$p_{h,j}(t) = \{p_{h,j}(1 t), p_{h,j}(2 t), \dots, p_{h,j}(T t)\}$	
家庭 h における 24 時間先までの「車載蓄電池」の充放電計画	
<b>Subject to :</b>	
<b>連続変数</b>	電力計画を上限以内に収める(ソフト制約):
• 契約電力	購入: $\bar{W}_h^+(k t) \leq C_h^{max}(k t) + \bar{w}_h^+(k t)$
• 充放電能力	販売: $\bar{W}_h^-(k t) \geq C_h^{min}(k t) - \bar{w}_h^-(k t)$
• 満充電時刻 ... etc.	違反電力
<b>離散論理変数</b>	
• 車使用の有無 ... etc.	
<b>Which minimize :</b>	
$Z_h(t) = \sum_{k=1}^T F(t+k) \bar{W}_h^+(k t) \Delta t + \alpha_1 \sum_{k=1}^T \bar{w}_h^+(k t) + \alpha_2 \sum_{k=1}^T \bar{w}_h^-(k t) + \alpha_3 \sum_{k=1}^T \sum_{j=1}^n  p_{h,j}(k+1 t) - p_{h,j}(k t) $	$F(k) = \begin{cases} f^+(k) & \text{if } \bar{w}_h^+(k t) \geq 0 \text{ (買電)} \\ f^-(k) & \text{if } \bar{w}_h^-(k t) < 0 \text{ (売電)} \end{cases}$
24時間先までの電気料金	24時間先までの違反電力の和
充放電回数の増加を抑制する項	$\bar{w}_h^+(k t) = \bar{w}_h^+(k t) + \bar{w}_h^-(k t) + \sum_j p_{h,j}(k t)$

図 3.6-2 各 HEMS の充放電計画

② HEMS アグリゲータの処理の流れ

次に、図 3.6-3 に HEMS アグリゲータと各 HEMS の処理の流れを示す。まず、制御周期  $\Delta t$  の始めに、各 HEMS ではアグリゲータからの制約条件を無視し、蓄電池の充放電計画を行う。この処理は、図 3.6-2 において  $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$  とした場合に当たる。そして、各 HEMS の充放電計画に基づいて得られる、正味の買電計画をアグリゲータに送る。アグリゲータは、各 HEMS から集めた情報と電力供給者から受ける地域全体の購入/販売電力の上限から、各 HEMS の正味の買電計画に対する上限と下限を計算する。具体的には、地域の正味の総買電量が電力会社から与えられる上限  $C^{max}(k|t)$  (下限  $C^{min}(k|t)$ ) を超えたときに、電力を購入(販売)すると計画した HEMS に対して、 $C^{max}(k|t)$  ( $C^{min}(k|t)$ ) を計画量の比率に応じて配分して、制約  $C_h^{max}(k|t)$  ( $C_h^{min}(k|t)$ ) として与える。最後に、各 HEMS はこの制約に基

づいて ( $\alpha_1 \neq 0, \alpha_2 \neq 0$ ) 再度、蓄電池の充放電計画を行い、そのステップ間  $\Delta t$  の充放電を実行する。

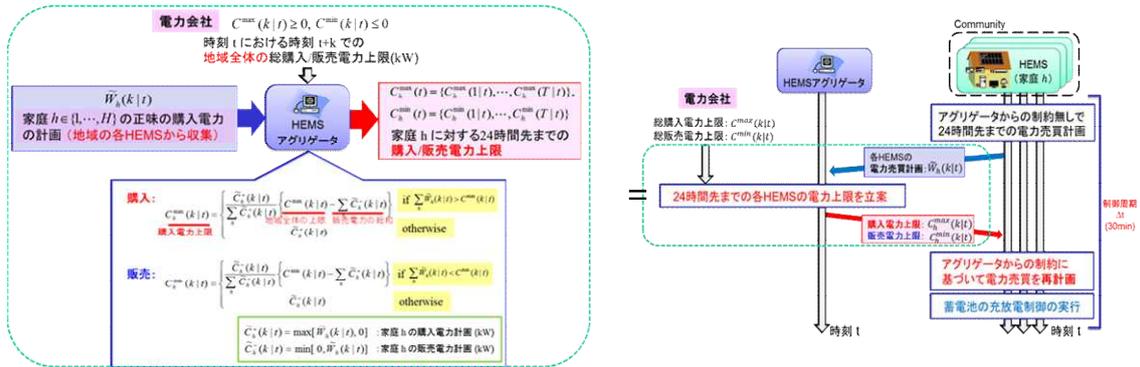


図 3.6-3 HEMS アグリゲータの処理の流れ

以上の提案手法を検証するため、また手法内に使われるパラメータを実験的に設計するために、各 HEMS をエージェントとしたエージェントベースシミュレーションを行った。構築したシミュレーションの環境を図 3.6-4 に示す。エージェントベースシミュレーションでは多様なエージェントを導入することで様々な状況下でのシミュレーションを行うことが出来る。

