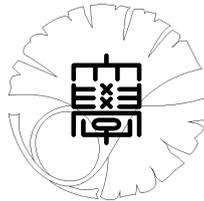


数理科学実践研究レター 2019–14 November 28, 2019

**EV の確率を用いた充電開始時刻の決定による
総消費電力量の操作**

by

千葉 悠喜



UNIVERSITY OF TOKYO
GRADUATE SCHOOL OF MATHEMATICAL SCIENCES
KOMABA, TOKYO, JAPAN

EV の確率を用いた充電開始時刻の決定による総消費電力量の操作

千葉悠喜¹ (東京大学大学院数理科学研究科)

Yuki Chiba (Graduate School of Mathematical Sciences, The University of Tokyo)

概要

電力システムの安定化に電気自動車(EV)が期待されている。本研究は、確率によって電気自動車の充電開始時刻を決定することで、消費電力の安定化が可能なことをシミュレーションを通じて示した。

1 はじめに

電力は必要時に過不足なく供給する必要がある、時間により需要が変化しているため、それに合わせて供給する必要がある。電気自動車(EV)は充電時間を適切に操作することで総消費電力の変動を抑え、電力システムを安定化できると期待されている。しかし、電力事業者が、個別の EV に対して電力需要に合わせて充電開始命令を送ることは、今後の EV の台数が増えた場合を考えるとコストが高く現実的ではない。本研究では、ユーザーの行動等から推定される電力消費を用いて、電力事業者が充電を始める時刻を確率を決定し、各 EV がその確率に従って充電行動を行う、というモデルを考える。ユーザーの充電行動のモデルは充電速度に関する条件の有無がある確率的充電行動モデルと目標充電時間指定型確率的充電行動モデルの2つのモデルを考える。これらのモデル、特に目標充電時間指定型確率的充電行動モデルが総消費電力を安定化させることを複数のシミュレーションと提案する指標により示した。第2章では、本研究におけるユーザーの充電行動モデルを提案する。第3章において、複数のシミュレーション結果を提示する。

2 充電行動モデル

各ユーザー i は、以下のパラメーターを持つとする。

- (推定) 帰宅時刻 a_i , (推定) 出発時刻 b_i , (推定) 帰宅時充電量 $E_i(a_i)$, 最低充電量 m_i , 必要充電量 N_i

時刻 t における EV の電池残量を $E_i(t)$, その時刻において充電する電力を $W_i(t)$ とする。各ユーザーは各パラメーター、および電力事業者から送られてきた確率 ρ を基に、充電行動 $W_i: [a_i, b_i] \rightarrow \mathbb{R}$ を決定する。ユーザーの EV は $V_1, V_2, \dots, V_n = V_{max}$ のいずれかの充電速度で充電できるとする。また、家庭の総消費電力を $g(t)$ とする。

電力事業者は以下のようにして、各ユーザーに送る確率 ρ を定める。

- (1) 各ユーザーのパラメーターを、統計情報などを用いて推定する
- (2) 初期確率 ρ を適当に定める
- (3) 全ユーザーの充電行動のシミュレーションを行う
- (4) $F(t) = g(t) + \sum_i W_i(t)$ とする。
- (5) $F(t)$ の分散を減らすように充電確率 ρ を変化させる。
- (6) 適当な条件を満たすように (3)-(5) を繰り返し行い、最終的にユーザーに送る充電確率 $\rho(T)$ を決定する。

アルゴリズム 1 確率的充電行動モデル

input ρ : 充電確率

output W_i 充電行動

$W_i(t) \leftarrow 0$ for $t \in [a_i, b_i]$, $u \leftarrow a_i$

if $E_i(a_i) < m_i$ then

$u \leftarrow (m_i - E_i(a_i))/V_{max}$, $W_i(t) \leftarrow V_{max}$ for $t \in [a_i, u]$, $E_i(u) \leftarrow m$

end if

if $E_i(u) < N_i$ then

$T \leftarrow (N_i - E_i(u))/V_{max}$

if $b_i - u \leq T$ then

$W_i(t) \leftarrow V_{max}$ for $t \in [u, b_i]$

else

ρ を用いて $(u, b - T)$ 上の確率 ρ_T を定め, それを用いて $v \in (s, b_i - T)$ を選ぶ

$W_i(t) \leftarrow V_{max}$ for $t \in [v, v + T]$

end if

end if

ユーザーの充電行動モデルとして, 確率的充電行動モデル (1) と目標充電時間指定型確率的充電行動モデル (アルゴリズム 2) の 2 つのモデルを考える .

