

利用者の正直申告を導くプラグインハイブリッド自動車 充電スケジューリングメカニズムの提案

An Online Scheduling Mechanism for PHEV Charging that Incentivises Truthful Reporting

早川 敬一郎*¹
Hayakawa Keiichiro

Enrico Gerding*²

Sebastian Stein*²

志賀 孝広*¹
Shiga Takahiro

*¹(株)豊田中央研究所
Toyota Central R&D Labs., Inc.

*²University of Southampton

We propose an online scheduling mechanism for demand response and specifically the application of plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) charging. We show that the proposed mechanism incentivises truthful reporting of the departure time and valuations (i.e. willingness to pay) by EV agents. The proposed mechanism is simulated under realistic conditions and is confirmed to be useful for demand response applications. Furthermore, we demonstrate that our mechanism outperforms the conventional first-come first-served mechanism in terms of the aggregator's profit. Finally, we show that, even though in both mechanisms an agent sometimes has an incentive to delay its arrival, this misreporting of the arrival time is less pronounced in our novel mechanism compared to the first-come first-served mechanism. Therefore, there is less incentive to strategies, resulting in higher efficiency of the system.

1. はじめに

近年積極的に導入が進められている太陽光などの自然エネルギーによる発電は、気象条件によって出力が大きく変動するため、配電網の安定性に関する問題が顕在化している [Bitar 11]. これまでに、電気自動車 (EV; Electric Vehicle) の電池を活用して配電網を安定化する手法が多く提案されているが [Ipakchi 09, Clement-Nyns 11], その実現には EV 所有者の協力が必要であり、協力者にインセンティブを与えるデマンドレスポンスサービス (DR) の制度設計が多く研究されている [Saad 12]. 一般的に DR は、サービス事業者であるアグリゲーター [Gkatzikis 13] によって実施される。アグリゲーターは消費者の申告に基づいて将来の電力需給を予測し、急を要しない需要を先送りすることによって需給バランスを整える役割を担う。このようなサービスにおいて、消費者は真の意味ではない戦略的な申告により利益を得られることが多い。戦略的な申告により利益を得る消費者の存在は他の消費者に不公平感をもたらすサービス普及率の低下の一因となるため、消費者の申告に関する耐戦略性 [横尾 12] を保証するサービス制度を設計することが望まれる。Bhattacharya [Bhattacharya 14] は、消費者の入札を前日に一斉に実施する前日市場を想定して、耐戦略性を有する PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) 充電オークションのメカニズムを提案しているが、このメカニズムは消費者が随時充電を開始および終了する動的な市場には適用できない。動的な市場で耐戦略性を保証する制度設計は Parks [Parkes 07] らにより提唱されており、Gerding [Gerding 11], Stein [Stein 12] らはこの考え方を応用して、動的な市場で実施する PHEV の充電オークションにおいて、支配戦略誘因両立性 (dominant-strategy incentive compatible; DSIC) [横尾 12] を有するメカニズムを提案している。しかしこのメカニズムは電力の調達コストを考慮しておらず、実際には効率が良いメカニズムであるとは言い難い。本研究では、電力の調達コストを考慮した上で、動的な当日市場に適用可能であり、消費者とアグリゲーターの双方にとって望ましいオンラインメカニズムを提案する。