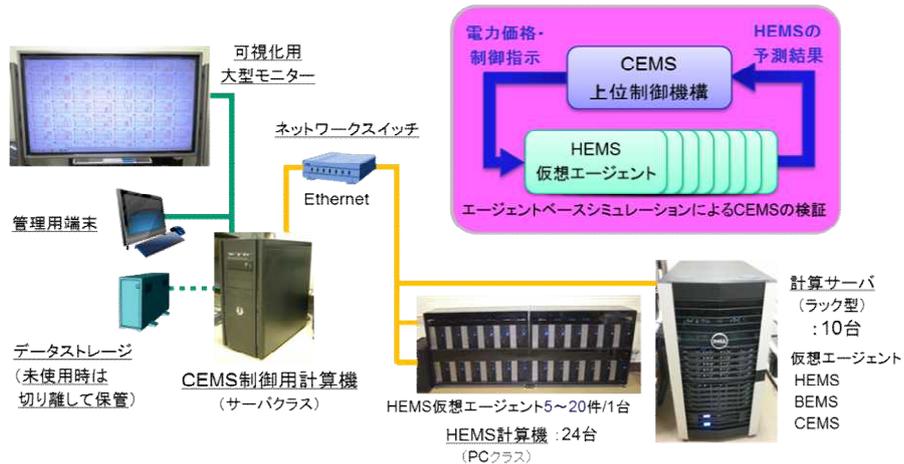


図 3.6-4 エージェントベースシミュレーション環境

### ③ HEMS アグリゲータの効果検証

豊田市の実家庭で取得された電力需要、車の使用、太陽光発電量のデータを基に、42軒の HEMS エージェントを作成し、シミュレーションを行った。すべての家庭には EV もしくは PHV が 1 台、および太陽光発電設備と HEMS が導入されている。各 HEMS の最適化において、電力需要は予測モデルを用い、車の使用、太陽光発電量は既知とした。買電単価  $f^+(t)$  は一律 21 円/kWh、売電単価  $f^-(t)$  は一律 42 円/kWh とした。

車の使用については 2 つの組に分類した。1 つは夜間に家に駐車する傾向を持つ車の使用であり、通勤に車を使用する家庭に多く見られる。もう 1 つは昼間に家に駐車する傾向を持つ車の使用であり、夜勤や家事のために車を使う家庭に多く見られる。なお、夜間駐車する組の HEMS には 6:00 に、昼間駐車する組の HEMS には 18:00 に車載蓄電池を満充電にする制約が加えられている。

まず、Case1 として各 HEMS エージェントの構成比率を夜間に駐車する家庭、昼間に駐車する家庭で約 3:1 としてシミュレーションした結果を図 3.6-5 に示す。この比率は豊田市

で対象とした実家庭の実際の構成に近い。図 3.6-5 の上段は各時刻において家庭に駐車されている車の数を表す。時間帯によっては極端に駐車数が減ることが分かる。中段はアグリゲータを適用する前後の、地域全体での正味の買電量を表す。アグリゲータを適用することにより、正味の買電量の上限下限に対する違反量が減っていることが分かる。下段は HEMS に接続されている車載蓄電池の総空き容量を表わしており、発電電力を蓄電することができる上限を表している。駐車数が少ない時間帯では発電量を十分に吸収できないことが分かる。

Case2 として、Case1 で吸収しきれない余剰発電量を大口需要家が消費する場合を検証した。大口需要家として豊田市で得られた小学校のデータを用い、電力を消費するだけのエージェントとして組み込んだ。結果を図 3.6-6 に示す。駐車数が少ない時間帯に、小学校が余剰の発電電力を消費することで、売電の逸脱量を大幅に削減できることが分かった。

Case3 として、夜間に駐車する家庭、昼間に駐車する家庭の比率を 1:1 に設定した。地域全体での電力売買の超過量はいずれも Case1 に比べて減少した。発電ピーク時間帯における蓄電池の空き容量に着目すると、HEMS アグリゲータの導入によって、蓄電池の充電需要を発電ピーク時間帯にシフトすることで売電の逸脱量を減少させることができ、かつ 17:00 から 18:00 における買電のピークを抑制できることが分かった。

