モデル予測型 HEMS における車載蓄電池と ヒートポンプ式給湯器の協調運用*

縄田 郁海[†]・佐々木勇介[†]・川島 明彦[†]・稲垣 伸吉[†]・鈴木 達也[‡]

Cooperative Operation of In-Vehicle Battery and HPWH in Model Predictive HEMS*

Ikumi NAWATA[†], Yusuke SASAKI[†], Akihiko KAWASHIMA[†], Shinkichi INAGAKI[†]
and Tatsuya SUZUKI[‡]

Surplus power generated by large number of photovoltaics (PV) systems which are penetrating to general households is concerned as great impact to grid systems. This paper proposes a home energy management system (HEMS) which simultaneously controls charge/discharge of an in-vehicle battery of electric vehicle (EV) and operates heat pump water heating (HPWH). The proposed control is model predictive control manner in which the profiles of in-vehicle battery charge/discharge and HPWH operation are calculated iteratively in each step, minimizing the electricity bill with considering both the reverse surplus power as penalty and the vehicle usage as constraint. Especially, a piece-wise linear model of HPWH is introduced into the optimization problem in order to realize realistic computational time. As the result, both suppressing the surplus power reversing to the grid and decreasing electricity bill of the residents are realized. The effectivity of proposed system is verified by a simulation utilizing real data of a household.

1. はじめに

東日本大震災以降、日本では原子力発電による発電電力が大きく低下しており、政府により「原発依存度については、省エネルギー・再生可能エネルギーの導入や火力発電所の効率化などにより、可能な限り低減させる」という指針 [1] も発表されていることから、再生可能エネルギーのますますの導入が予測される。再生可能エネルギーの中でもとりわけ太陽光発電 (PV) は、日本の再生可能エネルギーの中でも大きな割合を占める発電システムであり、住宅用太陽光発電導入量も増加傾向にあることから今後さらに導入が進んでいくと考えられる [2]。しかし PV が大量に導入されると、急激な出力変動による周波数調整力の不足や、ベース供給力と再生可能エネルギーの合計発電量が需要を上回ることによる余剰電力の発生、逆流による系統電圧の上昇

などの問題が生じることが懸念されるため、これに対しさまざまな対策が講ぜられている。余剰電力の対策は地域内エネルギー管理システム (Community Energy Management System: CEMS) や家庭内エネルギー管理システム (Home Energy Management System: HEMS) による蓄電池を利用した余剰電力吸収が考えられている。とくに導入コストや設置スペースなどの削減から今後ますます普及が進んでいくと考えられる電気自動車 (Electric Vehicle: EV) の車載蓄電池を利用することが提案されている [3,4]。また蓄電池のほかに余剰電力吸収に効果のある家庭内機器として、近年普及が進んでいるヒートポンプ式給湯器 (Heat Pump Water Heater: HPWH) [5] を利用することが提案されている [6]。さらに蓄電池と HPWH を併用することも提案されている [7]。また余剰電力だけでなく周波数調整の対策として車載蓄電池と HPWH を併用することが提案されている [8]。しかし今後このようなシステムが普及していくためには、系統側の余剰電力を減らすという目的だけでなく同時に居住者側の利益を確保することが求められる。

一方、居住者側の利益である電気料金の削減を考慮しながら、蓄電池、HPWH をともに利用することにより余剰電力の削減を行う研究が行われている [9–11]。しかしこれらの研究は蓄電池として据え置き型蓄電池の利用

* 原稿受付 2016 年 7 月 25 日

第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会にて発表 (2016 年 5 月)

[†] 名古屋大学 大学院 工学研究科 Graduate School of Engineering, Nagoya University; Furotoyo-1, Chikusa ward, Nagoya city, Aichi 464-0814, JAPAN

[‡] 名古屋大学 大学院 工学研究科, JST CREST

Key Words: HEMS, model predictive control, EV, HPWH, surplus power reduction.

を想定している。車載蓄電池を CEMS/HEMS に利用する際は、EV が利用者により移動手段として使われることによる蓄電池の CEMS/HEMS からの切り離しを考慮しなければならない。このような蓄電池の切り離しを考慮しながら HPWH とともに EV の車載蓄電池を利用した CEMS/HEMS に関する研究も行われている [12–14] が、居住者の利益の最大化を目指したアルゴリズムは設計されていない。

そこで本研究では、車載蓄電池の切り離しと居住者の利益の最大化を考慮しつつ余剰電力削減を行う、EV の車載蓄電池と HPWH の最適運転を行うモデル予測型 HEMS の開発を目的とする。ただし本論文における余剰電力とは、家庭での発電電力から家庭の消費電力を差し引いたもの、すなわち系統へ売却する電力を意味する。モデル予測型 HEMS とは各時刻において 24 時間先までの電気料金を最小化するように運転計画を行い、最初の 1 ステップのみを指令値として入力、1 ステップ後に再計画を行い以下繰り返すものである。この制御手法の利点は、各ステップで得られる観測値をフィードバックし再計画を行うことによりモデル化誤差や予測誤差などの誤差が結果に与える影響を抑えることが可能な点であり、実機実験においてもその効果が確認されている [15]。今回想定する HEMS は実際運用する際に消費電力や消費熱量、発電電力など多くの予測値を使う点とモデル化が困難でありモデル化誤差が想定される HPWH を制御に組み込む点から、モデル予測型 HEMS を用いることとする。具体的には、文献 [16] における車載蓄電池の充放電の最適計画問題に HPWH の運転計画を組み込み、目的関数に余剰電力削減項を加えることで、目的を達成するものとする。また豊田市実証実験 [17] によって得られた実際の需要データを用いて、提案手法の効果検証を行う。本論文では開発した HEMS において扱う最適化問題について解説し、その適用結果について述べる。

本論文の以降の様式は次の通りである。第 2 章では本研究で用いる HPWH モデルの解説を行う。第 3 章では定式化を行った車載蓄電池の充放電と HPWH の運転計画の同時最適化問題の解説を行う。第 4 章では数値実験の結果を提示し、それに対する考察を行う。最後に 5 章では本論文のまとめと今後の課題を提示する。

2. HPWH モデル

HPWH を含む家庭内機器の最適運転計画問題の定式化を行うためには、HPWH のモデル化が必要である。本研究では、馬場ら [18] が提案する HPWH モデルを検証用のシミュレータに用いる。また同モデルの非線形式を区分線形化し、最適化問題に適用する。以下に馬場らの HPWH モデルを説明する。ただし複数回沸き上げによる温度上昇など、一部本研究に合うような変更を加えている。