2. 想定する充電システム

2.1 充電システムの概要

アグリゲーターは、EV 所有者に対して DR を実施する一方で、電力供給源として太陽光などの自然エネルギーを用いた発電事業者と契約を締結して電力の確保を行う。本研究では、EV 所有者とこれらの発電事業者を含むアグリゲーターによって制御された市場をローカル市場と呼ぶ。アグリゲーターはさらに、ローカル市場における電力の過不足を補うために電力市場に参加する。ここでの電力市場とは電気料金が随時変動する市場を想定し、この市場をグローバル市場と呼ぶ。グローバル市場の規模はローカル市場と比較して十分に大きく、アグリゲーターが調達できる電力量は無限度と仮定する。但し、グローバル市場から大量の電力を調達するコストは非常に高いため、一定のコストで調達できる電力量は限られている。アグリゲーターは EV 所有者の自宅等に充電設備を含む充電システムを設置する。EV が充電設備に到着すると、システムは EV 所有者に「希望出発時刻」および「希望充電価格」の入力を求める。アグリゲーターは各 EV 所有者の希望出発時刻までに希望充電価格の範囲で充電できるタイミングと充電量を決定し、システムを通じて各 EV への充電を実行する。

2.2 EV 所有者モデル

本研究では、EV 所有者をエージェントとして考え、 $I = \{1, \dots, n\}$ を全ての EV 所有者の集合とする。時間に関しては単位時間ステップを $t \in T$ とする離散時間を考え、全てのエージェントは各単位時間ステップ (例えば 1 時間) に 1 単位 (例えば 3.0 kWh) の電力を充電することができるものとする。各エージェントが充電設備に到着した時刻を $a_i \in T$ 、出発時刻を $d_i \in T (d_i \geq a_i)$ とし、各エージェントは時刻 $t (a_i \leq t \leq d_i)$ において充電可能であるとする。エージェントの充電される電力に対するの評価額は $v_i = \{v_{i,1}, v_{i,2}, \dots\}$ で表される。ここで、 $v_{i,k}$ とは k 単位目の電力に対する限界評価額である。本研究においては限界評価額は広義単調減少、すなわち $v_{i,k+1} \geq v_{i,k}$ であると仮定する。これは、電気とガソリンの両方を利用して走行できる PHEV においては一般的な仮定である。これらに基づいて、エージェント i のタイプを $\theta_i = \{a_i, d_i, v_i\}$ で表す。また、全てのエージェントをまとめて $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_n\}$

連絡先: 早川敬一郎, (株)豊田中央研究所, 〒480-1192 愛知県長久手市横道 4 1-1, Tel(0561)71-7396, kei-hayakawa@mosk.tytlabs.co.jp

表 1: A part of the charging cost $C(t, m)$ [JPY]

	time(t)				
	13	14	15	16	
number of agents (m)	1	0.1	0.1	42.7	66.1
	2	8.3	0.3	103.6	132.3
	3	66.2	0.6	164.5	198.6
	...				

で表し, i 以外の全てのエージェントを θ_{-i} で表す. さらに, 時刻 t_1 から時刻 t_2 までに市場に現れた全てのエージェントを $\theta^{(t_1, t_2)}$ で表し, 時刻 t_2 までに市場に現れた全てのエージェントを $\theta^{(-\infty, t_2)}$ で表す.

2.1 節に示したとおり, エージェントは出発時刻および限界評価額をシステムに入力するが, このとき, 自身の利益のために真実ではない戦略的な申告を行うことが可能である. エージェントがシステムに申告した出発時刻および限界評価額を \hat{d}_i および \hat{v}_i とし, 申告されたタイプを $\hat{\theta}_i = \{a_i, \hat{d}_i, \hat{v}_i\}$ で表す. 到着時刻 a_i についてはセンサーなどによってシステムに自動的に検知され, エージェントが操作できないものと仮定する.

2.3 アグリゲーターモデル

アグリゲーターは現在時刻 t までにシステムを通じて収集した情報 $\theta^{(-\infty, t)}$ を用いて, 各エージェントの現在時刻以降の充電スケジュール $\pi_{i, t'}^{(t)}$ を自身および EV 所有者の利益がなるべく大きくなるように決定する. ここで, $\pi_{i, t'}^{(t)}$ は時刻 t の時点で計算されたスケジュールにおいて将来の時刻 $t' : t \leq t' \leq \hat{d}_i$ までにエージェント i に充電される電力の単位数を示している.