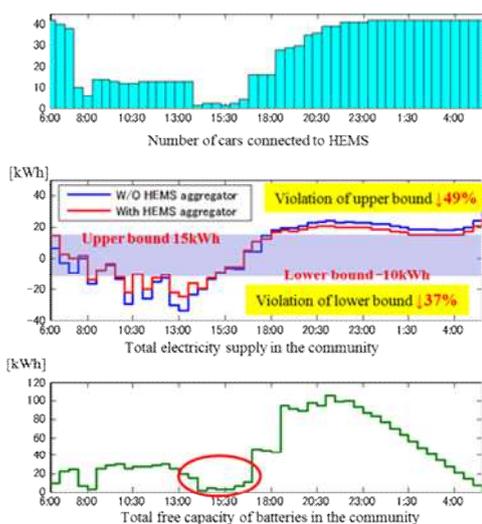


図 3.6-5 Case1 (夜間駐車:昼間駐車=3:1)のシミュレーション結果

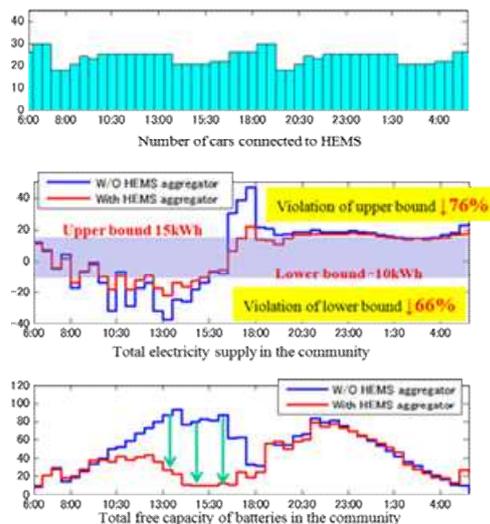


図 3.6-7 Case3 (夜間駐車:昼間駐車=1:1)のシミュレーション結果

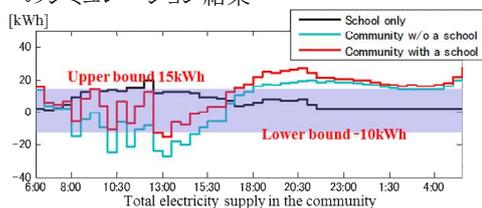


図 3.6-6 Case2 (夜間駐車:昼間駐車=3:1、小学校追加)のシミュレーション結果

### 3.7 モデル予測型 HEMS の拡張による集合住宅向け EMS (BEMS) (鈴木 G)

EMSを導入したスマートマンションと呼ばれる集合住宅を対象として、3.2の車載蓄電池を考慮したモデル予測型 HEMS を拡張し、車載蓄電池群の共有も含めた包括的制御を行う集合住宅向け EMS (BEMS) を設計した。本研究における BEMS は図 3.7-1 に示すように、太陽光発電ユニットなどの発電設備 (発電部)、需要家の居住区 (専有部)、車の駐車スペース (充放電部)、それらを統括する BEMS アグリゲータで構成される。実際の集合住宅には共有部 (照明やエレベーターなどの共有設備部) も存在するが、現段階では考慮しないこととした。

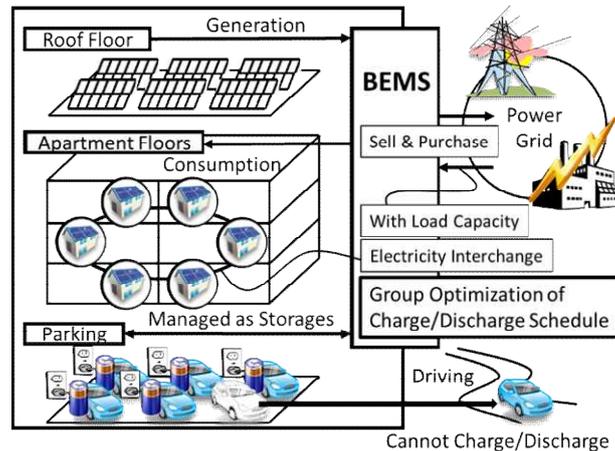


図 3.7-1 BEMS の全体外略図

BEMS アグリゲータはモデル予測型 HEMS と同様に、建物全体の電気料金が最小となるように、BEMS に接続する (充放電部で駐車中の) 車載蓄電池群の充放電計画を一括に最適化しモデル予測型の制御手順に従って制御する。モデル予測型 BEMS の特徴は以下の 3 つである。

- (a) 複数の車載蓄電池の充放電計画を一括に最適化
- (b) 集合住宅内の需要家間で車載蓄電池の放電電力を融通
- (c) 需要家全体の総消費電力に関する上限制約を遵守

モデル予測型 BEMS における車載蓄電池群の充放電計画最適化問題の定式化として、モデル予測型 HEMS の決定変数と目的関数を以下のように拡張する。

$$\begin{aligned}
 \text{決定変数:} & \quad \{p_{h,j}^v(k|t)\}_{k \in \{t, \dots, t+T-1\}, h \in \{1, \dots, H\}} \\
 \text{目的関数:} & \quad Z(t) = \sum_{k=t}^{t+T-1} \left( F(k) \sum_{h=1}^H \tilde{W}_h(k|t) \right) \Delta t + \alpha \sum_{h=1}^H \sum_{k=t}^{t+T-2} \sum_{j=1}^{V_h} D_{h,j}(k|t) \\
 & \quad F(k) = \begin{cases} f^+(k) & \text{if } \sum_h \tilde{W}_h(k|t) \geq 0 \\ f^-(k) & \text{otherwise} \end{cases}
 \end{aligned}$$

決定変数は 24 時間先までの各時刻の各車載蓄電池の充放電電力であり、目的関数は 24 時間先までに消費する総電力量に関する建物全体の電力料金を表しており、最適化計算によりこの目的関数値を最小にする決定変数、つまり、各車載蓄電池の最適な充放電電力を算出する。

モデル予測型 BEMS では、建物内に限り放電電力の逆潮流を許可する。逆潮流に関する制約式を以下のように変更する。

$$\sum_{h=1}^H \left( \tilde{W}_h^+(k|t) + \sum_{j=1}^{V_h} p_{h,j}(k|t) \right) \geq 0$$