確率的充電行動モデルは, 最低充電量 m_i までは, 帰宅してからすぐに充電を行い, m_i から必要充電量 N_i までは, 送られてきた確率 ρ を基に充電時間を決定するというものである . 目標充電時間指定型確率的充電行動モデルは, 最低充電量 m_i までは, 帰宅してからすぐに充電を行うというのは同じだが, それ以降の充電行動に対し, 目標充電時間 h にできるだけ近くなるように充電速度を変えて確率的に充電時間を決定するというものである .

3 シミュレーション結果

12 時から 36 時 (翌日 12 時) までの 24 時間における充電行動のシミュレーションを行った . 時間の刻み幅を 1/6 時間とし, 各区間を $[t_j - 1/12, t_j + 1/12]$ とする . 全ユーザー数を n とする . EV の充電可能速度 V_i は, 1 時間で 0.5, 1.0, ..., 3.0kWh とし, 目標充電時間 h は 9 時間とする . 各ユーザーの帰宅時間, 出発時間は, [1] の通勤用走行パターンモデルをベースに用い, 一様分布によって前後するようにした . 最低充電量, 必要充電量は, 走行パターンから計算される消費電力量の値から適当に決定した . 場合により, 全ユーザーのうち適当な確率で, 入力したデータより消費電力量が非常に多くなる予定外行動ユーザーをいれた . 電力事業者は (3)-(5) の操作を 10 回繰り返し充電確率を決定した .

図 1 はユーザー数 $n = 10000$ において, 帰宅後すぐに充電を開始したもの (a) および, 確率的充電行動モデル (b), 目標充電時間指定型確率的充電行動モデル (c) のあるシミュレーションによる消費電力量である . 帰宅後すぐに充電を開始したシミュレーションでは, 18 時前後において電力の消費のピークが来てしまっている . 一方, 提案する確率的充電行動モデル, 目標充電時間指定型確率的充電行動モデルのどちらにおいても 18 時から翌朝 6 時までの消費電力量が安定していることがわかる . 図 2 は複数回のシミュレーションを行い, 各回の消費電力量を箱ひげ図で表したものである . どちらもシミュレーションごとの差が少ないが, 目標充電時間指定型確率的充電行動モデルの方がより安定しているように見える . シミュレーションの評価の参考のために, 以下の 2 つの指標を導入する .

$$X = \sum_{18 \leq t_j < 30} (\max_k F(t_k) - F(t_j))/n, \quad Y = \sum_{18 \leq t_j < 30} |F(t_k) - F(t_{k+1})|/n \quad (1)$$

¹ychiba@ms.u-tokyo.ac.jp

アルゴリズム 2 目標充電時間指定型確率的充電行動モデル

input ρ : 充電確率, h : 目標充電時間

output W_i 充電行動

$W_i(t) \leftarrow 0$ for $t \in [a_i, b_i]$, $u \leftarrow a_i$

if $E_i(a_i) < m_i$ then

$u \leftarrow (m_i - E_i(a_i))/V_{max}$, $W_i(t) \leftarrow V_{max}$ for $t \in [a_i, u]$, $E_i(u) \leftarrow m$