アグリゲーターは充電スケジュールの決定に当たって, 「グローバル市場における電力価格」および「ローカル市場内の発電事業者の発電量」を予測して電力調達コストを求め, 任意の時刻 t に m 台の EV が同時に充電したときに負担するコストの総額 $C(t, m)$ を計算できる. 計算されたコストの一例を表 1 に示す. さらに, $m+1$ 台目の EV に充電する際の限界価格は $c(t, m+1) = C(t, m+1) - C(t, m)$ で求められる.

3. 提案メカニズム

3.1 アルゴリズム

提案手法は, まずエージェントが各時刻に充電する際の支払い価格を暫定的に決定し, その価格に応じてスケジュールを決定することを特徴としており, 本章でその詳細を述べる.

3.1.1 限界価格ベクトルの計算

エージェント $i \in I$ の時刻 t における限界価格ベクトル $\mathbf{p}_i^{(t)} = \{p_{i,1}^{(t)}, p_{i,2}^{(t)}, \dots\}$ の計算方法を示す. $p_{i,j}^{(t)}$ は, j 単位目の電力に対する支払金額である. まず, i が将来の任意の時刻 $t' \geq t$ に充電を実行する際の予定価格 $f_{i, t'}^{(t)}$ を申告 \hat{d}_i および \hat{v}_i と独立な任意の関数 f によって以下のように定義する.

$$f_{i, t'}^{(t)} = f(a_i, \hat{\theta}_{-i}^{(-\infty, t)}, t') \quad (1)$$

予定価格 $f_{i, t'}^{(t)}$ は時間の経過と共に変動するが, 時刻 $t = t'$ となった時点で確定価格 $\mu_{i, t}$ となり以後変動しないものとする. すなわち, $\mu_{i, t} = f_{i, t}^{(t)}$ である. ここで, 現在時刻 t 以前の確定価格と将来の予定価格を並べたベクトル $\boldsymbol{\eta}_i^{(t)} = \{\mu_{i, a_i}, \dots, \mu_{i, t}, f_{i, t+1}^{(t)}, \dots, f_{i, \hat{d}_i}^{(t)}\}$ を時刻 t における価格ベクトルとし, その要素を小さい順に並び替えたものを限界価格ベクトル $\mathbf{p}_i^{(t)} = \text{incr}(\boldsymbol{\eta}_i^{(t)})$ として定義する. ただし, $\text{incr}(\cdot)$ とはベクトルの要素を小さい順に並び替える符号とする.

3.1.2 エージェントの支払い金額

エージェント i の支払い金額は時刻 $\delta_i = \min(\hat{d}_i, d_i)$ において確定し, その時点の限界価格ベクトル $\mathbf{p}_i^{(\delta_i)}$ を用いて求めることとする. つまり, 実際よりも早い出発時刻 $\hat{d}_i \leq d_i$ を申告した場合は申告時刻 \hat{d}_i の時点で支払い金額が確定し, 遅い出発時刻 $\hat{d}_i > d_i$ を申告した場合は実際の出発時刻 d_i の時点で充電が打ち切られると同時に支払い金額が確定する. 時刻 δ_i の時点で最終的に得た電力単位数を $\pi_i = \pi_{i, \delta_i}^{(\delta_i)}$ としたとき, 支払金額 x_i を以下のように決定する.

$$x_i = \sum_{\kappa=1}^{\pi_i} p_{i, \kappa}^{(\delta_i)} \quad (2)$$

3.1.3 充電スケジュールの決定方法

時刻 t におけるエージェント i への充電権の仮割当単位数 $l_{i, \hat{d}_i}^{(t)}$ を申告された評価額 \hat{v}_i と限界価格ベクトル $\mathbf{p}_i^{(t)}$ を用いて以下のように定義する.

$$l_{i, \hat{d}_i}^{(t)} = \operatorname{argmax}_{0 \leq k \leq \hat{d}_i - a_i + 1} \sum_{j=1}^k (\hat{v}_i - p_{i, j}^{(t)}) \quad (3)$$