さらに、BEMS アグリゲータは建物内の電力に関する情報を集約するため、集合住宅全体に関する各時刻の総消費電力に関して一括最適化の枠組みのもとで以下のように制限できる。

$$\sum_{h=1}^H \tilde{W}_h(k|t) \leq W_{\text{BEMS}}^{\text{max}}(k|t)$$

モデル予測型 BEMS のシミュレーション例を以下に示す。図 3.7-2 はシミュレーションに用いた設定であり、左から順に電力需要プロファイル (Type A : 電力消費小, Type B : 電力消費大), 車走行利用プロファイル (Type I : 通勤利用, Type II : 送迎・買物利用), 太陽光発電電力と電力料金である。太陽光発電は、各需要家に対して 1.5kW の発電容量分を個別に割り当てた。売電は建物全体で太陽光発電電力が余剰となった場合に発生し、その場合に限り固定価格 31 円/kWh で電力会社に売却する。各需要家はそれぞれ車載蓄電池容量 24kWh (充放電最大電力±3kW) の電気自動車 1 台所有する。需要家数は 16 軒として、電力消費 (2 通り) と車の走行利用 (2 通り) について、8 軒ずつ異なる需要家パターンの組み合わせを 4 通り作成し (Case 1~Case 4) し、各組み合わせパターンについて比較検討を行った。その結果を図 3.7-3 に示す。HEMS×16 の列は、各需要家がモデル予測型 HEMS を運用した場合の結果であり、BEMS 上限有り と上限無し の列はそれぞれモデル予測型 BEMS において建物全体の消費電力に上限を設定しない場合と設定した場合の結果である。上図が 1 日の電力料金、下図が 1 日の売電電力量である。

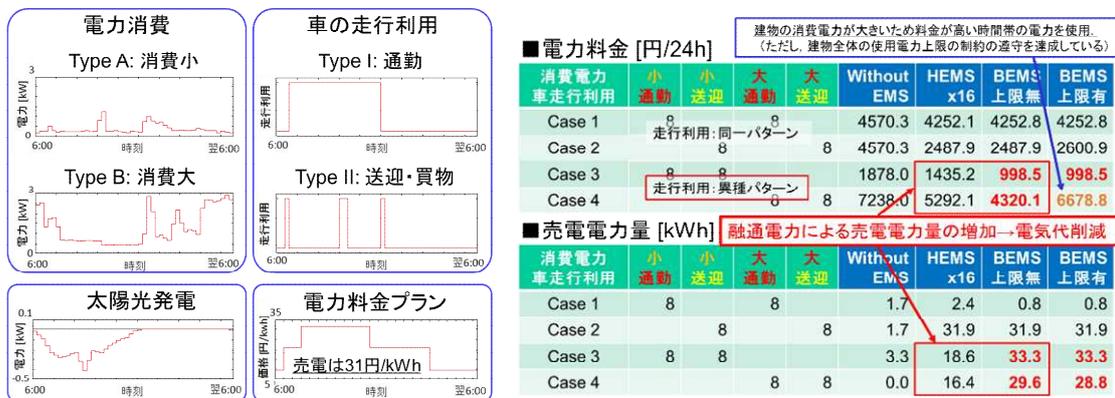


図 3.7-2 シミュレーション設定

図 3.7-3 シミュレーション結果

Case 1 と Case 2 ではすべての需要家で車の使用時間が同じであるため、車載蓄電池の放電電力を融通できない。そのため、HEMS 16 軒と BEMS 1 棟ではほぼ同一の結果となっている。Case 3 の場合ではモデル予測型 BEMS の電力料金は 998.5 円であり、モデル予測型 HEMS 16 軒の場合の 1435.1 円に対し、436.4 円 (30.4%) の削減効果が確認できた。Case 4 の場合でも同様に、BEMS 1 棟で 4320.1 円、HEMS 16 軒で 5292.1 円となり、972.0 円 (18.4%) の削減効果となった。Case 3 と Case 4 における売電電力量をみると、モデル予測型 BEMS では 33.3kWh、29.6kWh であり、モデル予測型 HEMS 16 軒の場合の 18.6kWh、16.4kWh よりも大きな値を示している。これはつまり、車の使用パターンが異なる需要家間で車載蓄電池を活用した電力融通を行うことにより、太陽光発電の余剰電力が増加し、建物全体の電気料金削減に貢献したことを表している。

また、車載蓄電池の充放電計画における最適化計算に要する計算時間を表 3.7-1 に示す。需要家数 126 軒の場合であっても 28.83 秒であり、制御周期 30 分に対して十分に短い計算

時間であり，実用上においても問題のない計算コストであるといえる。

表 3.7-1 計算時間

BEMSの世帯数	1件	5件	10件	42件	84件	126件
1ステップの計算時間*	0.09秒	0.28秒	0.56秒	3.92秒	15.81秒	28.83秒