2.1 想定する HPWH の概要

以下に本論文で想定する HPWH の概要を示す。HPWH とは大気中の熱を利用してお湯を沸かす機器であり、その特性上、気温や水温などにより COP とよばれる電気から熱の変換係数が変化する。単位時間あたりに生成できる熱量は決まっており、COP によってその一定の熱量の生成に必要な消費電力が決定される。お湯を沸かす際には沸き上げ温度を設定し沸き上げを行う。単位時間あたりに生成できる熱量は決まっていることから設定温度が高いほど単位時間あたりに生成できる湯量は少なくなる。沸かされたお湯は貯湯タンクに貯められる。タンク内は常に水が満タンまで入っており、その中は熱い湯がたまっている湯層と冷たい水が貯まっている水層の二つの層に分かれている。湯はタンクの壁を通しての大気への放熱、水層と接する部分での水層への放熱によって温度が徐々に低下していくが、新たに湯の追加沸き上げが行われた場合には湯同士が混ざり合い温度が上昇する。なお水層と湯層の混ざりは考えないものとする。使用される際にはタンクから湯が取り出され蛇口付近で水と混ぜて適温にされる。

2.2 変数・パラメータの定義

$\alpha_{T_{set}}(t) \in \{0,1\}$	: HP 運転指令 (0: OFF, 1: ON)
$\alpha_{T_{set}}^{\text{on}}(t) \in \{0,1\}$	: HP 運転開始指令
$\alpha_{T_{set}}^{\text{off}}(t) \in \{0,1\}$	: HP 運転停止指令
Q_{ave}	: 平均加熱能力 [kJ]
$T_a(t)$	: 外気温 [°C]
$T_w(t)$	: 水温 [°C]
$cal = 4.182$	: 水の比熱 [kJ/°C kg]
$r > 0$	: タンクの半径 [m]
$K_w > 0$	: 水の熱伝達率 [kJ/K]
$COP_{\text{ave}} > 0$	: 定格成績係数 [kJ/kWh]
$K_a > 0$	: 外気への熱伝達率 [kJ/K m²]
$P_{\text{HP}}(t) \geq 0$	: HPWH の消費電力 [kW]
$T_{\text{set}}(t) \in \{65,90\}$	: 沸き上げ設定温度 [°C]
$L_{\text{use}}(t) \geq 0$	: タンクからの使用湯量 [ℓ]
$COP(t) \geq 0$	: 成績係数 [kJ/kWh]
$c_1 \sim c_4 \geq 0$	: COP のパラメータ
$Q_{\text{HPWH}}(t) \geq 0$	: HPWH の生成熱量 [kJ]
$Q_{\text{st}}(t) \geq 0$	: タンク内の蓄熱量 [kJ]
$Q_{\text{use}}(t) \geq 0$	: 使用熱量 [kJ]
$Q_a(t) \leq 0$	: 外気への放熱量 [kJ]
$Q_w(t) \leq 0$	: 水層への放熱量 [kJ]
$T_{\text{hw}}(t) \geq 0$	: タンク内湯温 [°C]
$S_{\text{hw}}(t) \geq 0$	: 湯層の表面積 [m²]
$L_{\text{st}}(t) \geq 0$	: タンク内の湯量 [ℓ]
$L(t) \geq 0$	: 生成湯量 [ℓ]

ここで $\bullet(t)$ は時刻 t における値を示す。たとえば $T_a(t)$ は時刻 t における気温を表す。ただし、 $L_{\text{use}}(t)$,

$Q_{\text{HPWH}}(t)$, $Q_{\text{use}}(t)$, $Q_a(t)$, $Q_w(t)$, $L(t)$ に関しては, 前ステップから時刻 t までの間に生成/消費された値を示し, $\alpha_{65}(t)$, $\alpha_{90}(t)$ に関しては前ステップから時刻 t までの間の HPWH の運転状況を示す. たとえば $Q_{\text{HPWH}}(t)$ は, 時刻 $t-1$ から時刻 t の間に生成された熱量の総量 [kJ] を表す.

2.3 検証用シミュレータ上の HPWH モデル

検証用シミュレータ上で扱う HPWH モデルを以下に示す.

$$Q_{\text{HPWH}}(t) = Q_{\text{ave}}(\alpha_{65}(t) + \alpha_{90}(t)) \quad (1)$$

$$P_{\text{HP}}(t) = \frac{Q_{\text{HPWH}}(t)}{\text{COP}(t)} \quad (2)$$

$$\text{COP}(t) = (c_1 T_a(t) - c_2 T_w(t) - c_3 T_{\text{set}}(t) + c_4) \text{COP}_{\text{ave}} \quad (3)$$

$$T_{\text{set}}(t-1) = 65\alpha_{65}(t) + 90\alpha_{90}(t) \quad (4)$$

$$Q_{\text{st}}(t) = Q_{\text{st}}(t-1) + Q_{\text{HPWH}}(t) + Q_a(t) + Q_w(t) - Q_{\text{use}}(t) \quad (5)$$

$$Q_a(t) = \begin{cases} -(T_{\text{hw}}(t-1) - T_a(t-1))S_{\text{hw}}(t-1)K_a, & \text{if } T_{\text{hw}}(t-1) \geq T_a(t-1) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$Q_w(t) = -(T_{\text{hw}}(t-1) - T_w(t-1))K_w \quad (7)$$

$$L_{\text{st}}(t) = \begin{cases} L_{\text{st}}(t-1) + L(t) - L_{\text{use}}(t), & \text{if } T_{\text{hw}}(t-1) \geq T_w(t-1) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$L(t) = \frac{Q_{\text{HPWH}}(t)}{(T_{\text{set}}(t-1) - T_w(t-1))\text{cal}} \quad (9)$$

$$L_{\text{use}}(t) = \frac{Q_{\text{use}}(t)}{(T_{\text{hw}}(t-1) - T_w(t-1))\text{cal}} \quad (10)$$

$$S_{\text{hw}}(t) = r^2\pi + 2r\pi \frac{1000}{r^2\pi} \frac{L_{\text{st}}(t)}{500r} = r^2\pi + \frac{L_{\text{st}}(t)}{500r} \quad (11)$$

$$T_{\text{hw}}(t) = \begin{cases} \frac{(L_{\text{st}}(t) - L(t))T_{\text{hw}}(t-1) + L_{\text{st}}(t)}{L_{\text{st}}(t)} + \frac{Q_a(t) + Q_w(t)}{L_{\text{st}}(t)\text{cal}}, & \text{if } L_{\text{st}}(t) > 0 \\ T_w(t), & \text{if } L_{\text{st}}(t) = 0 \text{ and } \alpha_{T_{\text{set}}}^{\text{on}}(t) = 0 \\ T_{\text{set}}(t), & \text{if } L_{\text{st}}(t) = 0 \text{ and } \alpha_{T_{\text{set}}}^{\text{on}}(t) = 1 \end{cases} \quad (12)$$

(1)~(12) 式により, HPWH の ON/OFF 指令, 沸き上げ設定温度, 1 ステップ前のタンク内の蓄熱量, 利用者の使用熱量, 1 ステップ前の湯温, 水温, 気温, 1 ステップ前のタンク内の湯量から, HPWH のタンク内の蓄熱量, 放熱量, タンク内の湯温, タンク内の湯量などが算出される. なお (8) 式の場合分けは, 湯温が水温を下回った場合に湯層と水層の区別がなくなるため蓄湯量を 0 とすることを表している.