これは, 現在時刻 t の予定価格において, 申告された出発時刻 \hat{d}_i までに限界評価額 \hat{v}_i に基づいてエージェント i が得る効用を最大化する電力単位数である. 各時間ステップに最大 1 単位しか充電できないため, 定義域は $0 \leq k \leq \hat{d}_i - a_i + 1$ となっている. 本研究で提案するメカニズムでは, 各時刻 t において, 時刻 \hat{d}_i までに充電される電力単位数が仮割当単位数 $l_{i, \hat{d}_i}^{(t)}$ と等しくなるようにスケジュールを決定する. すなわち,

$$\pi_{i, \hat{d}_i}^{(t)} = l_{i, \hat{d}_i}^{(t)} \quad (4)$$

が成立するものとする.

3.2 耐戦略性の証明

ここでは, 前節で提案したメカニズムが申告 \hat{d}_i および \hat{v}_i に関して耐戦略性を有する, すなわちエージェントが戦略的な申告によって利益を得られないことを証明する. 証明に当たって, 「限界価格ベクトル $\mathbf{p}_i^{(t)}$ が申告された限界評価額 \hat{v}_i および出発時刻 \hat{d}_i と独立に与えられ, 式 4 の制約を満たすスケジュールリングを実行し, かつ, 支払ルールが式 2 で示されるメカニズム」をメカニズム **A** と定義する.

Lemma 1. 任意の出発時刻 $\hat{d}_i \leq d_i$ が固定値として与えられたとき, メカニズム **A** においてエージェント i が得る効用は, 限界評価額に関する正直申告 $\hat{v}_i = v_i$ によって最大となる.

Proof. $\mathbf{p}_i^{(t)}$ が \hat{v}_i と独立に与えられている場合, エージェントは戦略的な価格 \hat{v}_i の申告によって電力の価格を操作することはできず, 自身に割り当てられる単位数 π_i のみを操作できる. $\hat{d}_i \leq d_i$ のとき, 支払い金額が確定する時刻は \hat{d}_i となるため, エージェントの効用は $U_i = \sum_{j=1}^{\pi_i} (v_{i, j} - p_{i, j}^{(\hat{d}_i)})$ で表されるが, 式 4 の制約によると, 割り当てられる単位数は式 3 によって決定されており, エージェントは正直申告 $\hat{v}_i = v_i$ によって最大の効用を得ることができる. \square

Lemma 2. メカニズム **A** において, エージェントは実際よりも遅い出発時刻の申告 $\hat{d}_i > d_i$ によって利益を得られない.

Proof. $\hat{d}_i > d_i$ のとき, 支払い金額が確定する時刻は $\delta_i = d_i$ であり, 支払い金額は式 2 より $x_i = \sum_{\kappa=1}^{\pi_i} p_{i, \kappa}^{(d_i)}$ となる. $p_{i, \kappa}^{(d_i)}$ は \hat{v}_i および \hat{d}_i と独立に決定されるため, エージェントは戦略的な申告によって電力の価格を操作することはできず, 自身に

割り当てられる単位数 π_i のみを操作できる。このとき、エージェントが正直に $\hat{\mathbf{v}}_i = \mathbf{v}_i$ および $\hat{d}_i = d_i$ を申告すれば、式 4 の制約により、時刻 d_i の時点で式 3 によって自身の効用を最大化する単位数を得ることができる。言い換えると、エージェントは実際よりも遅い出発時刻の申告 $\hat{d}_i > d_i$ によっていかなる利益も得ることができない。□

Lemma 3. メカニズム A において、エージェント i が正直な限界評価額 $\hat{\mathbf{v}}_i = \mathbf{v}_i$ を申告する場合、エージェント i が得る効用は出発時刻の正直申告 $\hat{d}_i = d_i$ によって最大となる。