## § 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0件、国際(欧文)誌 5件)

1. Takuma Yamaguchi, Masahiro Sumiya, Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki, Akira Ito, Mitsuru Fujita, and Jyunichiro Kanamori, Model Predictive Control of Car Storage Battery in HEMS Considered Car Traveling, proc. of SICE Annual Conference, MoAT15.3, pp.1352-1358, 2013.
2. Akira Ito, Optimal Energy Storage Management in DC Power Networks, proc. of IEEE SmartGridComm 2013, STO1.1, pp.630-635, 2013.
3. Takuma Yamaguchi, Maximum Likelihood Estimation of Departure and Travel Time of Individual Vehicle using Statistics and Dynamic Programming, proc. of IEEE Conference on Intelligent Transport Systems, TuD2.3, pp.1674-1679, 2013.
4. Takuma Yamaguchi, Akihiko Kawashima, Akira Ito, Shinkichi Inagaki and Tatsuya Suzuki, Real-time Prediction for Future Profile of Car Travel Based on Statistical Data and Greedy Algorithm, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.8, No.1, 2015 (to appear).
5. Akihiko Kawashima, Takuma Yamaguchi, Ryosuke Sasaki, Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki and Akira Ito, Apartment Building Energy Management System in Group Optimization with Electricity Interchange Using In-Vehicle Batteries, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.8, No.1, 2015 (to appear).

(2)その他の著作物(総説、書籍など)  
該当なし。

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 1件、国際会議 0件)  
(主要な国際会議への招待講演の前に\*を付記してください)

1. 稲垣 伸吉(名古屋大学)、車の使用予測と車載蓄電池の充放電に基づくエネルギー管理システム、情報数理学シンポジウム、大阪大学、2014年12月12日(発表予定)

② 口頭発表 (国内会議 10件、国際会議 2件)

■口頭講演詳細情報(国内)

1. 伊藤章(株式会社デンソー)、BEMS エネルギー管理手法の開発、2012年機械学会年次大会、J056012、金沢、2012年9月11日
2. 角谷 匡広、山口 拓真、稲垣 伸吉(名古屋大学)、鈴木 達也(名古屋大学、JST CREST)、伊藤 章、藤田 充(株式会社デンソー)、金森 淳一郎(株式会社デンソー、JST CREST)、使用履歴に基づく車の使用パターンのリアルタイム最尤推定、自動車技術会 2012 秋季大会、大阪、99-12、2012年10月3日
3. 山口拓真、角谷匡広、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、

- 伊藤章、藤田充(株式会社デンソー)、金森淳一郎(株式会社デンソー、JST CREST)、使用履歴に基づく車の使用パターン予測の組み合わせ最適化、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2012、3D1b-2、名古屋、2012年11月23日
4. 山口拓真、角谷匡広、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、伊藤章、藤田充(株式会社デンソー)、金森淳一郎(株式会社デンソー、JST CREST)、使用履歴と動的計画法による車利用行動の最尤推定と HEMS への応用、計測自動制御学会 第13回制御部門大会、8C1-4、福岡、2013年3月8日
  5. 山口 拓真、角谷匡広、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、伊藤章、藤田充(株式会社デンソー)、金森淳一郎(株式会社デンソー、JST CREST)、車の使用予測を組み込んだモデル予測型 HEMS の設計、自動車技術会 2013 春季大会、40-13、横浜、2013年5月22日
  6. 稲垣 伸吉、佐々木良介、山口拓真、川島明彦(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、車載蓄電池を活用した家庭エネルギー管理システムとその統制手法、電気学会 電子・情報・システム部門 システム研究会、ST-13-025、東京、2013年6月27日
  7. 山口 拓真、川島 明彦、稲垣 伸吉(名古屋大学)、鈴木 達也(名古屋大学、JST CREST)、伊藤 章、藤田 充(株式会社デンソー)、金森 淳一郎(株式会社デンソー、JST CREST)、最尤推定法に基づく車の出発と運転時間予測手法、第53回離散事象システム研究会、東京、2013年7月26日
  8. 佐々木 良介、山口拓真、稲垣伸吉、川島明彦(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、車載蓄電池を活用した地域エネルギー管理システムの設計とシミュレーションによる検討、平成25年 電気学会 電子・情報・システム部門大会、GS8-5、北見、2013年9月5日
  9. 川島 明彦、佐々木良介、山口拓真、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、グループ最適化に基づくモデル予測型 EMS の設計、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013、O2-3、滋賀、2013年11月19日
  10. 川島 明彦、山口拓真、佐々木良介、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、モデル予測型制御による車載蓄電池を活用した集合住宅用エネルギー管理システム、第1回 制御部門マルチシンポジウム、5B3-4、東京、2014年3月5日

■ 口頭講演詳細情報(国外、査読無し)

1. Zhuomin Zhou, Akira Ito and Toru Shiraki, Optimal Energy Storage Management for DC Power Networks in a Smart House, The 20th International Conference on Electrical Engineering, pp.1830-1835, Jeju, Korea, June 15-19, 2014.
2. Akira Ito, Development of Energy Management Method for DC Power Networks, SICE Annual Conference 2013, MoBT15.3, pp.1746-1751, Nagoya, Japan, 2013 (DOI: none).