2.4 HPWH モデルの区分線形化

前節で紹介した HPWH モデルは (6), (10), (12) 式のような非線形の式を含む. これをそのまま制約として最適化問題に組み込むと, その最適化問題は混合整数非線形計画問題となる. この問題は一般的に厳密解を得ることが困難であり, 解を得るまでに膨大な時間を必要とすることが多い. そこで本研究では (6), (10), (12) 式を線形近似し解くべき問題を混合整数線形計画問題へと変形する. 変形後の式は最適化問題の制約式として次節で提示する.

3. 車載蓄電池と HPWH を活用したモデル予測型 HEMS の設計

本研究では車載蓄電池の充放電および HPWH の ON/OFF を制御する手法としてモデル予測制御を用いる. 予測に関して, 筆者らはこれまでに家庭内の消費電力, 車の走行予測, 車使用で消費された電力量に関する研究を行ってきており, 消費電力は AR モデル, 車の走行予測や消費電力量は確率分布を用いたモデルでの予測を提案してきた [16, 19]. 太陽光発電電力の予測に関しては文献 [20], 使用熱量の予測に関しては文献 [21], 水温の予測に関しては文献 [18] などで研究が行われており, また気温の予測に関しては気象庁の予報を予測として用いることが可能である. これら既存の手法を用いることにより予測を含めた HEMS の運用は可能であるが, 本論文は車載蓄電池と HPWH を協調的に運用することの有用性を示すことを目的とした論文であるため, 予測は行わずすべての予測値は既知とする. 予測を含めた検証に関しては今後の課題とする. 制御周期 1 ステップを 30 分とし, 評価区間は 24 時間とする. すなわち評価ステップ数 T を 48 とする. 最適化問題で用いる変数, パラメータの定義を以下に示す. ただし前節で説明したものに関しては省略する.

ここで, $\bullet(k|t)$ は時刻 t において算出される時刻 k での値を意味し, 変数上の $\sim$ はその変数が予測値であることを意味する. ただし, $\bullet(t|t)$ は時刻 t において観測される値とする.

3.1 最適化問題の定式化

本研究で提案する最適化問題を以下に示す. なお車載蓄電池に関する部分は文献 [16] を基に作成したものである.

T	: 評価ステップ数
$\widetilde{W}^+(k t) > 0$	: 蓄電池, HPWH 以外の 家庭内の消費電力 [kW]
$\widetilde{W}^-(k t) < 0$	: 発電電力 [kW]
$f^+(t) > 0$	: 電気購入料金 [Yen/kWh]
$f^-(t) > 0$	: 電気売却料金 [Yen/kWh]
$\tilde{\gamma}(k t) \in \{0, 1\}$	: 車使用指標 (0: 自宅駐車中, 1: 外出中)
$\tilde{B}^{\text{cons}}(k t) \geq 0$	: 車使用で消費された電力量 [kWh]
$B^{\text{ref}}(t) \geq 0$	: 利用者希望の最低蓄電残量 [kWh]
$B^{\text{min}}(t)$	: 車載蓄電池の必要最低残量 [kWh]
$B^{\text{obs}}(t)$	: 蓄電残量の観測値 [kWh]
$T_a^{\text{obs}}(t)$	: 気温の観測値 [°C]
$T_w^{\text{obs}}(t)$	: 水温の観測値 [°C]
$Q_{\text{st}}^{\text{obs}}(t)$	: 蓄熱量の観測値 [kJ]
$L_{\text{st}}^{\text{obs}}(t)$	: 蓄湯量の観測値 [ℓ]
$T_{\text{hw}}^{\text{obs}}(t)$	: 湯温の観測値 [°C]
$p(k t)$	: 蓄電池充放電量 [kW]
$W(k t)$	: 正味の消費電力 [kW]
Δt	: 1 ステップの時間 [h]
$S(k t) > 0$	: 余剰電力 [kW]
$\chi_{\text{acdc}} > 0$	: ACDC コンバータの変換効率
P_{st}	: 蓄電池と家庭間で交流直流変換 を行う PCS の待機電力 [kW]
$W_{\text{max}} > 0$	: 需要家の契約容量 [kW]
$P^{\text{char}} > 0$	: 蓄電池と電力変換器を接続した うえでの充電電力上限 [kW]
$P^{\text{dis}} < 0$	: 蓄電池と電力変換器を接続した うえでの放電電力上限 [kW]
$b(k t)$	: 蓄電池残電力 [kWh]
$B^{\text{max}} > 0$	: 蓄電池の充電容量 [kWh]
$\eta^{\text{char}}, \eta^{\text{dis}}$	: 蓄電池の充/放電効率
$L_{\text{st}}^{\text{max}}$	: 貯湯タンク容量 [ℓ]
Δt_{sec}	: 1 ステップの秒数
$T_{\text{hw}}^{\text{min}}$	: ユーザ希望の最低湯温 [°C]
$Q_{\text{st}}^{\text{min}}$	: 最低蓄熱量 [kJ]
q_{loss}	: 放熱ロス率
$L_{\text{st}}^{\text{d}}(k t)$	: 離散化されたタンク内の湯量 [ℓ]
$S_{\text{hw}}^{\text{d}}(k t)$	: 離散化された湯層の表面積 [m ²]