end if

if $E_i(u) < N_i$ then

$l \leftarrow (N_i - E_i(u))/h$

l に近い V_i を選び, それを K とする

$T \leftarrow (N_i - E_i(u))/K$

if $b_i - u \leq T$ then

$W_i(t) \leftarrow K$ for $t \in [u, b_i]$

else

ρ を用いて $(u, b - T)$ 上の確率 ρ_T を定め, それを用いて $v \in (s, b_i - T)$ を選ぶ

$W_i(t) \leftarrow K$ for $t \in [v, v + T]$

end if

end if

指標 X は, 18 時から翌朝 6 時の各時間区間における総消費電力の最大値と総消費電力の差の合計であり, 供給電力を常に $\max_k F(t_k)$ としたときの損失を表している. 指標 Y は, 18 時から翌朝 6 時の各時間区間における総消費電力の差の絶対値の合計であり, 総消費電力の変動の大きさを表している. どちらの指標も小さいほど, 総消費電力が安定していることを表している. 図 3 が $n = 10000$ における確率的充電行動モデル, 目標充電時間指定型確率的充電行動モデルのシミュレーション結果の指標を箱ひげ図で表したものである. どちらの指標も目標充電時間指定型確率的充電行動モデルの方が小さく, 各時間の消費電力がより安定していると推測できる.

同様に, $n = 1000$ における各モデルのシミュレーション結果とその指標が図 4 と図 5 である. 確率的充電行動モデルでは, シミュレーションごとに各時間の消費電力が異なり, 指標の値も大きくなっている一方, 目標充電時間指定型確率的充電行動モデルにおいては変動幅が小さく, 指標の値も小さい. 目標充電時間指定型確率的充電行動モデルは充電速度が遅く充電時間が長いため, 確率によって充電開始時刻が偏っていてもその影響が出にくいと推測できる.

図 6 は目標充電時間指定型確率的充電行動モデルにおいて, 家庭の消費電力を別のものに変えてシミュレーションした結果である. (a) があるシミュレーションの消費電力であり, (b) が複数回のシミュレーション結果の箱ひげ図である. 全体的に安定はしているが, 翌 3 時付近に消費電力のピークができていくことがわかる. 図 7 は 2 つの家庭消費電力における指標の箱ひげ図である. 特に, 指標 X において差ができていくことがわかる. これは充電確率の求め方を変えることで改善できる可能性があるため, それについて検討する必要がある.

電力事業者の確率決定のシミュレーションでは 1%, 実際の充電行動のシミュレーションでは 5% の確率で予定外行動をする場合の, 目標充電時間指定型確率的充電行動モデルの箱ひげ図および, 指標が図 8 である. 箱ひげ図からはシミュレーション毎にある程度安定しているように見える. 指標の値自体は大きくなっているため, どれくらいまでなら現実的に問題ない範囲かどうかを検証していく必要がある.

4 結論

ユーザー数が十分多い場合, 確率的充電行動モデルを用いて充電確率を適切に与えることで, 総消費電力の変動を少なくすることができることが分かった. また, ユーザー数が少ない場合でも, 目標充