Proof. まず、Lemma 2 により、エージェントは出発時刻の遅い申告 $\hat{d}_i > d_i$ によって利益を得られない。 $\hat{d}_i \leq d_i$ の場合を考えると、エージェントの支払い金額が確定する時刻は $\delta_i = \hat{d}_i$ となり、申告 \hat{d}_i に対する最終的な限界価格ベクトルは $\mathbf{p}_i^{(\hat{d}_i)} = \text{incr}(\boldsymbol{\eta}_i^{(\hat{d}_i)}) = \text{incr}(\{\mu_{i,a_i}, \dots, \mu_{i,\hat{d}_i}\})$ となる。一方で、真の出発時刻 d_i を申告した場合の限界価格ベクトルは $\mathbf{p}_i^{(d_i)} = \text{incr}(\boldsymbol{\eta}_i^{(d_i)}) = \text{incr}(\{\mu_{i,a_i}, \dots, \mu_{i,\hat{d}_i}, \mu_{i,\hat{d}_i+1}, \dots, \mu_{i,d_i}\})$ となる。このとき、 $\mathbf{p}_i^{(\hat{d}_i)}$ に含まれている全ての要素は $\mathbf{p}_i^{(d_i)}$ に含まれているため、 $\forall k, 0 \leq k \leq \hat{d}_i - a_i + 1 : p_{i,k}^{(\hat{d}_i)} \geq p_{i,k}^{(d_i)}$ となる。つまり、エージェント i にとっての電力の価格は $\hat{d}_i = d_i$ のときに最も低価格となる。さらに、 $\hat{\mathbf{v}}_i = \mathbf{v}_i$ であるから、 k の定義域の範囲内で効用を最大化する割当単位数を決定する式 3 より、式 4 の制約に従うスケジューリングによって得られる効用は、正直申告 $\hat{d}_i = d_i$ によって最大化される。□

Theorem 1. 式 1 で定義された任意の関数 $f_{i,t'}^{(t)}$ によって価格を決定し、式 4 の制約を満たすスケジューリングを実行し、支払ルールが式 2 で示されるメカニズムは、エージェントの申告する出発時刻 \hat{d}_i および限界評価額 $\hat{\mathbf{v}}_i$ に関して耐戦略性を有する。

Proof. 式 1 で定義された任意の関数 $f_{i,t'}^{(t)}$ はエージェント i の申告 $\hat{\mathbf{v}}_i$ および \hat{d}_i と独立であるため、Lemma 2 により実際よりも遅い出発時刻の申告によって利益を得られない。出発時刻を実際よりも遅く申告しない場合、Lemma 1 によりエージェントの効用は価格に関する正直申告 $\hat{\mathbf{v}}_i = \mathbf{v}_i$ によって最大化される。このとき、Lemma 3 により、エージェントの効用は出発時刻に関する正直申告 $\hat{d}_i = d_i$ によって最大化される。すなわち、エージェント i の得る効用は正直申告 $\hat{\mathbf{v}}_i = \mathbf{v}_i$ および $\hat{d}_i = d_i$ によって最大化されるため、このメカニズムは出発時刻 \hat{d}_i および限界評価額 $\hat{\mathbf{v}}_i$ に関して耐戦略性を有する。□

3.3 スケジュールの実行可能性

3.1 節で示したアルゴリズムは常に実行可能とは限らない。式 4 を成立させるスケジュールを常に実行可能なものとするため、以下の条件を追加する。

$$\text{条件 1} \quad \forall t, t' \geq t+1 : f_{i,t'}^{(t+1)} \geq f_{i,t'}^{(t)} \quad (5)$$

式 5 は、将来の充電価格は充電時刻が近づくにつれて上昇する（もしくは変化しない）ことを示している。

$$\text{条件 2} \quad \forall t', t' \geq t : \pi_{i,t'}^{(t)} \leq l_{i,t'}^{(t)} \quad (6)$$