Given: $\{\widetilde{W}^+(k|t), \widetilde{W}^-(k|t), f^+(k), f^-(k)$
 $\tilde{\gamma}(k|t), \tilde{B}^{\text{cons}}(k|t), B^{\text{ref}}(k), B^{\text{min}}(k)$
 $B^{\text{obs}}(t), \tilde{Q}_{\text{use}}(k|t), \tilde{T}_a(k|t), \tilde{T}_w(k|t)$
 $T_a^{\text{obs}}(t), T_w^{\text{obs}}(t), Q_{\text{st}}^{\text{obs}}(t)$
 $L_{\text{st}}^{\text{obs}}(t), T_{\text{hw}}^{\text{obs}}(t)\}_{k \in [t+1, t+T]}$

find: $\{p(k|t), \alpha_{65}(k|t), \alpha_{90}(k|t)\}_{k \in [t+1, t+T]}$

which minimize:

$$Z = \sum_{\tau=t+1}^{t+T} F(\tau) W(\tau|t) \Delta t$$

$$+ \omega_1 \sum_{\tau=t+1}^{t+T} (\alpha_{65}^{\text{on}}(\tau|t) + \alpha_{90}^{\text{on}}(\tau|t))$$

$$+ \omega_2 \sum_{\tau=t+1}^{t+T} |p(\tau|t) - p(\tau-1|t)|$$

$$+ \omega_3 \sum_{\tau=t+1}^{t+T} S(\tau|t) \Delta t \quad (13)$$

where:

$$F(\tau) = \begin{cases} f^+(\tau), & \text{if } W(\tau|t) \geq 0 \\ f^-(\tau), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

subject to: $\forall k \in [t+1, t+T]$

$$W(k|t) = \widetilde{W}^+(k|t) + \widetilde{W}^-(k|t) + \chi_{\text{acdc}} p(k|t) + P_{\text{st}} + P_{\text{HP}}(k|t) \quad (15)$$

$$W(k|t) \leq W^{\text{max}} \quad (16)$$

$$\widetilde{W}^+(k|t) + \chi_{\text{acdc}} p(k|t) + P_{\text{st}} + P_{\text{HP}}(k|t) \geq 0 \quad (17)$$

$$W(k|t) + S(k|t) \geq 0 \quad (18)$$

$$P^{\text{dis}} \leq p(k|t) \leq P^{\text{char}} \quad (19)$$

$$B^{\text{min}}(k) \leq b(k|t) \leq B^{\text{max}} \quad (20)$$

$$b(k|t) \geq B^{\text{ref}}(k) \quad (21)$$

$$p(k|t) \tilde{\gamma}(k|t) = 0 \quad (22)$$

$$b(t|t) = B^{\text{obs}}(t) \quad (23)$$

$$b(k|t) = b(k-1|t) + (1 - \tilde{\gamma}(k|t)) \eta(k|t) p(k|t) \Delta t - \tilde{\gamma}(k|t) \tilde{B}^{\text{cons}}(k|t) \quad (24)$$

$$\eta(k|t) = \begin{cases} \eta^{\text{char}}, & \text{if } p(k|t) \geq 0 \\ \eta^{\text{dis}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

$$\tilde{T}_a(t|t) = T_a^{\text{obs}}(t) \quad (26)$$

$$\tilde{T}_w(t|t) = T_w^{\text{obs}}(t) \quad (27)$$

$$Q_{\text{st}}(t|t) = Q_{\text{st}}^{\text{obs}}(t) \quad (28)$$

$$L_{\text{st}}(t|t) = L_{\text{st}}^{\text{obs}}(t) \quad (29)$$

$$T_{\text{hw}}(t|t) = T_{\text{hw}}^{\text{obs}}(t) \quad (30)$$

$$0 \leq L_{\text{st}}(k|t) \leq L_{\text{st}}^{\text{max}} \quad (31)$$

$$\tilde{Q}_{\text{use}}(k-1|t) \leq Q_{\text{st}}(k-1|t) \quad (32)$$

$$T_{\text{hw}}(k|t) \geq T_{\text{hw}}^{\text{min}}, \quad \text{if } \tilde{Q}_{\text{use}}(k|t) > 0 \quad (33)$$

$$Q_{\text{st}}(k|t) \geq Q_{\text{st}}^{\text{min}} \quad (34)$$

$$\alpha_{65}(k|t) + \alpha_{90}(k|t) \leq 1 \quad (35)$$

$$\alpha_{\text{Tset}}(k|t) - \alpha_{\text{Tset}}(k-1|t) = \alpha_{\text{Tset}}^{\text{on}}(k|t) - \alpha_{\text{Tset}}^{\text{off}}(k|t) \quad (36)$$

$$COP(k|t) = (c_1 \tilde{T}_a(k|t) - c_2 \tilde{T}_w(k|t) - c_3 T_{set}(k|t) + c_4) COP_{ave} \Delta t_{sec} \quad (37)$$

$$Q_{HPWH}(k|t) = Q_{ave}(\alpha_{65}(k|t) + \alpha_{90}(k|t)) \Delta t_{sec} \quad (38)$$

$$P_{HP}(k|t) = \frac{Q_{HPWH}(k|t)}{COP(k|t)} \quad (39)$$

$$T_{set}(k|t) = 65\alpha_{65}(k|t) + 90\alpha_{90}(k|t) \quad (40)$$

$$L(k|t) = \frac{Q_{HPWH}(k|t)}{(T_{set}(k|t) - \tilde{T}_w(k|t)) cal} \quad (41)$$

$$Q_{st}(k|t) = (1 - q_{loss}) Q_{st}(k-1|t) + Q_{HPWH}(k-1|t) - \tilde{Q}_{use}(k-1|t) \quad (42)$$

$$L_{st}(k|t) = \begin{cases} L_{st}(k-1|t) + L(k-1|t) - L_{use}(k-1|t), & \text{if } T_{hw}(k-1|t) > \tilde{T}_w(k-1|t) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (43)$$

$$L_{use}(k|t) = \begin{cases} \frac{\tilde{Q}_{use}(k|t)}{(48 - \tilde{T}_w(k|t)) cal} - \frac{\tilde{Q}_{use}(k|t)(T_{hw}(k|t) - 48)}{(48 - \tilde{T}_w(k|t))^2 cal} & \text{if } T_{hw}(k|t) \leq 53 \\ \frac{\tilde{Q}_{use}(k|t)}{(60 - \tilde{T}_w(k|t)) cal} - \frac{\tilde{Q}_{use}(k|t)(T_{hw}(k|t) - 60)}{(60 - \tilde{T}_w(k|t))^2 cal} & \text{if } 53 < T_{hw}(k|t) < 68 \\ \frac{\tilde{Q}_{use}(k|t)}{(80 - \tilde{T}_w(k|t)) cal} - \frac{\tilde{Q}_{use}(k|t)(T_{hw}(k|t) - 80)}{(80 - \tilde{T}_w(k|t))^2 cal} & \text{if } 68 \leq T_{hw}(k|t) \end{cases} \quad (44)$$