③ ポスター発表 (国内会議 15 件、国際会議 0 件)

1. 伊藤 章、白木徹(株式会社デンソー)、直流電力網におけるエネルギーストレージシステムの最適制御、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013、SS9-4、滋賀、2013年11月19日
2. 山口 拓真、川島明彦、佐々木良介、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、走行履歴に基づく車の走行予測-貪欲法を用いたリアルタイム推定手法-、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013、SS9-10、滋賀、2013年11月19日
3. 佐々木 良介、山口拓真、稲垣伸吉、川島明彦(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、車載蓄電池を活用した地域エネルギー管理システムのシミュレーション

- 実験、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013、SS9-11、滋賀、2013年11月19日
4. 川島 明彦、佐々木良介、山口拓真、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、グループ最適化に基づくモデル予測型 EMS の設計、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013、SS9-13、滋賀、2013年11月19日
  5. 佐々木 良介、川島明彦、山口拓真、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、BEMS における車載蓄電池の充放電計画とシミュレーション実験、計測自動制御学会 中部支部 オープンラボ・学生発表会、名古屋、2013年11月28日
  6. 佐々木 勇介、山口拓真、川島明彦、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、自動車の走行利用における不確実性にロバストな家庭内エネルギー管理システムの開発、計測自動制御学会 第 20 回創発システム・シンポジウム、長野、2014年8月31日
  7. 姚 弋超、川島明彦、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、AR パラメータに基づく家庭電力の類型化、計測自動制御学会 第 20 回創発システム・シンポジウム、長野、2014年8月31日
  8. 佐々木 勇介、山口拓真、川島明彦、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、車載蓄電池を活用した家庭内エネルギー管理システムにおける実行可能性の向上、平成 26 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会、PS5-7、島根、2014年9月3日
  9. 森皓平、喜久里浩之、芳澤信哉、藤本悠(早稲田大学)、林泰弘(早稲田大学、JST CREST)、川島明彦、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、配電系統電圧制御を考慮したモデル予測型 HEMS による PHV 充放電計画の評価、平成 26 年 電気学会 電力・エネルギー部門大会、P25、京都、2014年9月10日
  10. 稲垣伸吉、川島明彦(名古屋大学)、伊藤章(株式会社デンソー)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、車載蓄電池を利用したモデル予測型 EMS の成果と展望～CREST「EMS」を通して～、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014、SS5-20、岡山、2014年11月23日
  11. 伊藤章、周卓敏(株式会社デンソー)、車載蓄電池を活用したモデル予測型 HEMS の実機検証、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014、SS5-1、岡山、2014年11月23日
  12. 川島 明彦、佐々木良介、山口拓真、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、集合住宅向け EMS における車載蓄電池の共有とその充放電計画最適化、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014、SS5-15、岡山、2014年11月23日
  13. 佐々木 良介、川島明彦、山口拓真、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、複数台 EV・PHV の目的地における充放電を考慮したモデル予測型 EMS の包括的制御、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014、SS5-17、岡山、2014年11月23日
  14. 佐々木 勇介、山口拓真、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、複数の目的地に対応した動的計画法に基づく車の使用予測、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014、SS5-14、岡山、2014年11月23日
  15. 森皓平、喜久里浩之、芳澤信哉、藤本悠(早稲田大学)、林泰弘(早稲田大学、JST CREST)、川島明彦、稲垣伸吉(名古屋大学)、鈴木達也(名古屋大学、JST CREST)、HEMS による電圧制約を考慮した EV 充放電計画の決定と貢献の評価、計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014、SS5-13、岡山、2014年11月23日

#### (4)知財出願

① 国内出願 (3件)

1. 電力供給システム、発明者:伊藤章, 金森淳一郎, 藤田充, 鈴木達也, 稲垣伸吉, 山口拓真, 角谷匡広、出願人:株式会社デンソー, 国立大学法人名古屋大学、出願日:2011年7月24日、出願番号:特開 2013-27214
2. 蓄電手段の利用予測装置、発明者:伊藤章, 金森淳一郎, 藤田充, 鈴木達也, 稲垣伸吉, 山口拓真, 角谷匡広、出願人:株式会社デンソー, 国立大学法人名古屋大学、出願日:2012年10月2日、出願番号:特開 2014-75861
3. 非公開

② 海外出願 (4件)

1. POWER SUPPLY SYSTEM、発明者:伊藤章, 金森淳一郎, 藤田充, 鈴木達也, 稲垣伸吉, 山口拓真, 角谷匡広、出願人:株式会社デンソー, 国立大学法人名古屋大学、出願日:2013年1月24日、出願番号:2013/0024035、出願国:アメリカ
2. POWER SUPPLY SYSTEM、発明者:伊藤章, 金森淳一郎, 藤田充, 鈴木達也, 稲垣伸吉, 山口拓真, 角谷匡広、出願人:株式会社デンソー, 国立大学法人名古屋大学、出願日:2013年1月24日、出願番号:DE102012212878A1、出願国:ドイツ
3. AVAILABILITY PREDICTION APPARATUS FOR ELECTRIC POWER STORAGE DEVICE、発明者:伊藤章, 金森淳一郎, 藤田充, 鈴木達也, 稲垣伸吉, 山口拓真, 角谷匡広、出願人:株式会社デンソー, 国立大学法人名古屋大学、出願日:2014年4月3日、出願番号:2014/0094981、出願国:アメリカ
4. AVAILABILITY PREDICTION APPARATUS FOR ELECTRIC POWER STORAGE DEVICE、発明者:伊藤章, 金森淳一郎, 藤田充, 鈴木達也, 稲垣伸吉, 山口拓真, 角谷匡広、出願人:株式会社デンソー, 国立大学法人名古屋大学、出願日:2014年10月16日、出願番号:DE102013110874A1、出願国:ドイツ

