

# オークション理論に基づく EV充電スケジュールと課金メカニズムの設計

2026. 2.17

(株)豊田中央研究所  
社会システム研究領域  
早川 敬一郎

# 自己紹介(早川敬一郎)



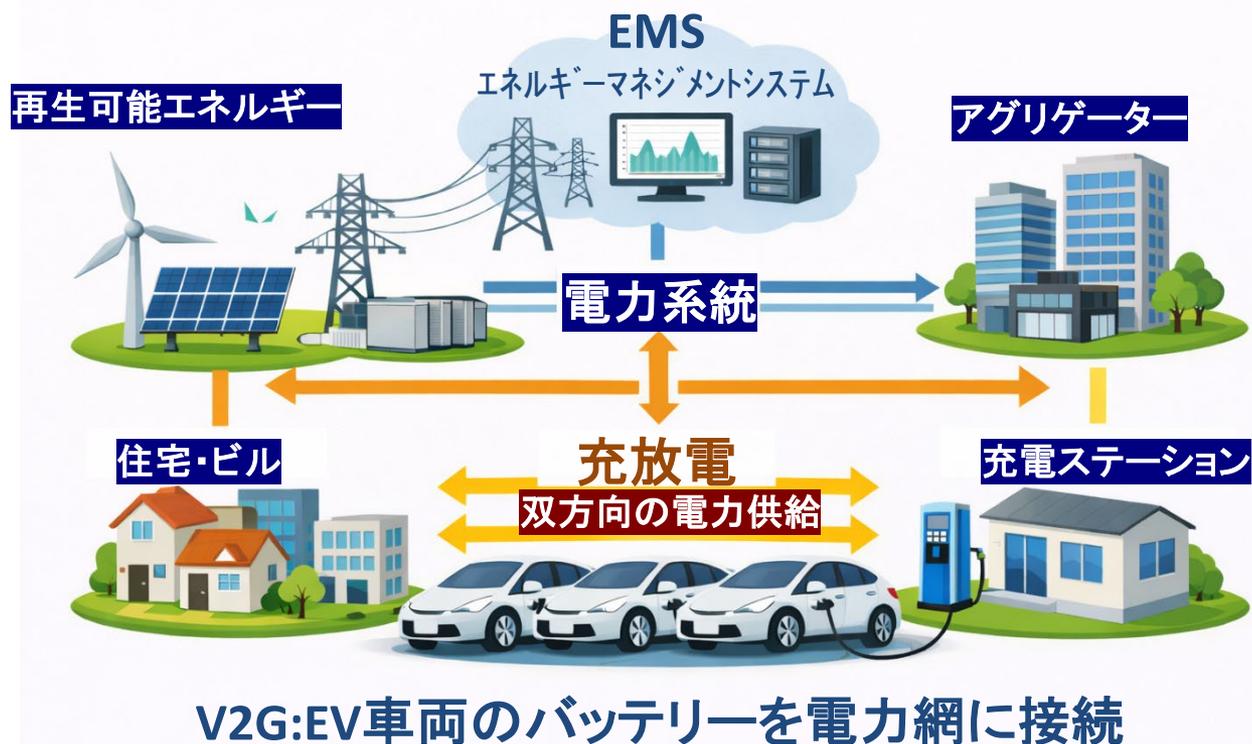
- 経歴とこれまでの研究テーマ
  - 豊田中央研究所入社(2006)
  - 交通流シミュレータ開発 (2011夏から2年半, 北京駐在)
  - EV充電のメカニズムデザイン (2014~2016 英サウサンプトン大共研)
  - 都市・交通の課金メカニズムデザイン (東京大学で学位取得(博士・工学)2019)
  - 自動運転時代のまちづくり
  - 地方公共交通のサービス設計(2019年から長久手市と共研)
- 主な論文など
  - 人工知能学会系
    - K. Hayakawa et al., 2015, “**Online Mechanisms for Charging Electric Vehicles in Settings with Varying Marginal Electricity Costs**”, IJCAI2015, pp2610–2616.
    - K. Hayakawa et al., 2018, “**Price-based Online Mechanisms for Settings with Uncertain Future Procurement Costs and Multi-Unit Demand**”, AAMAS2018, pp309–317.
    - M.Drawal, K. Hayakawa et al., 2017, “**Adaptive Pricing Mechanisms for On-Demand Mobility**”, AAMAS2017, pp1017–1025.
    - 早川敬一郎 (2020), “**交通サービスの課金メカニズムデザイン**”, 人工知能(2020年7月号), Vol.35, No.4, pp. 549-557, オーム社
  - 土木計画学系
    - K. Hayakawa et al., 2023, “**Modeling the impact of e-hailing services on regional public transit considering transit-dependent people**”, Transportation Research Part B, vol.170, pp91–118
    - 早川敬一郎 (2024), “**公共交通無料実験における利用者の行動変容に基づく定額料金制公共交通の役割の検討**”, 土木学会論文集, Vol.80, No.20, pp. 24-20008



# 目次

- はじめに
  - V2G(Vehicle To Grid)への期待と課題
  - 「メカニズムデザイン」とオークション理論
- EV充電スケジュールと課金メカニズムの設計
  - 想定する充電システム
  - 問題の定式化
  - Price-based Online Mechanism
  - IJCAI15 で発表したアルゴリズム
  - AAMAS18 で発表したアルゴリズム
- まとめ

# V2G(Vehicle To Grid)への期待と課題



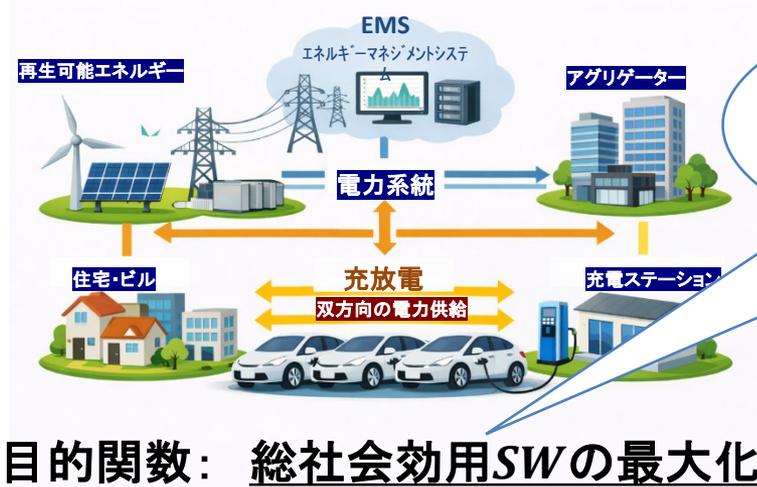
〇〇台の車両のバッテリー容量  
は合計  $\times \times$  kWhだから...  
この条件で充放電を最適化！！



勝手にバッテリー使われて、  
なんかヤダ。プラグ外しとこう。



# 無秩序の代償 (PoA; Price of Anarchy)



最適化!!