$$T_{hw}(k|t) = \begin{cases} T_{hw}(k-1|t) - \frac{L(k-1|t)}{L_{st}^d(k|t)} T_{hw}(k-1|t) + \frac{L(k-1|t)}{L_{st}^d(k|t)} T_{set}(k-1|t) - \frac{S_{hw}^d(k-1|t) K_a}{L_{st}^d(k|t) cal} T_{hw}(k-1|t) + \frac{S_{hw}^d(k-1|t) K_a \tilde{T}_a(k-1|t)}{L_{st}^d(k|t) cal} - \frac{K_w}{L_{st}^d(k|t) cal} T_{hw}(k-1|t) + \frac{K_w \tilde{T}_w(k-1|t)}{L_{st}^d(k|t) cal}, & \text{if } L_{st}(t) > 0 \\ \tilde{T}_w(k|t), & \text{if } L_{st}(t) = 0 \text{ and } \alpha_{T_{set}}^{on}(t) = 0 \\ T_{set}(k|t), & \text{if } L_{st}(t) = 0 \text{ and } \alpha_{T_{set}}^{on}(t) = 1 \end{cases} \quad (45)$$

$$\begin{cases} L_{st}^d(k|t) = 0, \\ S_{hw}^d(k|t) = 0, & \text{if } L_{st}(k|t) = 0 \\ L_{st}^d(k|t) = 50, \\ S_{hw}^d(k|t) = 0.59, & \text{if } 0 < L_{st}(k|t) \leq 100 \\ L_{st}^d(k|t) = 200, \\ S_{hw}^d(k|t) = 1.75, & \text{if } 100 < L_{st}(k|t) \leq 300 \\ L_{st}^d(k|t) = 350, \\ S_{hw}^d(k|t) = 2.9, & \text{if } 300 < L_{st}(k|t) \leq 370 \end{cases} \quad (46)$$

また今回設定したパラメータの値を Table 1 にまとめる。

Table 1 Parameter setting

T	48	Δt	0.5
ω_1	1	ω_2	1×10^{-4}
ω_3	200	χ_{ACDC}	1.03
P_{st}	1.55×10^{-1}	W_{max}	6
P_{char}	3	P_{dis}	-3
B^{max}	24	B^{min}	7.2
η^{char}	0.96	η^{dis}	1.04
L_{st}^{max}	370	T_{hw}^{min}	45
Q_{st}^{min}	8000	c_1	1.6×10^{-2}
c_2	1.16×10^{-2}	c_3	8.3×10^{-3}
c_4	1.47	COP_{ave}	4
Δt_{sec}	1800	Q_{ave}	4.5
q_{loss}	5×10^{-3}	K_a	1×10^{-3}
K_w	5.27×10^{-4}	-	-

なおパラメータは χ_{ACDC} , P_{st} , W_{max} , P_{char} , P_{dis} , B^{max} , B^{min} , η^{char} , η^{dis} の値は [15] から引用, $c_1 \sim c_4$, K_a , K_w の値は [18] から引用もしくは導出, q_{loss} の値は文献 [11] から引用した. L_{st}^{max} , COP_{ave} , Q_{ave} の値は一般的な HPWH の性能を参考に設定した.

3.1.1 目的関数

(13) 式の第一項は 24 時間先までの電気料金を表す. また (14) 式によって, 買電, 売電価格が切り替わる. 第二項は 24 時間後までの HPWH の起動回数を表す. 起動回数とは, HPWH を OFF 状態から ON 状態に切り替える回数を指す. この項により, 頻繁な ON/OFF の切り替えを抑制し, 起動時のエネルギー損失を考慮している. ω_1 は, 文献 [11] を参考に形式的に HPWH の起動ステップで 10% のエネルギー損失があると形式的に仮定し, その熱量を生成するのに必要な電力を発電電力から消費した場合に需要家が被る金銭的成本 (1 回の起動あたりおよそ 1[yen]) とおおよそ等しくなるような値を設定した. 第三項は充放電の過度な切り替えの抑制項であり, 充電と放電が頻繁に切り替わることによる蓄電池の劣化を抑制することを意図している. ω_2 の値は, 評価値がほとんど同じになる解が複数あった場合に, その中

で充電と放電の急激な切り替えがより少ないものを選ばれるように、他の項に影響を与えないような小さい値を試行錯誤的に見つけ設定した。第四項は余剰電力に対するペナルティ項であり、この項により系統に売却する電力量を低減する。 ω_3 の値は、今回はまず極力余剰電力を減らしたうえで電気料金を最小化する仕様で設計を行ったため、この項の影響が他の項と比較して大きくなるような値を試行錯誤的に見つけ設定した。この ω_3 に関しては値を変化させることで余剰電力の抑制と電気料金の抑制のバランスが変化し、結果が大きく変化するものであるため、 ω_3 を変化させた際の影響の調査は余剰電力の抑制に対する需要家への報酬の検討とともに今後の課題とする。

3.1.2 家庭の消費電力に関する制約

(15)式は正味の消費電力の計算式であり、正のときは買電、負のときは売電を表す。(16)式は瞬間電力の上限を表している。(17)式は蓄電池から家庭内の消費電力を上回る電力の放電はできないことを意味しており、蓄電池に貯めた電力を系統へ売却することができないことを表した制約である。(18)式は余剰電力計算のための式であり、目的関数第四項と合わせて $W(k|t) < 0$ のときのみ $S(k|t)$ が $-W(k|t)$ と等しくなることを表している。

3.1.3 車載蓄電池に関する制約

(19)式は蓄電池の充放電能力を表したものである。(20)式は蓄電容量と最低蓄電量を表したものである。(21)式は出発時に利用者の希望する最低残量を満たすための制約である。(22)式は車使用中の蓄電池の充放電に関する制約である。この制約により車使用中は蓄電池として利用ができないことを明示している。(23)式は観測値と計画上の現在時刻の蓄電残量の値を合わせるための制約であり、(24)式は各ステップの蓄電残量を計算する制約である。またこのときの充放電効率の切り替えを表すのが(25)式である。

3.1.4 HPWHに関する制約

(26)、(27)式は気温と水温の予測値の現在時刻の値を観測値と合わせるための制約、(28)~(30)式は観測値と計画上の現在時刻の蓄熱量、蓄湯量、湯温の値を合わせるための制約である。(31)式はタンク貯湯量の上下限を表した制約である。(32)式は使用熱量に関する制約である。これにより、熱量の需要を常に確保できるような運転計画が立案される。(33)式は湯使用時の温度に関する制約である。これにより、湯の使用時には湯温が $T_{hw}^{\min}$ 以上となるように計画される。本研究では最低湯温 $T_{hw}^{\min}$ は一般的な湯の使用温度 $43[^\circ\text{C}]$ を基準にモデル化誤差を考慮して $45[^\circ\text{C}]$ と設定した。(34)式は最低蓄熱量に関する制約である。本研究では最低蓄熱量 $Q_{st}^{\min}$ を、1ステップで沸き上げられる熱量を目安に $8000[\text{kJ}]$ と設定した。(35)式はHPWHの 65°C 沸き上げと 90°C 沸き上げが同時に計画されることを防止する制約である。また、(36)式は α^{on} と α^{off} を決定するための制約であり、これによ