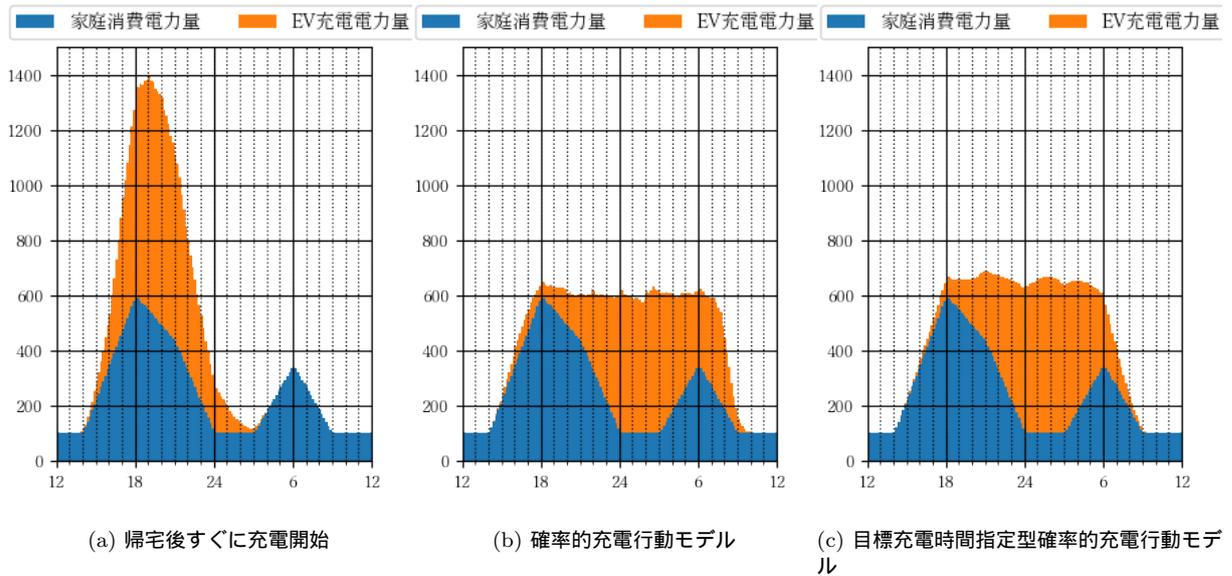


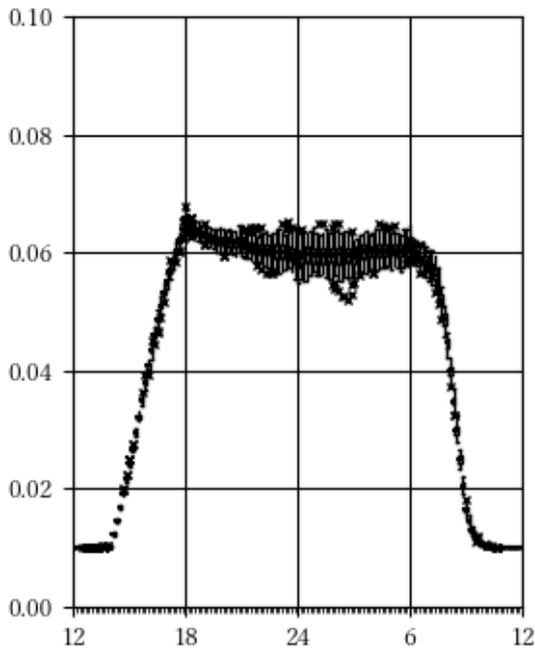
図 1: ユーザー数 $n = 10000$ における各モデルの消費電力量

電時間指定型確率的充電行動モデルを用いて充電速度を遅くし、充電時間を長くすることで、総消費電力を安定させることができた。しかし、状況によっては不十分な部分も多いので、より良い確率の決定方法や、充電時間の選び方に関して検討する必要がある。また、シミュレーションの評価の参考に 2 つの指標を導入したが、どの範囲まで現実的に問題ないかを検証していく必要がある。さらに、今回のシミュレーションでは通勤用走行パターンモデルのみを用いたが、非通勤用走行パターン等にも適用できるモデルの構成をする必要がある。

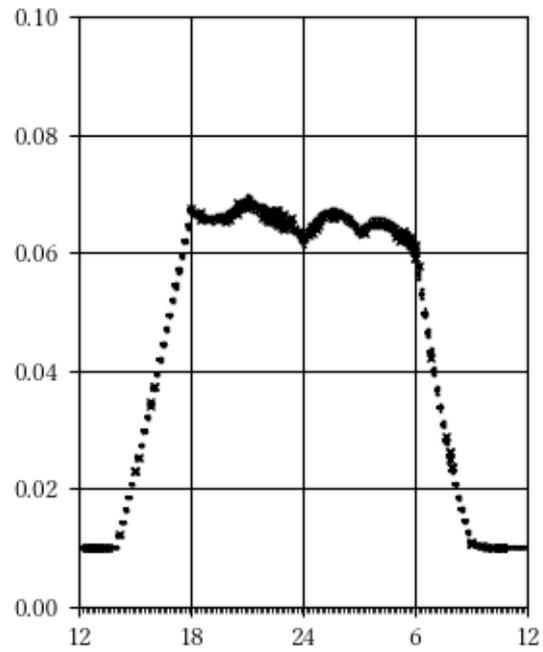
謝辞 本研究は数物フロンティア・リーディング大学院の助成を受けたものである。本研究をするにあたって、有益な議論やコメントをして下さった、日産自動車の池添圭吾氏、村井謙介氏、今別府悟氏、東京大学の佐藤玄基氏、長岡大氏、森脇湧登氏、呉孟超氏、金井雅彦氏、間瀬崇史氏に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 池上 貴志, 矢野 仁之, 工藤 耕治, 荻本 和彦, 負荷平準化による発電燃料費低減を目的とした電気自動車の多数台充電制御効果の評価, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 133, No. 6, pp. 562-574, 2013