どうやったら  
お得かな?

利己的(合理的)  
な行動

システム最適状態  
**SO**  
(System Optimal)

>

利用者均衡状態  
**UE**  
(User Equilibrium)

$$\text{無秩序の代償: } PoA = \frac{SW(OA)}{SW(UE)} > 1$$

ユーザーの行動変容を誘導する仕組みの構築が必要

# デマンドレスポンスサービス

デマンドレスポンスサービスで課題を解決しよう！

• (例1) 深夜電力の導入 (0:00～5:00までの電力料金を割引！)

- 夕刻の需要集中は回避できる！
- × 0:00ちょうどに需要が集中してしまう
- × 昼間の太陽光発電の受け入れ余地は広がらない



• (例2) EV昼間充電を推奨！ (11:00～15:00のEV充電を割引！)

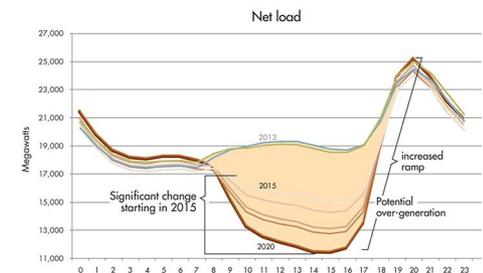
- 晴天なら昼間の豊富な太陽光発電を活用できる
- × 雨天なら昼間に電力ひっ迫の可能性



• (例3) 条件が整ったときに割引メールを送信！

- 余剰電力が発生したときにうまく利用できる
- × 利用者は、いつ充電できるか分からず手間・不安

Growing need for flexibility starting 2015



デマンドレスポンスの制度設計って  
難しい...



TOYOTA CRDL, INC.

# メカニズムデザイン (mechanism design) の研究

## メカニズムデザイン (ミクロ経済学・ゲーム理論の一分野)

- 参加者の合理的な行動を前提として、望ましい状態を達成するためのルールや仕組み (メカニズム) を設計する研究分野

### 研究例

- 公平分割問題 (Fair division) …… フードバンクなど
- マッチング (Matching) …… 臓器移植, 公立高校/研修医の配属など
- 社会選択問題 (Social choice) …… 選挙・投票制度など
- オークション (Auction)** …… Web検索連動広告, 周波数オークションなど

金銭の授受を通して利用者の効用関数を変化させることで  
利用者均衡状態 (UE) をシステム最適状態 (SO) に近づけることを目指す！！



システム最適状態  
SO

=

利用者均衡状態  
UE



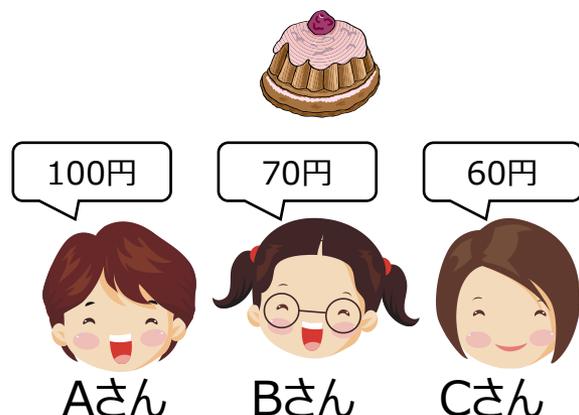
# キーワードは「耐戦略性」

## 例：単一商品のオークション販売

- ・商品に対する価値（支払意思額）は、人によって異なる
- ・最も高く評価している人に商品が渡ればシステム最適状態（SO）

### 第1 価格オークション

最も高い金額を入札した入札者が、  
自身の入札額で商品を購入する



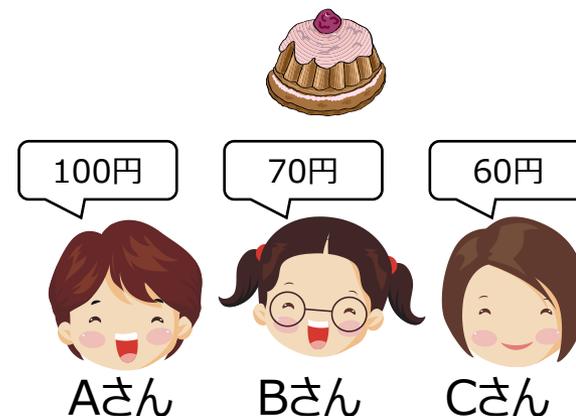
100円支払い

耐戦略性なし

- ・どうすれば得になるか考えなければならず、煩わしい。
- ・各人が合理的に行動した結果、商品が最も高く評価していない人に渡る可能性がある (SO > UE)

### 第2 価格オークション

最も高い金額を入札した入札者が、  
次点の入札額で商品を購入する



70円支払い

耐戦略性あり

- ・戦略を考える手間が無く、簡単。
- ・各人が合理的に行動すれば、商品は必ず最も高く評価した人に渡る (SO = UE)

# 目次

- はじめに
  - V2G(Vehicle To Grid)への期待と課題
  - 「メカニズムデザイン」とオークション理論
- EV充電スケジュールと課金メカニズムの設計
  - 想定する充電システム
  - 問題の定式化
  - Price-based Online Mechanism
  - IJCAI15 で発表したアルゴリズム
  - AAMAS18 で発表したアルゴリズム
- まとめ