り α^{on} は α が0から1に切り替わるステップで1となり、 α^{off} は α が1から0に切り替わるステップで1となる。(37)~(46)式はHPWHモデルに関する制約である。

前節で述べた(6)、(10)、(12)式の近似を行ったものがそれぞれ(42)式、(44)式、(45)、(46)式である。まず(6)式に関しては文献[11]を参考に、(7)式とまとめて、放熱量を1ステップ前の蓄熱量にのみ依存するようにモデルの簡易化を行った。また(10)式に関しては、 T_{hw} について三つの T_{hw} 周りでテイラー展開を行い線形化したものを湯温によって切り替える区分線形モデルで表現した。最後に(12)式は、 L_{st} 、 S_{hw} を離散化して考え、その値を切り替えることで区分線形モデルで表現した。これらの区分線形化による近似誤差が最適化結果に与える影響を調査するため、もとの非線形モデルと区分線形化モデルそれぞれに対し、一般的なHPWHの運転方法を1週間分入力した場合の Q_{st} 、 L_{st} 、 T_{hw} の推移を比較した。二つのモデルの相対誤差の平均値をTable 2に示す。また代表して Q_{st} の推移の様子をFig. 1に示す。Table 2からわかるように各値に近似誤差は大きくても10%程度に抑えられている。また、Fig. 1からわかるように、誤差は徐々に大きくなっていくものの発散してはいない。今回制御手法として用いるモデル予測制御は30分ごとにモデル化誤差の修正が可能であることも加え、これらのことから近似誤差が最適化結果に与える影響は小さいと考えられる。なお(14)式などに含まれる場合分けは、論理変数を用いてMLDSに変換できる。詳しい説明に関しては文献[22]を参考にされたい。

Table 2 Relative error between nonlinear original and piece-wise linear approximation models

Q_{st}	L_{st}	T_{hw}
9.81%	11.9%	1.78%

Fig. 1 Difference of Q_{st} between nonlinear original and piece-wise linear approximation models

4. 数値実験

4.1 実験設定

車載蓄電池とHPWHを同時最適化した際に、相補的な運用が実現され、車載蓄電池の離脱を考慮しつつ電気

代と余剰電力の削減が行われることを確認するため数値実験による検証を行う。またその際今まで述べてきた同時最適化 (Joint optimization) に加え、計算時間低減を目的とした逐次最適化 (Sequential optimization) を提案する。逐次最適化とは、まず車載蓄電池を考慮せずに HPWH 単体での運用計画を最適化し、その結果得られた HPWH の運転計画と、家庭の消費電力、発電電力の予測に基づき、車載蓄電池の最適な充放電計画を算出する手法である。比較対象としては、HPWH の運転に関しては、現在一般的である夜間に運転を行うものとし、蓄電池に関しては最適化を行う手法とした (Conventional method)。具体的な HPWH の運転方法としては朝 6 時に貯湯タンクが満タンになるように運転開始時間が逆算されるものとする。また実験を行った計算機のスペック、最適化ソルバーを Table 3 に示す。

Table 3 Computer performance

OS	Windows 7 Professional
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-2600S CPU@2.8GHz
Memory	8[GB]
Solver	Gurobi6.5

Fig. 2 Electricity price

以下、本研究で行う実験内容に関して述べる。実行期間は 1 週間とし、対象とする家庭は、HEMS により充放電の制御が可能な EV とその充放電システム、ON/OFF の制御が可能な HPWH、発電機器としての家庭用 PV システムを設備としてもつものとする。消費電力、使用熱量、発電電力は豊田市実証実験 [17] で得られた 4 人家族の家庭の 5 月の実際のデータを用いる。また、外気温は気象庁データベース [23] より、同一日の実データを用いた。また電力価格は、購入価格は中部電力 E ライフプラン ([24] より引用) を用い、売却価格は固定価格買取制度の買取期間終了後に予想される価格 [25] を用いた (Fig. 2 参照)。車使用に関しては、通勤での利用を想定した carA、パートへの通勤利用を想定した carB、買物送迎での利用を想定した carC の 3 パターンを想定する。各走行パターンの出発、帰宅時刻、車走行による消費電力、出発時に利用者が希望する最低蓄電残量を Tables 4~6 に示す。

Table 4 Pattern of car use(carA)

Departure time	Return time	Power consumption	Lower bound
8:00	20:00	6[kWh]	19.2[kWh]

Table 5 Pattern of car use(carB)

Departure time	Return time	Power consumption	Lower bound
8:00	12:00	1[kWh]	12[kWh]
15:00	18:00	1[kWh]	12[kWh]

Table 6 Pattern of car use(carC)

Departure time	Return time	Power consumption	Lower bound
7:30	8:30	1[kWh]	12[kWh]
13:30	15:00	1[kWh]	12[kWh]
17:00	18:00	1[kWh]	12[kWh]

4.2 実験結果

各ステップの平均計算時間を Table 7、1 週間の余剰電力の総計を Table 8、1 週間の電気料金の総計を Table 9 に示す。なお計算時間は小数点以下第一位切り上げ、余剰電力は小数点以下第三位四捨五入、電気料金は小数点以下第一位で四捨五入を行ったものである。また最適化が実行された結果の例として 3 日目の運用結果を Figs. 3~5 に示す。縦軸は、第一段が電力量、第二段が蓄電残量、第三段が HPWH の起動状態、第四段が熱量、第五段が気温であり、それぞれ横軸を時間として 1 日の運用結果を表している。第一段のグラフにおける蓄電池の充放電電力量は、正のとき充電、負のとき放電を表す。また正味の消費電力量は、正のとき外部系統からの電力購入、負のとき売却を表している。(a) は従来手法、(b) は逐次最適化、(c) は同時最適化による結果である。