式 6 は、時刻 t の時点の充電スケジュールにおいて、将来の時刻 t' までに充電される電力単位数は、エージェントが時刻 t' を出発時刻として申告した際の仮割当単位数 $l_{i,t'}^{(t)}$ を超過しないことを示している。本研究では、エージェントの限界評価額は広義単調減少であることと、電力の供給可能量が無限大であることを仮定しており、これらの条件下では、本節で示した条件を追加した提案メカニズムは常に実行可能である。

3.4 充電スケジューリングメカニズムの具体例

3.3 節で示した条件を満たす予定価格決定関数およびスケジューリングアルゴリズムについての一例を以下に示す。

予定価格決定関数 $f_{i,t'}^{(t)}$ の一例として、各エージェントが充電する際の外部費用を負担する関数を考える。到着時刻 a_i に遡って i 以外の全てのエージェントの情報 $\hat{\theta}_{-i}^{(a_i,t)}$ が与えられたときに得られる総社会効用の最大値を $S(\hat{\theta}_{-i}^{(a_i,t)})$ とする。この状況で i が時刻 t' に 1 単位の充電を実行すると仮定した上で再度他のエージェントのスケジュールを最適化したときの総社会効用の最大値から i 自身の評価額を差し引いた値を $S_{t'}(\hat{\theta}_{-i}^{(a_i,t)})$ とする。ここで、予定価格決定関数を $f_{i,t'}^{(t)} = \max \{ S(\hat{\theta}_{-i}^{(a_i,t)}) - S_{t'}(\hat{\theta}_{-i}^{(a_i,t)}), f_{i,t'}^{(t-1)} \}$ とすると、この関数は式 1 および式 5 を満たす。本研究では計算量削減のため、 $S(\hat{\theta}_{-i}^{(a_i,t)})$ および $S_{t'}(\hat{\theta}_{-i}^{(a_i,t)})$ を算出する際の最適化について、申告された全ての評価額を高い順に並べて順に低コストの時間帯に割り当てていく方法で近似した。近似手法においても式 1 および式 5 の条件が満たされている。

スケジューリングアルゴリズムについては、式 4 および式 6 を制約条件とした上で、総社会効用の最大化を目的とする最適化によって算出した。最適化は Gurobi^{*1} の混合整数計画法ソルバを用いて、許容誤差を 10^{-4} として計算した。

4. メカニズムの特性分析

3.4 節で提案したメカニズムの特性を評価するため、実際に EV 充電を行う状況を想定してシミュレーションを行った。

4.1 シミュレーション条件

シミュレーションでは電力調達コストを以下のように設定した。グローバル市場の電力価格は、日本卸電力取引所により公開されている 2013 年 6 月 5 日のデータ^{*2} を用いた。ローカル市場内の配電網の安定性を考慮するために、日本建築学会により公表されている 6 月の晴天日における家庭の消費電力量データ^{*3} を用いた。これらのデータに基づいて電力潮流計算 [新田 80] を行い、充電コスト表を作成した。単位時間ステップは 1 時間、電力の 1 単位は 3kWh とした。今回求めた充電コスト表では同時に充電する人数に対する限界コストは広義単調増加、すなわち、 $\forall t, m : c(t, m+1) \geq c(t, m)$ となっている。計算された充電コスト $C(t, m)$ の一部を表 1 に、また、限界コスト $c(t, m)$ のうち代表として $t = 4, 10, 16, 22$ のときの値を図 2 に示す。

エージェントの到着時間と出発時間については 340 人の名古屋市民を対象としたアンケートより、平日に自宅に車を止めている時間帯に関する回答を用いて設定した。また、エージェントの充電可能量は 1~6 単位のいずれかをランダムで設定し、電力の評価額は 0~100 円の間の一様分布の中から無作為選択した金額を高い順に並び替えて設定した。

4.2 デマンドレスポンスサービス (DR)