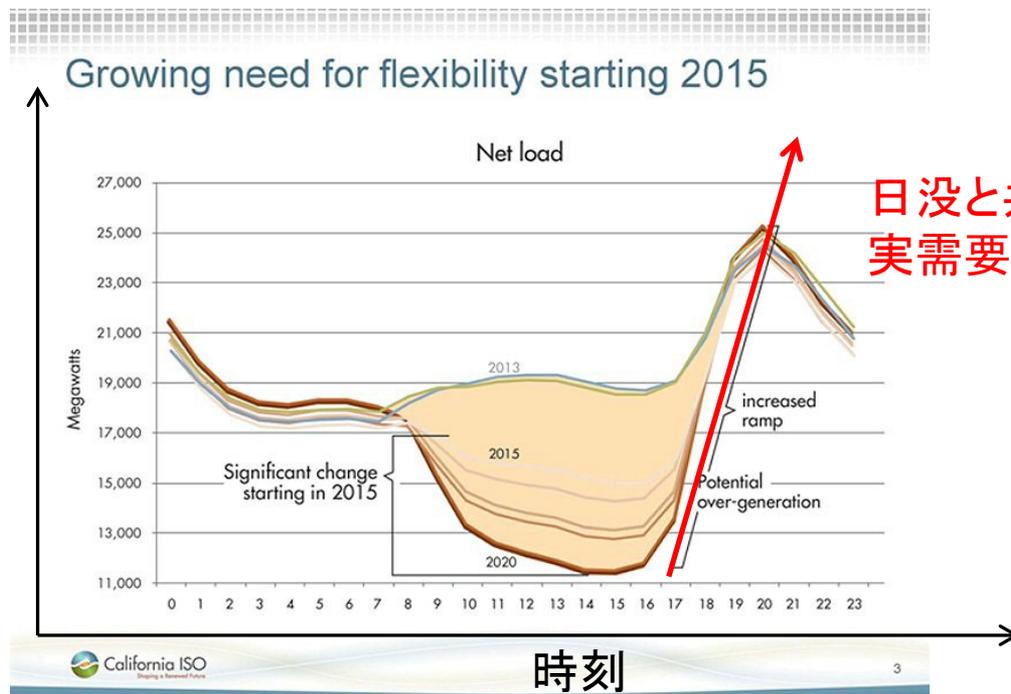


# 本研究ターゲット:EV充電時間帯の最適化

- V2Gのエネルギーマネジメント
  - 「いつ」、「どこで」、どのくらいの車両バッテリーを活用可能か。  
⇒ 本研究では、「いつ(充電の時間帯)」に着目！！

## Duck Curve現象

電力の実需要  
(需要量)-(発電量)



日没と共に、  
実需要量が急速に増加

電力システムの  
不安定化要因に

(出展: California Independent System Operator)

効率的なデマンドレスポンス(DR)サービスの仕組みを  
オークション理論を用いて構築しよう！



TOYOTA CRDL, INC.

# 想定する充電システム

自宅での充電を対象とし、EV利用者と電力事業者の関係を定式化

## EV利用者(戦略的)

帰宅時に、  
「次の出発時刻」と、  
「Demand」を申告



## 充電設備

主に自宅などに設置  
車両の「到着時刻」を監視

「到着時刻」「出発時刻」「Demand」



「充電量」「充電時刻」「支払金額」



電力市場  
(頻繁な価格変動)



電力調達



Demandとは・・・  
希望充電量と、  
支払意思額の組  
み合わせ

## 充電可能時刻

到着時刻

$a_i$

(実際の)  
充電可能時間

出発時刻

$d_i$

時刻



事業者と利用者の利益を両立させるWin-Winの仕組みを作りたい

# 利用者の戦略的行動

「充電可能時間」や「デマンド」は利用者の私的情報(Private Information)