4.3 考察

4.3.1 計算時間

逐次最適化、同時最適化ともに 1 ステップあたりの平均計算時間は全パターンで制御周期 30 分より少なく抑えられており、HPWH モデルの線形化により現実的な計算時間で解を得られたことが確認できる。また逐次最適化の結果と同時最適化の結果を比較すると基本的には逐次最適化による計算の方が時間を少なく抑えられていることが確認できる。とくに車使用パターンとして carC を想定した場合をみると、1 ステップあたり 1 分以上と大きな差が出ていることがわかる。これは同時最適化では解の自由度が増え、最適解周辺の解のパターンが逐次最適化に対して多くなりうる例を表した結果である。場合によっては carB のように同時最適化の方が短くなる

Table 7 Computation time[s/step]

	Conventional	Sequential	Joint
carA	1	5	6
carB	1	5	3
carC	1	5	74

Table 8 Surplus power[kWh/week]

	Conventional	Sequential	Joint
carA	37.64	19.9	20.12
carB	24.02	10.72	7.89
carC	11.96	10.42	4.69

Table 9 Electricity charge[Yen/week]

	Conventional	Sequential	Joint
carA	2779	2835	2809
carB	1932	1995	1990
carC	1857	1935	1814

結果も見られたが、これは結果的に同時最適化の解が早く見つかった例であり、逐次最適化の結果が悪化したわけではなく、逐次最適化のほうが安定した計算時間で計算できているといえる。

4.3.2 余剰電力

まず carA に対する結果を見ると、従来手法に比べて逐次最適化、同時最適化ともに余剰電力を抑えられていることが確認できる。これは日中に HPWH の運転を行うことで余剰電力の吸収を行った結果である。またその際、設定温度 90℃ の運転を行うことでより多くの電力を消費するようにしていることが確認できる。また Fig. 3 のように、逐次最適化と同時最適化の間には、日中蓄電池が使えない時間帯が多かったことからほとんど差が見られない。つぎに carB の結果を見ると、先ほどと同様に従来手法に比べて逐次最適化、同時最適化ともに余剰電力を抑えられていることが確認できるが、逐次最適化と同時最適化の間にも多少の差が見られる。これは Fig. 4 より、同時最適化では車が走行中で蓄電池による余剰電力の吸収が行えない時間帯に HPWH の運転により余剰電力の吸収を行っているためである。またその際、HPWH の消費電力が余剰電力を大きく上回る部分では、設定温度 65℃ のより消費電力の少ない運転が選択することで需要家にむだな電力の購入を極力行わせない計画が行われていることも確認できる。最後に carC に対する結果を見ると、carB と似たような結果が見られる。Fig. 5 を見ると、同時最適化では車走行中に HPWH の運転が行われ、さらに需要家の湯の需要に対して足りない分は車の駐車中に余剰電力と蓄電池の電力を使って運転することで、需要家の要望を満たしながら余剰電力の大幅な削

Fig. 3 Result of optimization(carA)

Fig. 4 Result of optimization(carB)

Fig. 5 Result of optimization(carC)

減が実現されていることが確認できる。

4.3.3 電気料金

逐次最適化、同時最適化では余剰電力を HPWH の運転で吸収する際、少量の電力の購入が行われることがあったため、夜間に HPWH の運転を行う従来手法の方が安く抑えられているものも見られる。しかし極力電気料金に影響しないように計画が行われたことから差は小額に抑えることができています。また日中の気温が高く COP が良い値を示す時間帯に運転が行われたことも、電

気料金を抑えることができた一つの要因であると考えられる。

4.3.4 総括

以上の考察より、carA のように日中車を使用することが多い家庭に関しては逐次最適化で十分な解を得ることができ、逆に carB, carC のように日中車が自宅にあることが多い場合は逐次最適化に比べ同時最適化のメリットが大きくなると考えられる。すなわち各家庭に対し車の使用に応じた手法を適用することで、計算コストに見合う効果が得られることがわかる。

5. おわりに

本研究では車載蓄電池の切り離しと居住者の利益の最大化を考慮しつつ余剰電力削減を行う、EV の車載蓄電池と HPWH の最適運転を行うモデル予測型 HEMS の開発を目指し、車載蓄電池の充放電計画と HPWH の運転方法の同時最適化問題の定式化を行った。また HPWH モデルを最適化問題に組み込む際、非線形 HPWH モデルの区分線形化を行い、解くべき問題を混合整数線形計画問題に変形することで現実的な計算時間で解が得られるようにした。豊田市実証実験の実際の需要データを用いた数値実験では、車載蓄電池、HPWH の相補的な運用が行われることで車載蓄電池の離脱を考慮しつつ電気代と余剰電力の削減が行われることが確認され、とくに日中、車が HEMS に接続してある時間が長い家庭に対して利得が大きくなるという結果が得られた。

今後の課題としては、今回行わなかった予測に関して実際に予測モデルを組み込んだ場合の影響の調査や、余剰電力を削減したことによる系統からの報酬の検討などが考えられる。