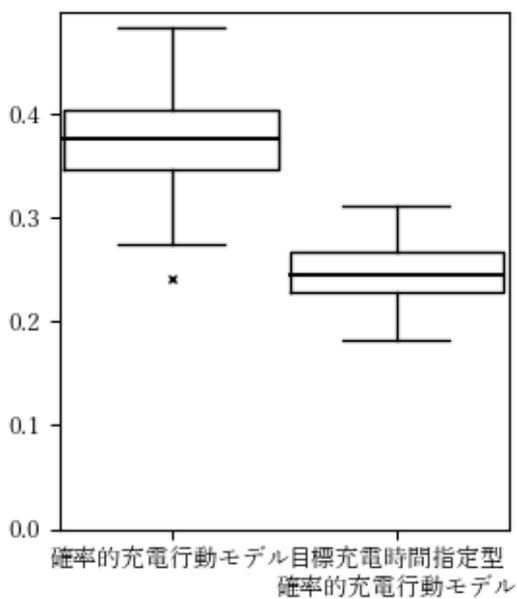


(a) 確率的充電行動モデル

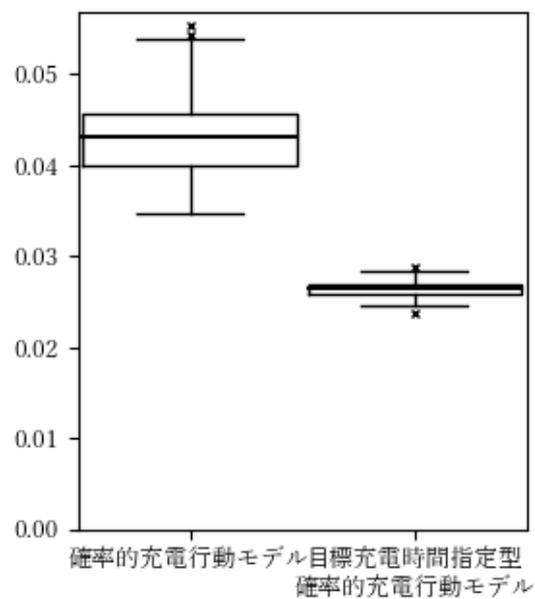


(b) 目標充電時間指定型確率的充電行動モデル

図 2: ユーザー数 $n = 10000$ における各モデルのシミュレーション結果



(a) 指標 X



(b) 指標 Y