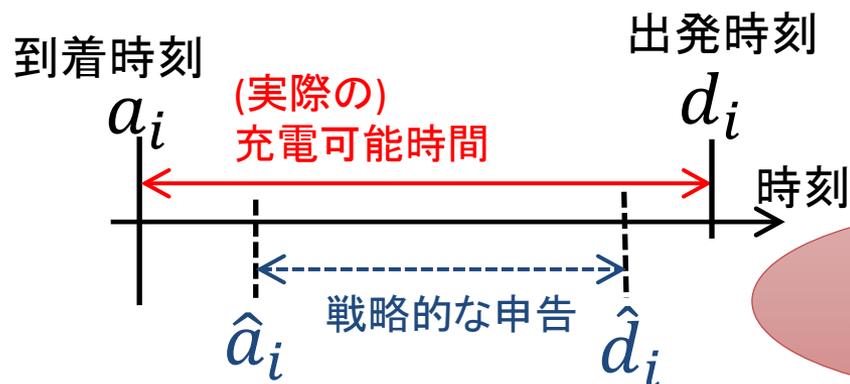
## デマンドの戦略的な申告

- ・希望充電量を多く or 少なく申告
- ・支払意思額を安く申告

目的関数に影響  
利用者効用に歪み

最適化！！

## 充電可能時間の戦略的な申告



制約条件に影響  
解空間が狭くなる

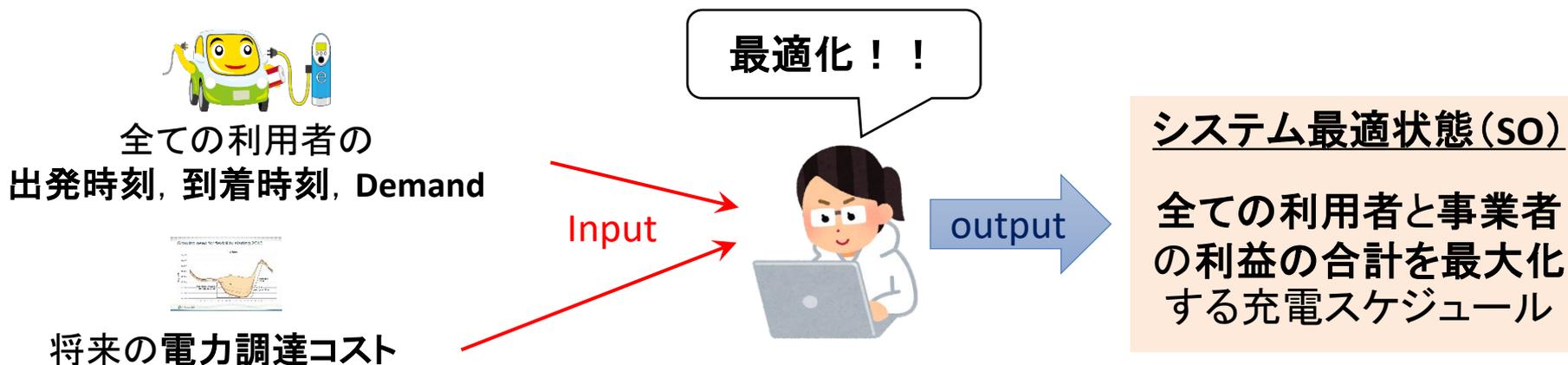
特に問題となるのは、「早い出発時刻 (Early Departure)」の申告

耐戦略性を保証した仕組みを導入して  
利用者の私的情報を正しく取得したい



# EV充電システムは動的な環境

もしも、全ての利用者の情報が事前に集まれば... (静的な問題)



VCG(Vickrey-Clarke-Groves)メカニズムによって SO=UEが達成できる

VCGメカニズムとは...

第2価格オークションを一般化したメカニズムで、財を得た利用者は自身が社会に与えた外部費用に相当する金銭を支払う。効率性, 耐戦略性, 個人合理性, 予算均衡の全てを満たす。

実際は...

- ・利用者が時々刻々と到着・出発する動的な問題
- ・財の割り当て(実際の充電)に時間がかかる

⇒ 今ある情報を用いて充電を実行しつつ最適化を目指す仕組みが必要



# 問題の定式化

## EV利用者



- ・利用者  $i \in I$  の選好;  $\theta_i = \{a_i, d_i, v_i\}$ 
  - > 到着時刻;  $a_i$  > 出発時刻;  $d_i$
  - > 支払意思額;  $v_{i,k}$   $v_i = \{v_{i,1}, v_{i,2}, \dots\}$
- ・利用者  $i$  の申告;  $\hat{\theta}_i = \{\hat{a}_i, \hat{d}_i, \hat{v}_i\}$

申告(到着時)  $\{\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots\}$



## アグリゲーター事業者

- ・各時刻  $t \in T$  における各車両の(暫定的な)充電スケジュール:  $y_{i,t}^{(t)}$  (逐次的に更新)
  - > スケジュールに従って時刻  $t$  の充電を実行
- ・各利用者の支払金額;  $x_i$

## 電力市場

- ・電力調達コスト;  $c(t, k)$ 
  - ・充電時刻と充電量(台数)に依存



$$\text{利用者 } i \text{ の効用; } U_i = \sum_{k=1}^{y_{i,\hat{d}_i}} v_{i,k} - x_i \quad \text{事業者の効用; } U_A = \sum_{i \in I} x_i - \sum_{t \in T} c\left(t, \sum_{i \in I} y_{i,t}^{(t)}\right)$$

充電価値 支払額 全利用者の 支払額の総和 電力調達コスト

目的関数: 総社会効用  $SW = \sum_{k=1}^{y_{i,\hat{d}_i}} v_{i,k} - \sum_{t \in T} c\left(t, \sum_{i \in I} y_{i,t}^{(t)}\right)$  の最大化

制約条件: 耐戦略性の保証, 充電の実行可能性の保証



# 提案フレームワーク (Price-based Online Mechanism)

## STEP1: 価格決定関数 (Pricing Function) を定める

$$x_{i,k} = P(k, \hat{a}_i, \hat{d}_i, \hat{\theta}_{-i})$$

(条件1) 本人の支払意思額  $v_{i,k}$  に依存しない関数とする・・・第2価格オークションと同様

(条件2) DRに協力的であるほど(早い到着, 遅い出発)低価格になるようにする

## STEP2: 耐戦略性の保証と実行可能性を保証する制約条件群を導入する

$$y_{i,\hat{d}_i} = \max_k U_i(k) = \max_k \left\{ \sum_{k'=1}^k v_{i,k'} - P(k', \hat{a}_i, \hat{d}_i, \hat{\theta}_{-i}) \right\}$$

各利用者に対して, STEP1で得られた価格決定関数の下で最大の効用が得られる充電量を保証するような充電スケジュール制約を導入する(詳しくは後述)

## STEP3: 充電スケジュールを逐次最適化により決定する

$\max_y SW^{(t)}$  STEP2の制約条件の下, 社会効用を最大化する充電スケジュールを求める

支払金額

STEP1



いくら支払う?

充電量

STEP2



(退社時刻までに)  
どれだけ充電する?

充電スケジュール

STEP3



いつ充電する?

利用者の効用に影響あり ⇒ 耐戦略性を保証!

利用者の効用に影響なし ⇒ 高効率を探索



TOYOTA CRDL, INC.

# 耐戦略性と実行可能性を保証する制約条件(STEP2)

【注目する2つの変数 $h_i^{(t)}$ と $y_{i,\hat{d}_i}^{(t)}$ 】

- 上限充電量  $h_i^{(t)}$  を導入・・・各時刻 $t$ の利用者 $i$ の充電量 $y_{i,t}^{(t)}$ は

$$y_{i,t}^{(t)} \leq h_i^{(t)}$$

- 仮予約充電量  $y_{i,\hat{d}_i}^{(t)}$ ・・・時刻 $t$ の時点で利用者 $i$ の予定最終充電量

【耐戦略性と実行可能性を保証する制約条件(十分条件)】

- $h_i^{(t+1)} \geq h_i^{(t)}$  ← 各利用者の上限充電量は単調増加

- $y_{i,\hat{d}_i}^{(t+1)} \leq y_{i,\hat{d}_i}^{(t)}$  ← 各利用者の仮予約充電量は単調減少

- $0 \leq y_{i,\hat{d}_i}^{(t)} - h_i^{(t)} \leq (\hat{d}_i - t)\hat{r}_i$

← 出発時刻までに2変数の差に相当する充電が実行可能  
( $\hat{r}_i$ は充電速度を表す)