100 人のエージェントに対して提案メカニズムによる DR を実施した結果を図 1(a) に、同一の条件において将来の電力コストを考慮せずに各時刻ごとに Greedy [Gerding 11] にスケジュールを決定した結果を図 1(b) に示す。図の横軸は時刻を、縦軸は充電設備に存在する EV と実際に充電を実行している EV の台数を示している。Greedy では夕方に帰宅した多くの EV がすぐに充電を始めるのに対し、提案手法では電力調達コ

*1 <http://www.gurobi.com>

*2 <http://www.jpex.org>

*3 <http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/index.htm>

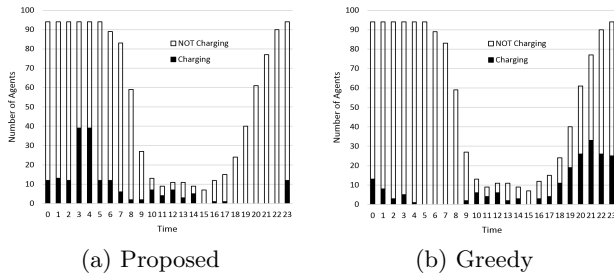


図 1: Test Case of Demand Response Service

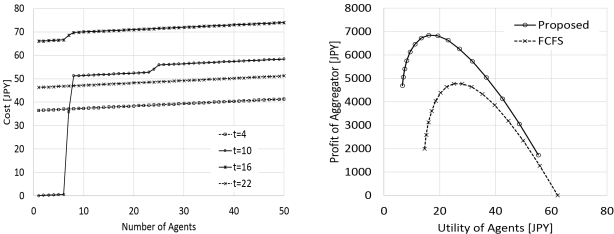


図 2: Charging Cost

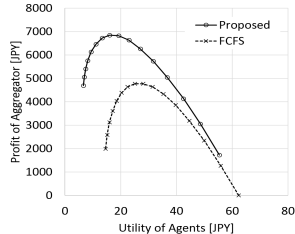


図 3: Aggregator's profit

ストが下がる深夜まで待つて充電を開始する車両が多く、提案手法が DR に有用であることが分かる。

4.3 早い者勝ちメカニズムとの比較

DR において通常多く採用されるベンチマークメカニズムとして、「早い者勝ち (FCFS: First-come First-serve)」が考えられる。これは、早い時刻に申告したエージェントから順に効用が最大となるスケジュールが決定されるものである。支払金額を限界コスト $c(t, m)$ の合計額とすれば、FCFS はエージェントの申告に対して耐戦略性を有する。ここでは、提案手法と FCFS を比較し、提案手法の優位性を示す。

4.3.1 アグリゲーターの利益

提案手法と FCFS では、アグリゲーターは実際の調達コストより高い価格を顧客に提示してそのマージンを利益とすることができる。本研究では、上乗せ価格の基準コストを実際の調達コストの α 倍としたときの、アグリゲーターの利益とエージェントの効用を分析した。200 人のエージェントに対して α を 1.0 から 2.5 まで変化させて 48 時間のシミュレーションを 100 回実行した結果の平均値を図 3 に示す。横軸はエージェント一人当たりの効用、縦軸はアグリゲーターの利益である。それぞれのグラフの右下のプロットが $\alpha = 1.0$ の場合であり、 α を増加させるにつれて当初はアグリゲーターの利益が増加するが、配分効率の低下によってある時点で減少に転じる。アグリゲーターは提案手法により FCFS より大きな利益を得られており、例えば、エージェントの利益が 30 円するとき、提案手法によるエージェントの利益は FCFS の場合より約 26% 大きい。