図 3: ユーザー数 $n = 10000$ における各モデルの指標

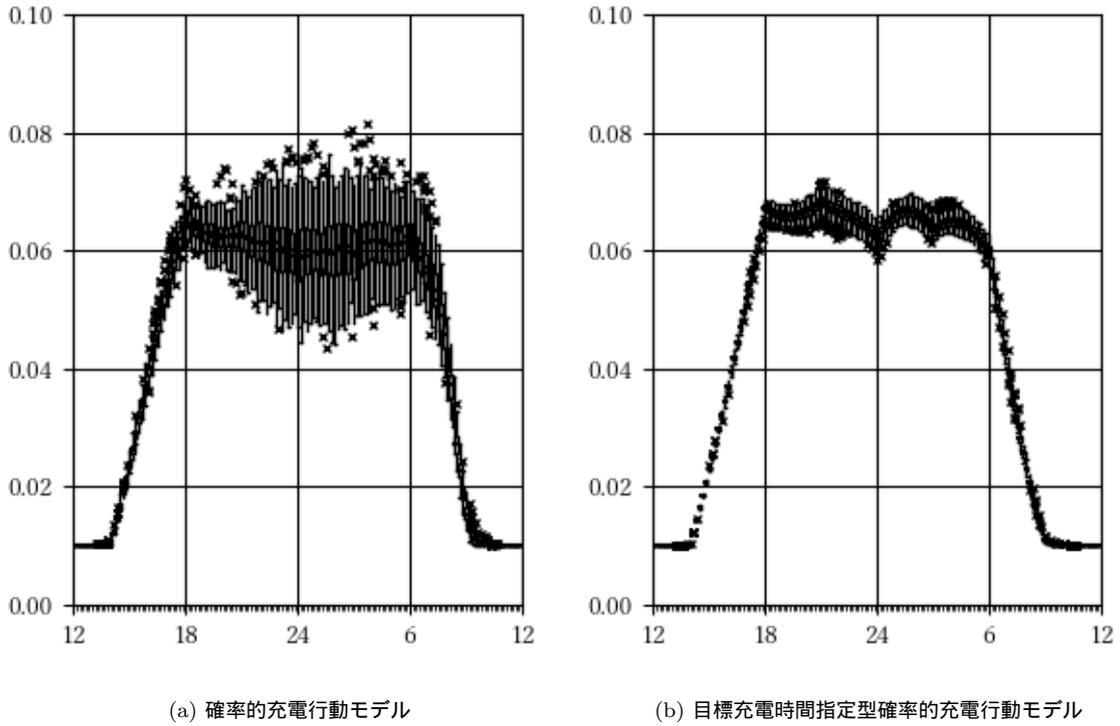


図 4: ユーザー数 $n = 10000$ における各モデルのシミュレーション結果

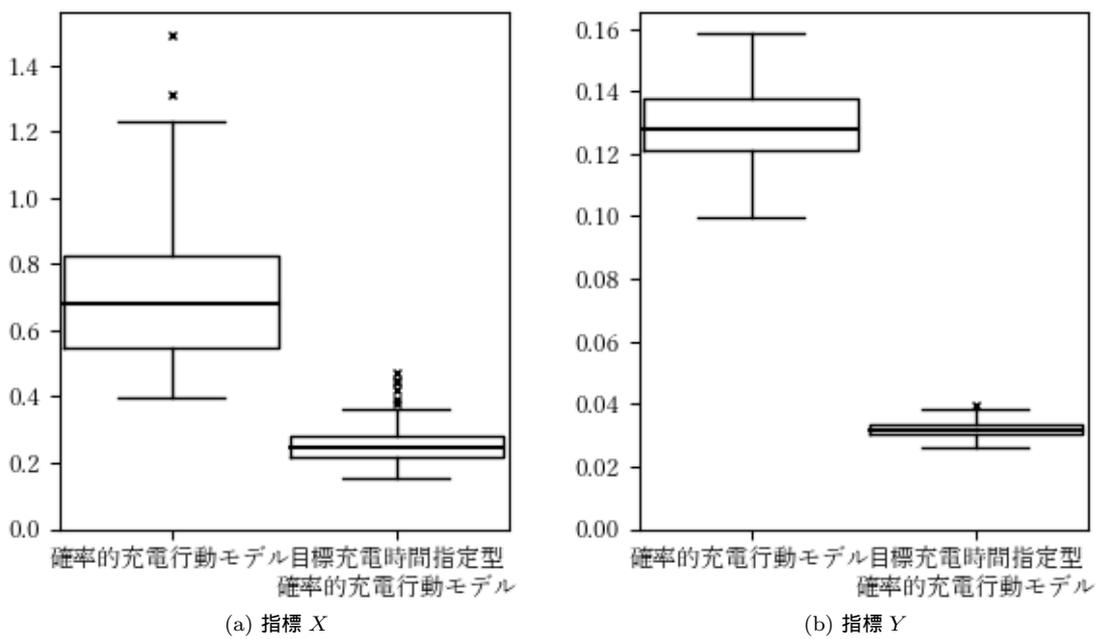


図 5: ユーザー数 $n = 1000$ における各モデルの指標