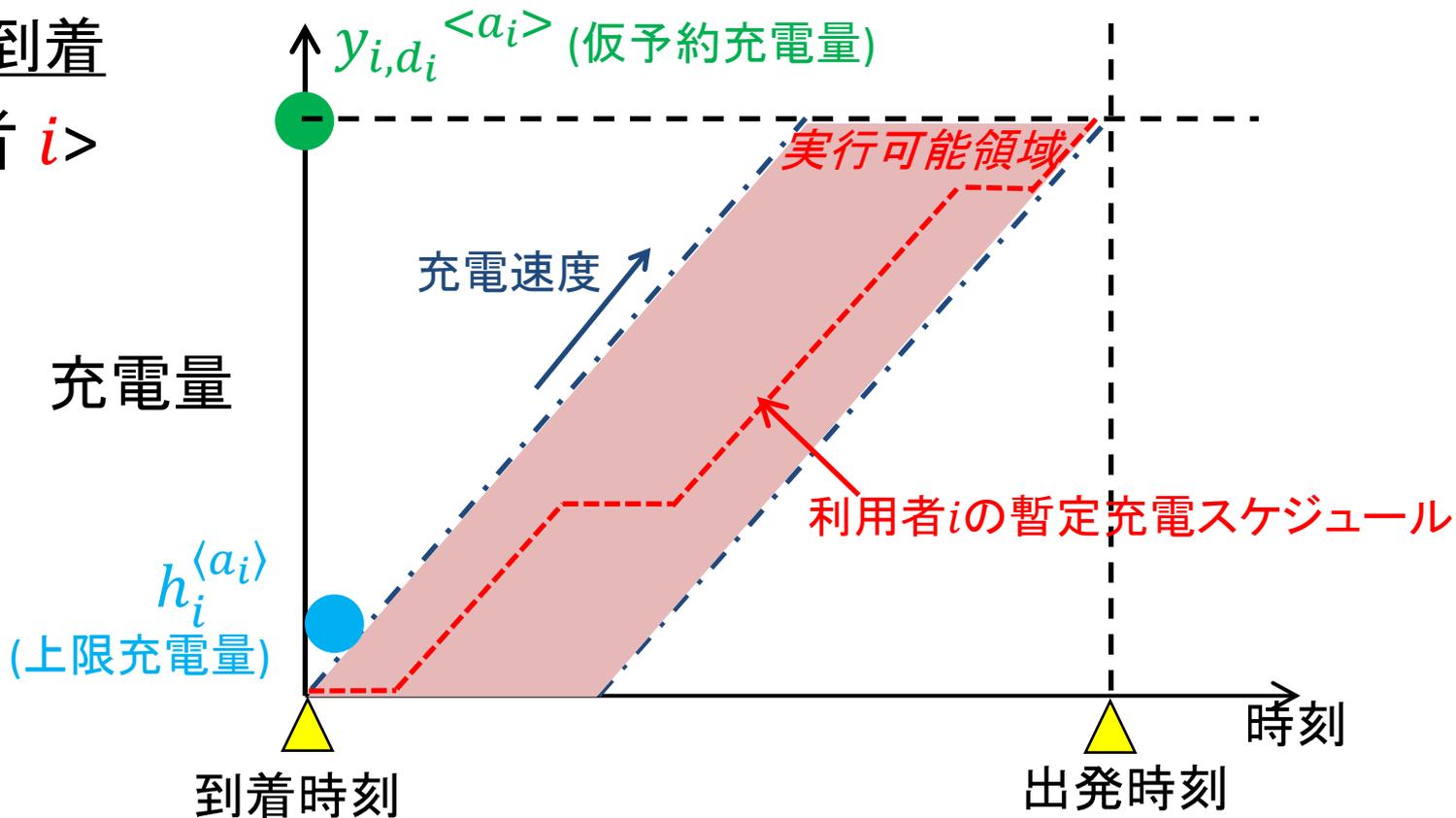
# 逐次最適化(浮動型予約)

## 制約条件

- 各時刻の充電量は上限充電量  $h_i^{(t)}$  超えない.
- 出発時刻までに仮予約充電量  $y_{i,\hat{d}_i}^{(t)}$  に到達する