謝 辞

本研究は JST CREST 「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」の助成を受けております。本研究を遂行するにあたり、株式会社デンソー様から貴重なご意見と実験データをいただきました。また東京大学大学院新領域創成科学研究科馬場旬平准教授には貴重なご意見をいただきました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] 経済産業省 (2014, Apr.) エネルギー基本計画 [Online]. Available: [//www.meti.go.jp/press/2014/04/20140411001/20140411001-1.pdf](http://www.meti.go.jp/press/2014/04/20140411001/20140411001-1.pdf)
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁 (2016) 平成 27 年度エネルギーに関する年次報告 [Online]. Available: [//www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016pdf/whitepaper2016pdf_2_1.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016pdf/whitepaper2016pdf_2_1.pdf)
- [3] 西大條, 鈴木, 森野, 岡, 竹林: 地方都市における一戸建て住宅の太陽光発電余剰電力の電気自動車バッテリーによる吸収に関する調査研究; 日本建築学会環境系論文集, 第 80 巻, 第 708 号, pp. 149–158 (2015)
- [4] 平田, 上地: 電力需要・供給バランスを実現する車載蓄電池の分散型充電管理方策に関する考察; システム制御情報学会論文誌, Vol. 28, No. 11, pp. 427–434 (2015)
- [5] 日本冷凍空調工業会 (2015) 家庭用ヒートポンプ給湯機の国内出荷台数の推移 [Online]. Available: [//jraia.or.jp/statistic/s_heatpump.html](http://jraia.or.jp/statistic/s_heatpump.html)
- [6] 宮本, 林: 長期間運用を想定したヒートポンプ給湯器による太陽光発電システムの電圧上昇抑制効果; 電気学会論文誌. B, 電力・エネルギー部門誌, Vol. 135, No. 7, pp. 423–436 (2015)
- [7] Y. Saito, Y. Tomita, K. Imai, M. Tsurugai and S. Tamura: Trial of carbon-free micro-grid project in Japan: Smart Grid Engineering (SGE); 2012 IEEE International Conference on, pp. 1–5 (2012)
- [8] T. Masuta and A. Yokoyama: Supplementary load frequency control by use of a number of both electric vehicles and heat pump water heaters; IEEE Transactions on Smart Grid, Volume 3, Issue 3, pp. 1253–1262, IEEE (2012)
- [9] 大嶺, 八田, 浅利, 上野, 小林: ヒートポンプ式給湯器と電力貯蔵装置を用いた太陽光発電余剰電力利用のための需要地系統運用手法; 電気学会論文誌. B, 電力・エネルギー部門誌, Vol. 133, No. 7, pp. 631–641 (2013)
- [10] 宮本, 林: 家庭用蓄電池とヒートポンプ給湯器による多数台太陽光発電システムの電気料金改善効果; 電気学会論文誌. B, 電力・エネルギー部門誌, Vol. 136, No. 3, pp. 245–258 (2016)
- [11] 池上, 岩船, 荻本: 電力需給調整力確保に向けた家庭内機器最適運転計画モデルの開発; 電気学会論文誌. B, 電力・エネルギー部門誌, Vol. 130, No. 10, pp. 877–887 (2010)
- [12] Q. Zhang, T. Tezuka, K. N. Ishihara and B. C. Mclellan: Integration of PV power into future low-carbon smart electricity systems with EV and HP in Kansai Area, Japan; Renewable Energy, Vol. 44, pp. 99–108, Elsevier (2012)
- [13] 山本, 広橋, 林: 需要家の行動パターンを考慮した住宅用 PV システムのための EV・HP の強調制御手法の提案と定量的評価; 電気学会研究会資料, pp. 153–158 (2013)
- [14] Y. Hanai, K. Yoshimura, J. Matsuki and Y. Hayasi: Load management using heat pump water heater and electric vehicle battery charger in distribution system with PV; Journal of International Council on Electrical Engineering, Volume 1, Issue 2, pp. 207–213 (2011)
- [15] 伊藤, 周: 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, pp. 459–464 (2014)
- [16] T. Yamaguchi, M. Sumiya, S. Inagaki, T. Suzuki, A. Ito, M. Fujita and J. Kanamori: Model predictive control of car storage battery in HEMS considered car traveling; SICE Annual Conference, 2013 Proceeding

of, pp. 1352–1358 (2013)

- [17] 経済産業省 (2016, Jun) 次世代エネルギー・社会システム協議会 (第 18 回) 配布資料, 資料 6-2 豊田市プレゼン資料 [Online] Available: http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633/pdf/018_06_02.pdf
- [18] 奥谷, 馬場, 太田: 家庭用ヒートポンプ給湯器の可制御負荷利用時における需要側・系統側影響の検討; 電気学会論文誌. B, 電力・エネルギー部門誌, Vol. 136, No. 1, pp. 72–78 (2016)
- [19] T. Yamaguchi, A. Kawashima, A. Ito, S. Inagaki and T. 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, pp. 7–14 (2013)
- [20] 工藤, 竹内, 野崎, 遠藤, 角田: エネルギーネットワークにおける太陽光発電予測技術; 電気学会論文誌. B, 電力・エネルギー部門誌, Vol. 127, No. 7, pp. 847–853 (2007)
- [21] J. Widen, M. Lundh, I. Vassileva, E. Dahlquist, K. Ellegard and E. Wackelgard: Constructing load profiles for household electricity and hot water from time-use data-modelling approach and validation; *Energy and Buildings*, Vol. 41, Issue 7, pp. 753–768, Elsevier (2009)
- [22] 浅野, 津田, A. Bemporad and M. Morari: ハイブリッドシステムの予測制御とそのプロセス制御への適用; システム/制御/情報, Vol. 46, No. 3, pp. 110–119 (2002)
- [23] 気象庁 過去の気象データ検索 [Online]. Available: [//www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?sess=6ef525a9cdef28cea634ce58ca736e68](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?sess=6ef525a9cdef28cea634ce58ca736e68)
- [24] 中部電力 E ライフプラン (3 時間帯別電灯) -基本メニュー (電灯契約) [Online]. Available: [//www.chuden.co.jp/home/home_menu/home_basic/hba_eliflife/index.html](http://www.chuden.co.jp/home/home_menu/home_basic/hba_eliflife/index.html)
- [25] 経済産業省調達価格等算定委員会 (2016, Jan.) 平成 28 年 1 月 19 日配布資料 [Online] Available: [//www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/pdf/020_01_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/pdf/020_01_00.pdf)

著者略歴

なわ たい いく み
縄 田 郁 海

1992 年 9 月 4 日生. 2016 年 3 月名古屋大学工学部機械航空工学科卒業, 同年 4 月名古屋大学工学研究科博士前期課程入学, 現在に至る.

さ さ き ゆう すけ
佐々木 勇 介

1991 年 9 月 20 日生. 2014 年 3 月名古屋大学工学部機械航空工学科卒業, 2016 年 3 月名古屋大学工学研究科博士前期課程卒業, 同年 4 月名古屋大学工学研究科博士後期課程入学, 現在に至る.

かわ し ま あき ひこ
川 島 明 彦

1978 年 7 月 11 日生. 2002 年千葉大学工学部都市環境システム学科卒業, 2004 年同大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了, 2010 年同大学大学院博士後期課程単位取得退学, 2013 年博士 (工学) 取得. 同年名古屋大学工学研究科特任研究員, 2015 年同大学グリーンモビリティ連携研究センター特任助教, 現在に至る. 組合せ最適化, エネルギー管理システムの研究に従事. 計測自動制御学会, 電気学会, IEEE の各会員.

いな が き しん きち
稲 垣 伸 吉

1975 年 11 月 24 日生. 2003 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了. 同年名古屋大学大学院工学研究科助手, 2007 年同助教, 2008 年同講師, 2015 年同准教授, 現在に至る. 分散システム, 多脚移動ロボット, 人間行動モデル, エネルギー管理システムに関する研究に従事. 博士 (工学). 計測自動制御学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会, IEEE の各会員.

すず き たつ や
鈴木 達 也 (正会員)

1964 年 1 月 3 日生. 1991 年名古屋大学大学院博士課程後期課程電子機械工学専攻修了. 同年名古屋大学工学部助手, 2000 年同助教授を経て, 2006 年同教授, 現在に至る. 離散事象システム論やハイブリッドシステム論に基づいた人間中心型モビリティシステム, エネルギーマネジメントシステムに関する研究などに従事. 工学博士. 計測自動制御学会, 自動車技術会, 電子情報通信学会, 電気学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会, IEEE の各会員.