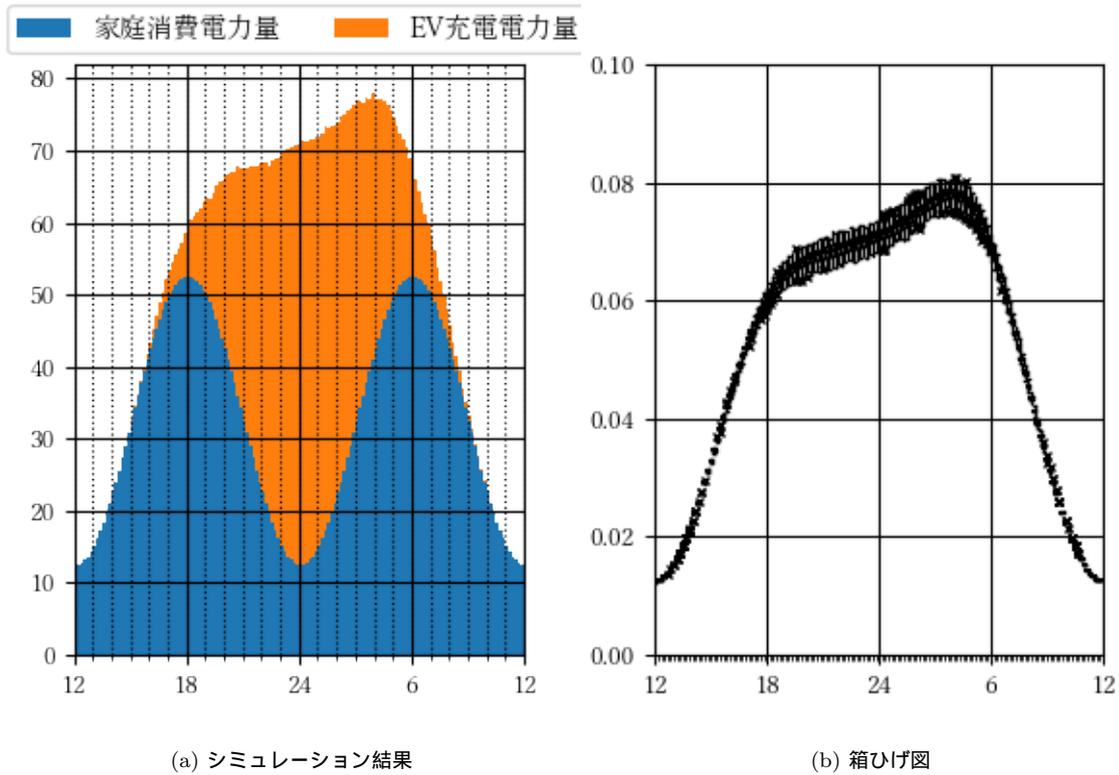


図 6: 別の家庭消費電力のもとでの目標充電時間指定型確率的充電行動モデルによるシミュレーション結果

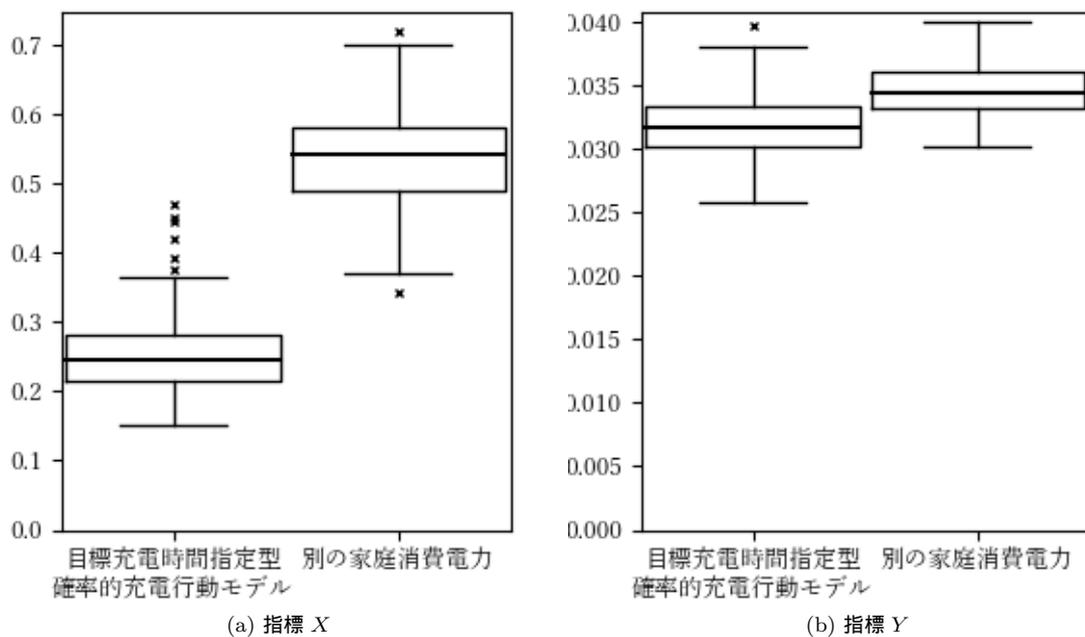
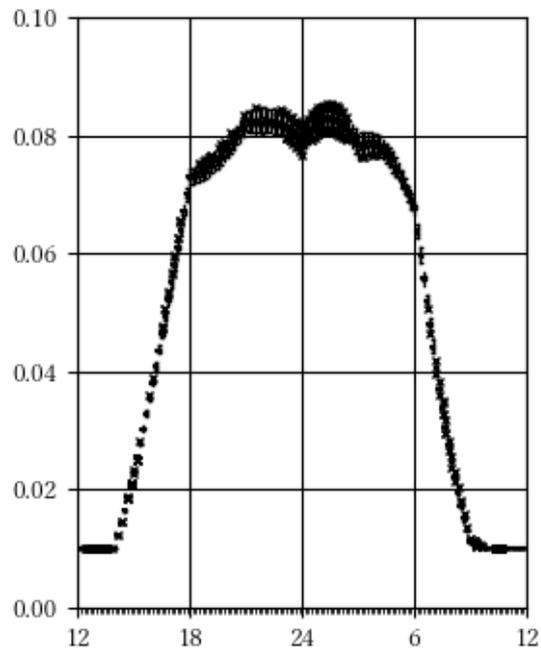