時刻  $a_i$  に到着

<利用者  $i$ >

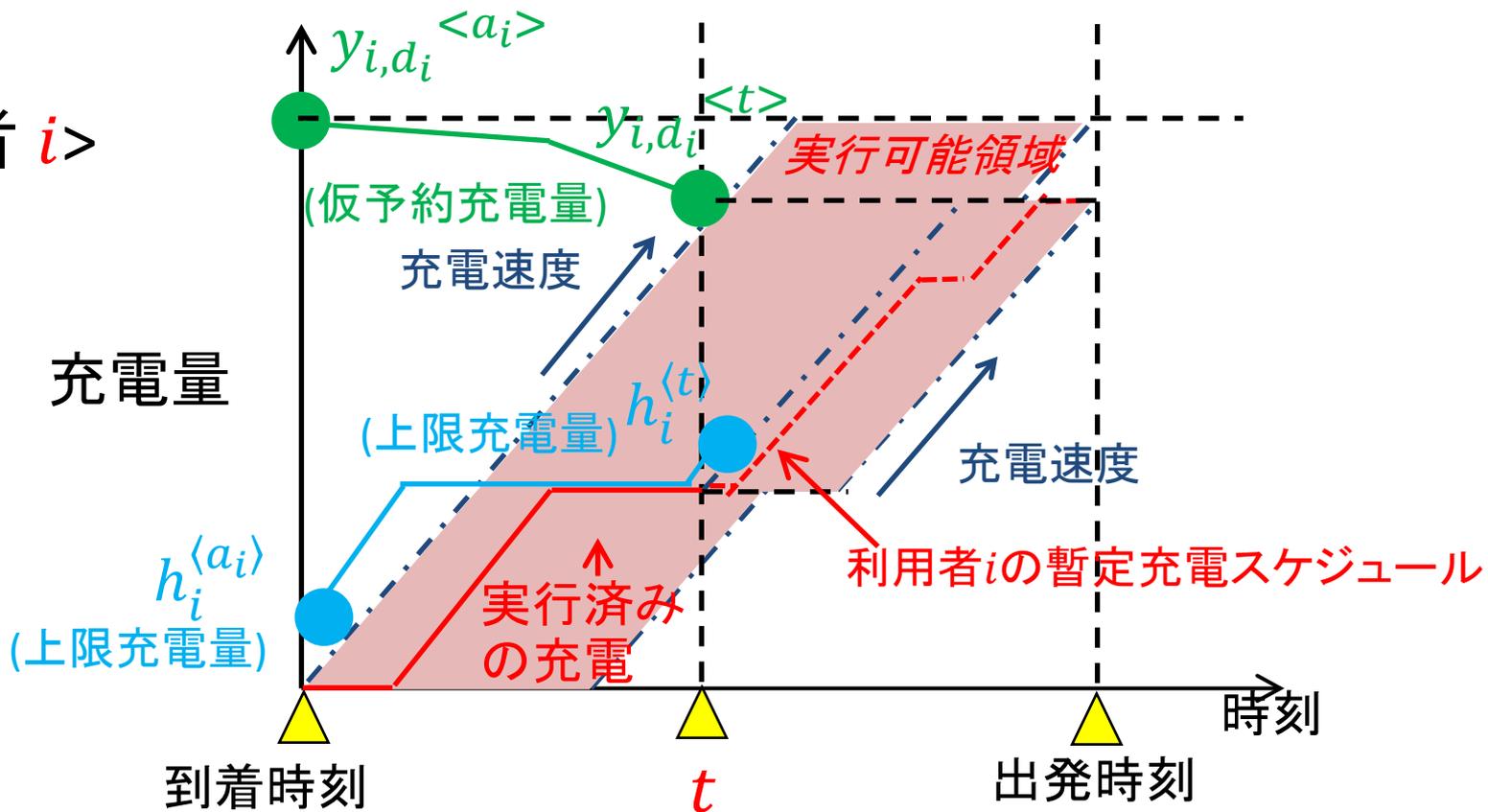


# 逐次最適化(浮動型予約)

- ▶ 仮予約充電量は単調減少:  $y_{i,\hat{d}_i}^{(t+1)} \leq y_{i,\hat{d}_i}^{(t)}$
- ▶ 上限充電量は単調増改:  $h_i^{(t+1)} \geq h_i^{(t)}$

時刻  $t$

<利用者  $i$ >



# 逐次最適化(浮動型予約)

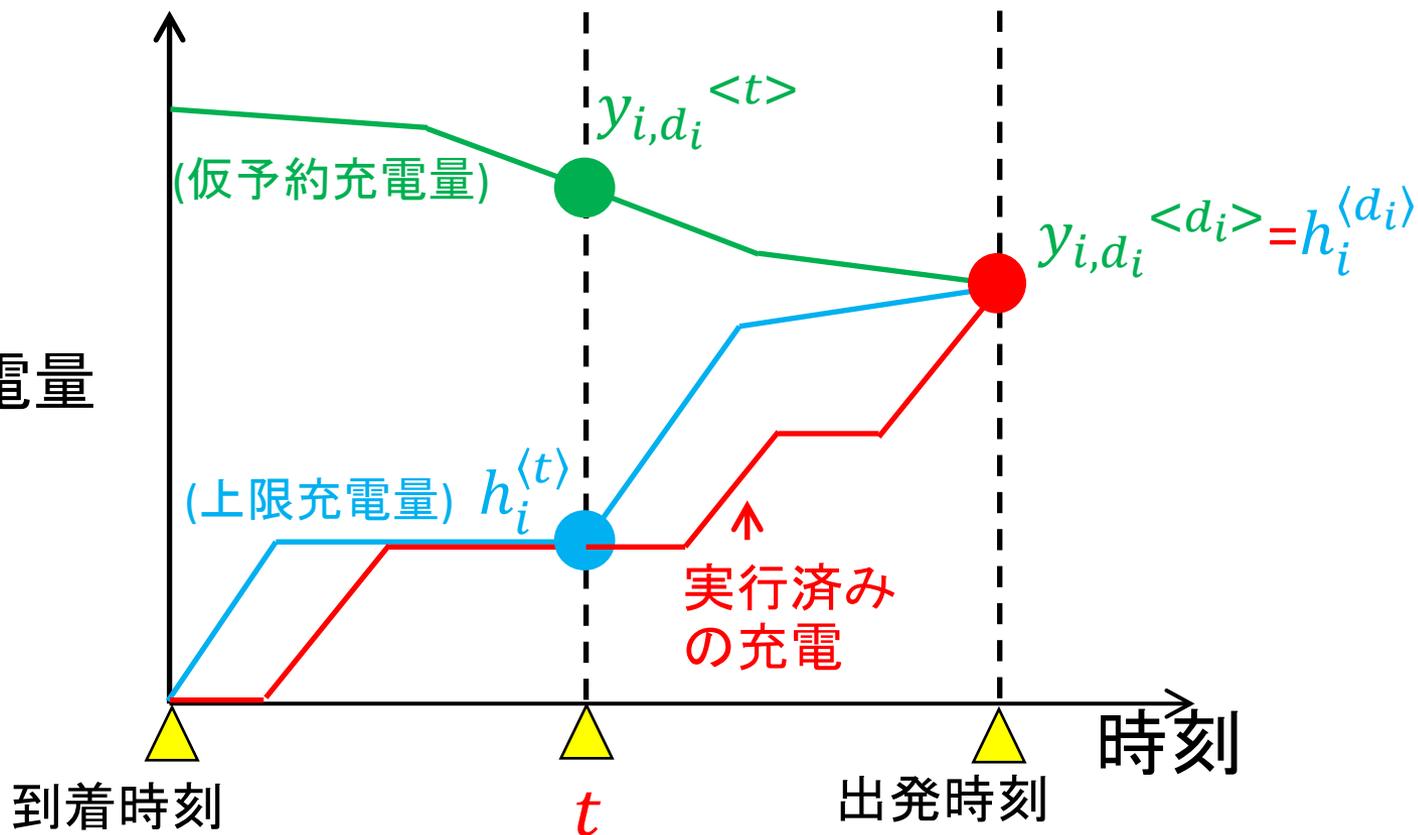
- 最終的, **仮予約充電量**と**上限充電量**は一致する  
⇒ 耐戦略性と充電実行可能性を保証しながら逐次最適化された充電計画に従って充電を実行できる