4.3.2 到着時刻に関するロバスト性

エージェントは戦略的な申告以外に実際の行動の変化によって自身の利得を向上させられる。特に FCFS においては、他のエージェントより早く到着することが自身の利益に直結する。そこで本研究ではエージェントが 1 時間早く到着することで得られる利益を分析した。表 2 は 100 人のエージェントが得る効用を計算した後、そのうちの 1 人のみを 1 時間早く到着させた状況において、到着を早めたエージェントが得た効用を元の状態で正規化して示したものである。FCFS の場合はエージェントは早い到着によって損をすることが無く、83.5% のエージェントが効用を増加させており、31.5% のエージェントは効用を 5% 以上増加させている。一方で提案手法では、68.6% のエージェントの効用が変化しておらず、25.1% のエージェントが利

表 2: Change of Agents' utility by Early Arrival

Utility r by early arrival	FCFS	Proposed
$r > 1.05$	31.5%	19.9%
$1.00 < r \leq 0.05$	52.0%	5.2%
$r = 1.00$	16.5%	68.6%
$r < 1.00$	0.0%	6.3%

益を得ている一方で 6.3% のエージェントには損失が生じている。このように提案手法は顧客の到着時刻に関して比較的中立な手法である。実際のサービスを安定的に運用するためには、多くの顧客が一時的な行動を起こすことは好ましくない。FCFS では多くの顧客が先を争って充電を開始しようとする恐れがあるのに対し、提案手法は顧客の無理な行動変化を誘発しないメカニズムである。

5. まとめ

本研究では、電力の調達コストを考慮した上で、動的な当日市場に適用可能であり、顧客の申告に対して耐戦略性を有する DR メカニズムを提案した。提案手法は早い者勝ちメカニズムと比較して、アグリゲーターの利益とシステムの安定性の点で優れていることを示した。今後、各エージェントの充電速度が異なる場合や、限界評価額が広義単調減少でない場合についても実現可能なメカニズムを検討する必要がある。

参考文献

- [Bhattacharya 14] Bhattacharya S., Kar K., Chow J.H., and Gupta A.: Extended second price auctions for plug-in electric vehicle (PEV) charging in smart distribution grids. In American Control Conference, 2014, pp. 908-913. IEEE
- [Bitar 11] Bitar E., Khargonekar P.P., and Poolla K.: Systems and control opportunities in the integration of renewable energy into the smart grid. In Proc. of IFAC World Congress, pp. 4927-4932, 2011.
- [Clement-Nyns 11] Clement-Nyns K., Haesen E., and Driesen J.: The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid. Electric Power Systems Research, 81(1):185-192, 2011.
- [Gerding 11] Gerding E., Robu V., Stein S., Parkes D.C.: Rogers A., and Jennings N.R.: Online mechanism design for electric vehicle charging. In The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2, pp. 811-818, 2011.
- [Gkatzikis 13] Gkatzikis L., Koutsopoulos I., and Salonidis T.: The role of aggregators in smart grid demand response markets. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 31(7):1247-1257, 2013.
- [Ipakchi 09] Ipakchi A. and Albuyeh F.: Grid of the future. Power and Energy Magazine, IEEE, 7(2):52-62, 2009.
- [Parkes 07] Parkes D.C.: Online mechanisms. In Nisan, N., Roughgarden, T., Tardos, E., and Vazirani, V.: Algorithmic game theory, pp. 411-439, 2007.
- [Saad 12] Saad W., Han Z., Poor H. V., and Basar T.: Game-theoretic methods for the smart grid: An overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications. Signal Processing Magazine, IEEE, 29(5):86-105, 2012.
- [Stein 12] Stein S., Gerding E., Robu V., and Jennings N.R.: A model-based online mechanism with pre-commitment and its application to electric vehicle charging. In Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2, pp. 669-676, 2012.
- [新田 80] 新田 目倅造. 電力系統技術計算の基礎. 電気書院, 1980.
- [横尾 12] 横尾 真, 岩崎 敦, 櫻井 祐子, and 岡本 吉央. 『計算機科学者のためのゲーム理論入門』シリーズ第 3 回メカニズムデザイン (基礎編). コンピュータソフトウェア, 29(4):4.15-4.31, 2012.