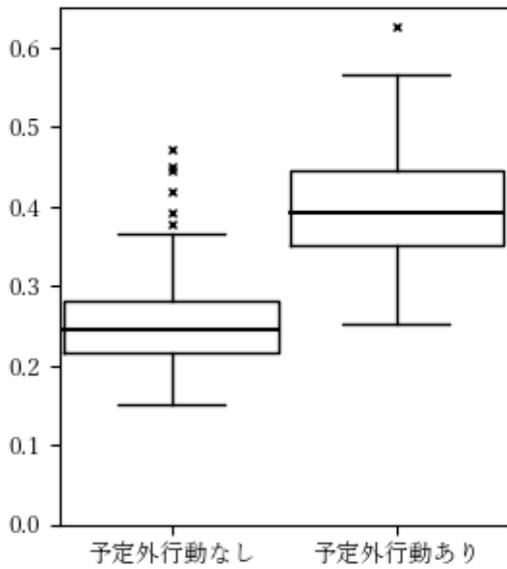


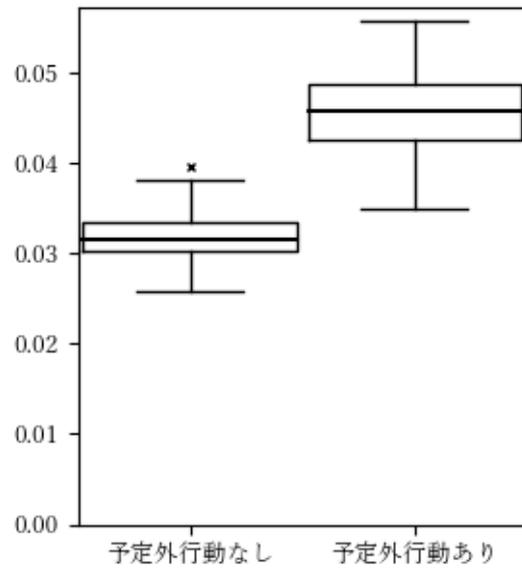
図 7: 別の家庭消費電力のもとでの目標充電時間指定型確率的充電行動モデルの指標



(a) 箱ひげ図



(b) 指標 X



(c) 指標 Y

図 8: 予定外行動がある場合における目標充電時間指定型確率的充電行動モデルによるシミュレーション結果と指標