出発時刻  $d_i$

<利用者>



充電量



# Price-based Online Mechanismの特徴

	メカニズム	耐戦略性	個人合理性	予算バランス	効率性	電力コスト	充電の実行可能性	計算量
(参考) 静的メカニズム	Static (静的) VCG	◎	◎	◎	◎	完全既知	—	—
動的 メカニズム	Dynamic VCG	○ (確率的)	○ (確率的)	◎	○ (確率的)	モデルが所与	× 保証なし	× 非常に大
	Online VCG	○ (確率的)	◎	○ (確率的)	○ (確率的)	モデルが所与	× 保証なし	× 非常に大
	Hayakawa et al., 2015. (IJCAI 15)	◎	◎	○~△	○~△	完全既知	◎ 保証あり	○ 比較的少ない (最適化計算を 打ち切り可能)
	Hayakawa et al., 2018. (AAMAS 18)	◎	◎	○~△	○~△	モデルが所与	◎ 保証あり	○ 比較的少ない (最適化計算を 打ち切り可能)

## 提案手法 (Price-based online mechanism)

では、具体的に、**価格決定関数 (Pricing Function)** や  
**仮予約充電量**、**上限充電量**はどうやって決める？

Proceedings of the Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2015)

## **Online Mechanisms for Charging Electric Vehicles in Settings with Varying Marginal Electricity Costs**

**Keiichiro Hayakawa**

Toyota Central R&D Labs., Inc.

Aichi, Japan

kei-hayakawa@mosk.tytlabs.co.jp

**Enrico H. Gerding**

University of Southampton

Southampton, United Kingdom

eg@ecs.soton.ac.uk

**Sebastian Stein**

University of Southampton

Southampton, United Kingdom

ss2@ecs.soton.ac.uk

**Takahiro Shiga**

Toyota Central R&D Labs., Inc.

Aichi, Japan

t-shiga@mosk.tytlabs.co.jp



# 価格決定関数 (Pricing Function)

<利用者*i*>



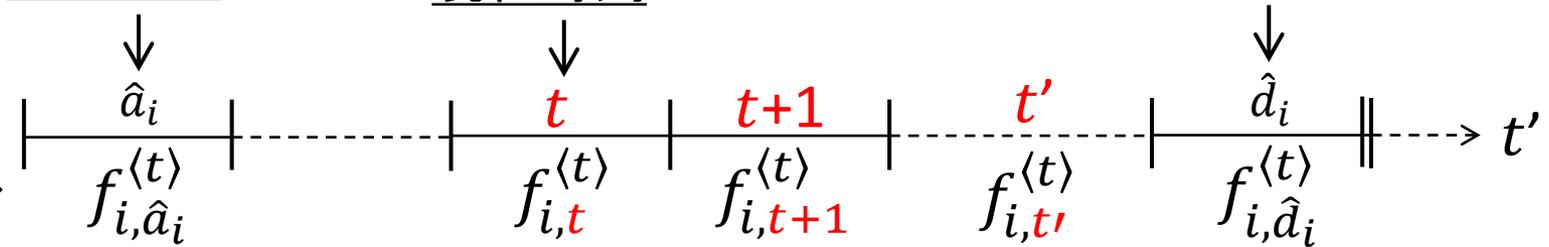
到着時刻

現在時刻

出発時刻

充電時刻⇒

(仮)充電価格⇒



$$f_{i,t'}^{(t)} = \begin{cases} SW(\hat{\theta}_{-i}^{(t)}) - SW_{t'}(\hat{\theta}_{-i}^{(t)}) & \text{if } t' \geq t \\ f_{i,t'}^{(t-1)} & \text{if } t' < t \end{cases}$$

← (将来の)時刻 $t'$ の充電による外部費用  
← 現在時刻以前については固定

## 価格決定関数

$$p_i = \sum_{j=1}^{\pi_i} p_{i,j}^{(\hat{a}_i)} : p_{i,j}^{(t)} = \text{incr} \left( f_{i,\hat{a}_i}^{(\hat{a}_i)}, f_{i,\hat{a}_i+1}^{(\hat{a}_i+1)}, \dots, f_{i,t}^{(t)}, \dots, f_{i,\hat{a}_i}^{(\hat{a}_i)} \right) \leftarrow \text{価格を昇順に並び替え, 安い方から適用}$$

この関数で決定される価格は、

- ✓ 本人の申告する支払意思額に依存しない
- ✓ 到着時刻が早く、出発時刻が遅いほど安くなる

**実際に充電する時刻** と **価格を適用する時刻** を分離！！

最適化による効率向上を目指しつつ、耐戦略性を保証する



# 制約条件

## 仮予約充電量:

$$y_{i,\hat{d}_i}^{(t)} = \operatorname{argmax}_{0 \leq k \leq \hat{d}_i - \hat{a}_{i+1}} \sum_{j=1}^k (\hat{v}_{i,j} - p_{i,j}^{(t)}) \leftarrow \text{現時点での仮価格 } p_{i,j}^{(t)} \text{ に基づいて,}$$

出発時刻までの間の効用を最大化する充電量

## 上限充電量:

$$h_i^{(t)} = \operatorname{argmax}_{0 \leq k \leq t - \hat{a}_{i+1}} \sum_{j=1}^k (\hat{v}_{i,j} - p_{i,j}^{(t)}) \leftarrow \text{現時点での仮価格 } p_{i,j}^{(t)} \text{ に基づいて,}$$

現在時刻までの間の効用を最大化する充電量

上式で与えられる**仮予約充電量**と**上限充電量**は以下の制約を満たす

【耐戦略性と実行可能性を保証する制約条件(十分条件)】 ← 再掲

- $h_i^{(t+1)} \geq h_i^{(t)}$  ← 各利用者の上限充電量は単調増加
- $y_{i,\hat{d}_i}^{(t+1)} \leq y_{i,\hat{d}_i}^{(t)}$  ← 各利用者の仮予約充電量は単調減少
- $0 \leq y_{i,\hat{d}_i}^{(t)} - h_i^{(t)} \leq (\hat{d}_i - t) \hat{r}_i$   
← 出発時刻までに2変数の差に相当する充電が実行可能