③その他の知的財産権

なし

(5)受賞・報道等

① 受賞(顕著な受賞の前に\*を付記してください)

1. 日本機械学会 動力エネルギーシステム部門 優秀講演表彰、伊藤 章、2013年11月1日
2. 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 奨励賞、山口 拓真、2013年11月20日
3. 平成26年 電気学会 電子・情報・システム部門大会 優秀ポスター賞、佐々木 勇介、2014年9月3日
4. 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 部門奨励賞、佐々木 勇介、2014年11月23日

② マスコミ(新聞・TV等)報道(プレス発表をした場合にはその概要もお書き下さい。)

1. 共同通信社、「豊田市で省エネ実験 デンソー、名古屋大と」、2013年9月27日
2. 時事通信社、「デンソー、車載電池利用の予測型エネルギー管理システムの実証実験＝名古屋大と」、2013年9月27日
3. MSN 産経ニュース、「デンソーと名大が EV などの電気代削減で実証実験」、2013年9月27日
4. 毎日jp、「デンソー：車載電池で電気代削減実験へ」、2013年9月27日
5. Response、「デンソーと名古屋大学、車載電池を活用したエネルギー管理システムを共同開発」、2013年9月27日
6. HIS Global Insight Daily Analysis、「Denso, Nagoya University develop in-vehicle battery-based energy management system」、2013年9月27日
7. 日本経済新聞、「車載電池、家庭で効率活用 デンソー 名大とシステム開発」、2013年9月28日
8. 中部経済新聞、「豊田市で省エネ実験 来月から デンソーが名大と」、2013年9月28日
9. 日刊自動車新聞、「電動車両の充放電自動制御 名大と新型 EMS 開発 デンソー」、2013年9月28日
10. 日経産業新聞、「EV 蓄電池使い家庭用エネ管理 デンソー、名大と開発へ」、2013年9月30日
11. 日刊工業新聞、「電動車両の充電最適化 デンソー 名大とシステム実証」、2013年9月30日
12. 環境ビジネスオンライン、「電気自動車の蓄電池を HEMS に連携 名大とデンソーが共同開発・実証実験へ」、2013年9月30日
13. Automotive Business Review、「Denso, Nagoya develop battery-based EMS for electric and hybrid vehicles」、2013年9月30日
14. デンソーニュースリリース、「車載電池を活用したエネルギー管理システムの共同開発及び実証実験の実施について～電力需要と車利用の予測モデルに基づき、車載電池の充放電を効率的に制御～」(2013年9月27日)  
URL: <http://www.denso.co.jp/ja/news/newsreleases/2013/130927-01.html>

### ③その他

特になし。

## (6)成果展開事例

### ①実用化に向けての展開

- CREST を通して得られた研究成果を共同研究相手である株式会社デンソーと協力して社会実装を目指す。すでに基本特許を申請済みであり、さらなる普及に努める。また、NEDO 等管轄下の各種実証プロジェクトとも連携し、社会実装を加速させる。
- 本プロジェクト終了後に「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マネジメントシステム」と題した新たなプロジェクト（最強チーム）を同領域内で立ち上げるようになった。

### ②社会還元的な展開活動

- SICE Annual Conference やシステム・情報部門におけるスペシャルセッションの企画により、領域外の関連研究者に対するアウトリーチ活動を積極的に行った。

## § 5 研究期間中の活動

### 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 25 年 5 月 29, 30, 31 日	スマートコミュニティ Japan 2013	東京ビッグ サイト	150 人	本研究内容の企業・教育研究機関にむけたパネル展示による情報発信
平成 25 年 6 月 7 日	チーム内ミーティング (非公開)	名古屋大学	4 人	研究進捗の報告
平成 25 年 8 月 8 日	チーム内ミーティング (非公開)	名古屋大学	7 人	研究進捗の報告
平成 25 年 9 月 6 日	テクノ・フェア名大 2013	名古屋大学	50 人	本研究内容の産業界・地域社会に向けたパネル展示によるアウトリーチ活動
平成 25 年 9 月 16 日	SICE Annual Conference 2013, JST-CREST Special Session: Next-Generation Distributed Energy Management Systems	名古屋大学	65 人	講演件数は 8 件(内 2 件が海外からの招待講演、他 6 件は本 CREST 関係者による講演) 研究代表者鈴木は本 conference の program Chair を勤めた。
平成 25 年 10 月 4 日	チーム内ミーティング (非公開)	名古屋大学	7 人	研究進捗の報告
平成 25 年 11 月 13 日	チーム内ミーティング (非公開)	名古屋大学	7 人	研究進捗の報告
平成 25 年 11 月 19 日	SICE システム情報部門 学術講演会 2013 スペ シャルセッション エネル ギー管理におけるシス テム・情報・制御技術	ピアザ淡海 (大津)	230 人	講演件数は 19 件 研究代表者鈴木と稲垣は Session Organizer を勤めた。
平成 25 年 12 月 17 日	FS に向けた打合せ (非公開)	名古屋大学	7 人	H26 年度 FS チームの調整 (鈴木 G)
平成 25 年 12 月 19 日	FS に向けた打合せ (非公開)	大阪大学	6 人	H26 年度 FS チームの調整 (鈴木 G, 下田 G)
平成 26 年 1 月 29 日	FS に向けた打合せ (非公開)	東京大学	6 人	H26 年度 FS チームの調整 (鈴木 G, 太田 G)
平成 26 年 3 月 10 日	CREST 講演会	名古屋大学	10 人	研究の連携に向けた意見交換 平田研二准教授(長岡技術科学大学)を招聘し、招待講演を行った。
平成 26 年 3 月 17 日	FS に向けた打合せ (非公開)	東京工業大 学	6 人	H26 年度 FS チームの調整 (鈴木 G, 石井 G)

平成 26 年 5 月 2 日	FS に向けた打合せ (非公開)	名古屋大学	7 人	H26 年度 FS チームの調整 (鈴木 G, 石井 G, 太田 G, 下田 G, 平田 G)
平成 26 年 6 月 5 日	DENSO エコライフハウス 見学会(非公開)	株式会社デ ンソー本社 (刈谷)	5 人	H26 年度 FS チーム内連携 に向けた調整(鈴木 G, 石 井 G)
平成 26 年 6 月 14 日	FS 第2フェーズ 鈴木FS 第1回会議(非公開)	名古屋大学	8 人	FS チーム内連携に向けた 意見交換(鈴木 G, 太田 G, 下田 G, 平田 G, 藤本 G)
平成 26 年 6 月 25 日	FS 第2フェーズ 鈴木FS キックオフ会議(領域ア ドバイザーサイトビジッ ト)(非公開)	名古屋大学	15 人	最強チーム結成に向けた FS チーム内連携における 意見交換(鈴木 G, 石井 G, 太田 G, 下田 G, 平田 G, 藤 本 G)
平成 26 年 7 月 17 日	FS 第2フェーズ 鈴木FS 3グループ合同打合せ (非公開)	東京大学	6 人	FS チーム内連携における 意見交換(鈴木 G, 太田 G, 平田 G)
平成 26 年 8 月 4 日	FS 第2フェーズ 鈴木FS 第3回会議(非公開)	名古屋大学	11 人	FS チーム内連携における 意見交換(鈴木 G, 石井 G, 太田 G, 平田 G, 藤本 G)
平成 26 年 9 月 19 日	FS 第2フェーズ 鈴木FS 最終報告会(領域アドバ イザーサイトビジット) (非公開)	名古屋大学	15 人	最強チーム結成に向けた FS チーム内連携における 意見交換(鈴木 G, 石井 G, 太田 G, 平田 G, 藤本 G)
平成 26 年 9 月 30 日	国際連携に向けた打合 せ(非公開)	MIT メディ アラボ(米 国)	5 人	Ryan C. C. Chin 研究グル ープとの国際連携に向けた 調整
平成 26 年 10 月 1 日	国際連携に向けた打合 せ(非公開)	デラウェア 大学(米国)	5 人	Willett Kempton 研究グル ープとの国際連携に向け た調整
平成 26 年 11 月 6 日	チーム内ミーティング (非公開)	名古屋大学	8 人	H24~26 年度 CREST 成果の 取りまとめ
平成 26 年 11 月 23 日	SICE システム情報部門 学術講演会 2014 スペ シャルセッション エネル ギー管理におけるシス テム・情報・制御技術	岡山大学	260 人	講演件数は 20 件 研究代表者鈴木と稲垣は Session Organizer を勤め た。

## §6 最後に

### 【得られた成果の意義と自己評価】

当初設定した目標に対して、90%程度達成できたと考えている。特に車使用時系列の予測に関しては、実データに基づいた顕著な成果が得られた。また、他の成果についてもいずれも実データに基づくものであり、将来的に社会実装につながる可能性は高い。学術論文としての公表数が若干当初の目標を下回ったが、これは特許出願を優先させたためであり、現在投稿中、執筆中のものを含めると当初の想定以上の成果物を公表できる予定である。

### 【今後の展開】

本プロジェクト終了後に「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マネジメントシステム」と題した新たなプロジェクト(最強チーム)を同領域内で立ち上げることになった。新たなプロジェクトでは、各家庭、需要家における機器利用に伴うエネルギー消費に加え、移動に要するエネルギー消費をも統合的に観測、モデル化し、両者を融合したグローバルなエネルギー消費行動モデルを構築する。得られたモデルに最先端の予測手法、診断手法、最適化手法を適用し、分散的に点在する据置／車載蓄電池群を協調的に利用することで、車と家庭と地域の調和を意識したセキュアで社会的受容性の高いエネルギーマネジメントシステム(EMS)を構築する。また、構築した EMS を段階的に実装し、その有用性を検証する。

### 【プロジェクト運営について】

本プロジェクトは大学側 1 グループ、企業側 1 グループという体制であり、以前より交流のあったグループ同士であったため、スムーズにプロジェクトを運営できた。大学が持つ強みと企業が持つ強みをうまく融合できたばかりでなく、他の領域内研究者を交えた多彩な議論ができ、EMS、特に電動車両を活用した EMS の将来ビジョンについて有意義な議論ができた。