このアルゴリズムは**耐戦略性**と**実行可能性**を保証する

# 効率性の評価（シミュレーション実験）

提案アルゴリズムでは、耐戦略性と実行可能性は保証されているが、  
効率性と予算バランス(BB)は、保証されていない  
⇒ 実データを用いたシミュレーションで検証

## • 実験条件

- 充電コスト  
(右表参照)

データ	条件	出展
電力市場価格	6月の晴天日	日本卸電力取引所
太陽光発電量	↑	日本建築学会
家庭の一般電力使用量	↑	↑

- EVエージェント

データ	条件
エージェント数	200
到着 & 出発時刻	340人名古屋市民対象のアンケートより
充電可能量	1~6単位 (1単位は3kWh相当)
評価額	0~100(円/kwh)

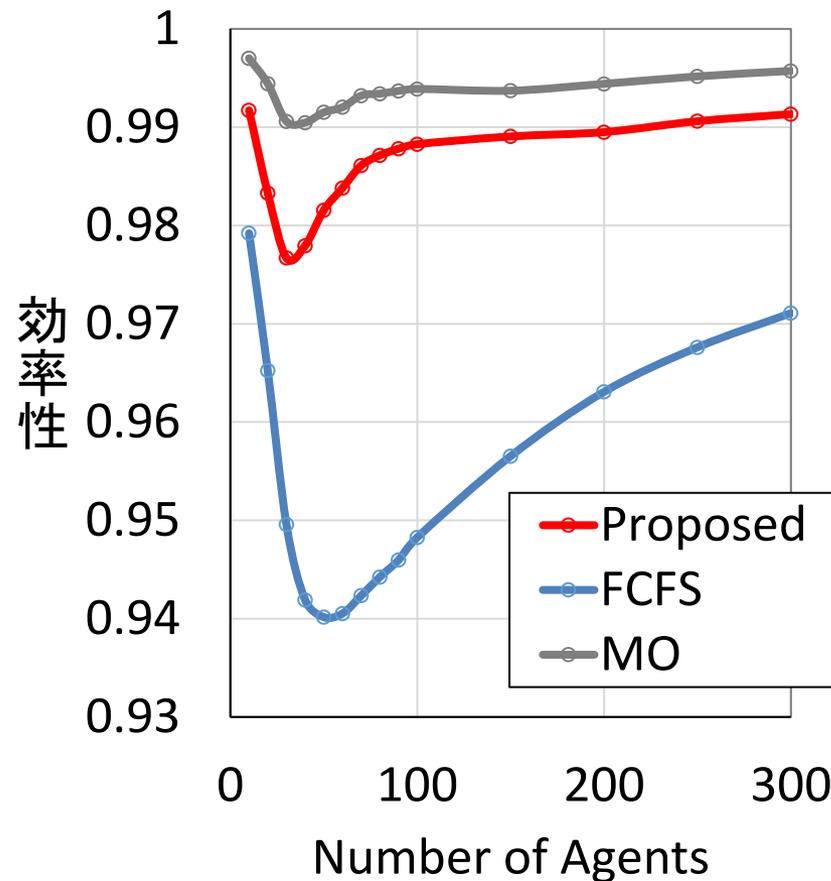
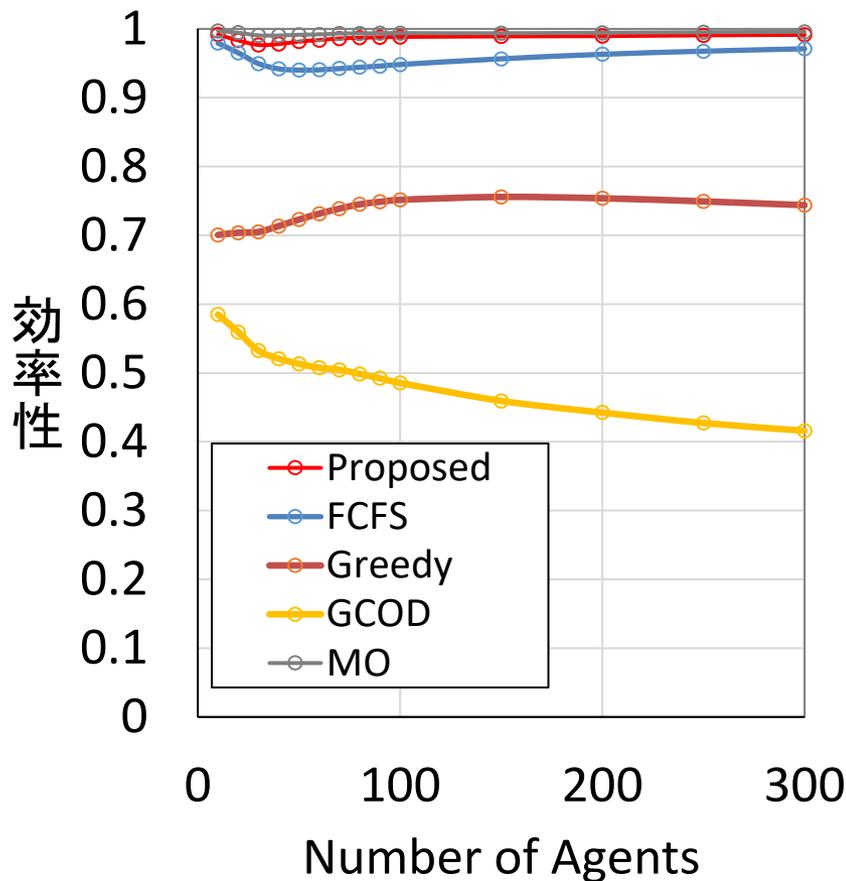
実験条件を変化させながら繰り返し100回の計算を試行

# ベンチマークメカニズム

	動的環境	調達コストの変化	耐戦略性	予算均衡
【Proposed】 Proposed Mechanism	YES	YES	YES	No
【Greedy】 Myopically Greedy	YES	No	No	YES
【GCOD】 Greedy with Cancellation on departure [Gerding et al., 2011]	YES	No	YES	YES
【FCFS】 First Come First Serve	YES	YES	YES	YES
【MO】 Myopically Optimal	YES	YES	No	-
【Optimal】 Offline Optimal	No	YES	-	-

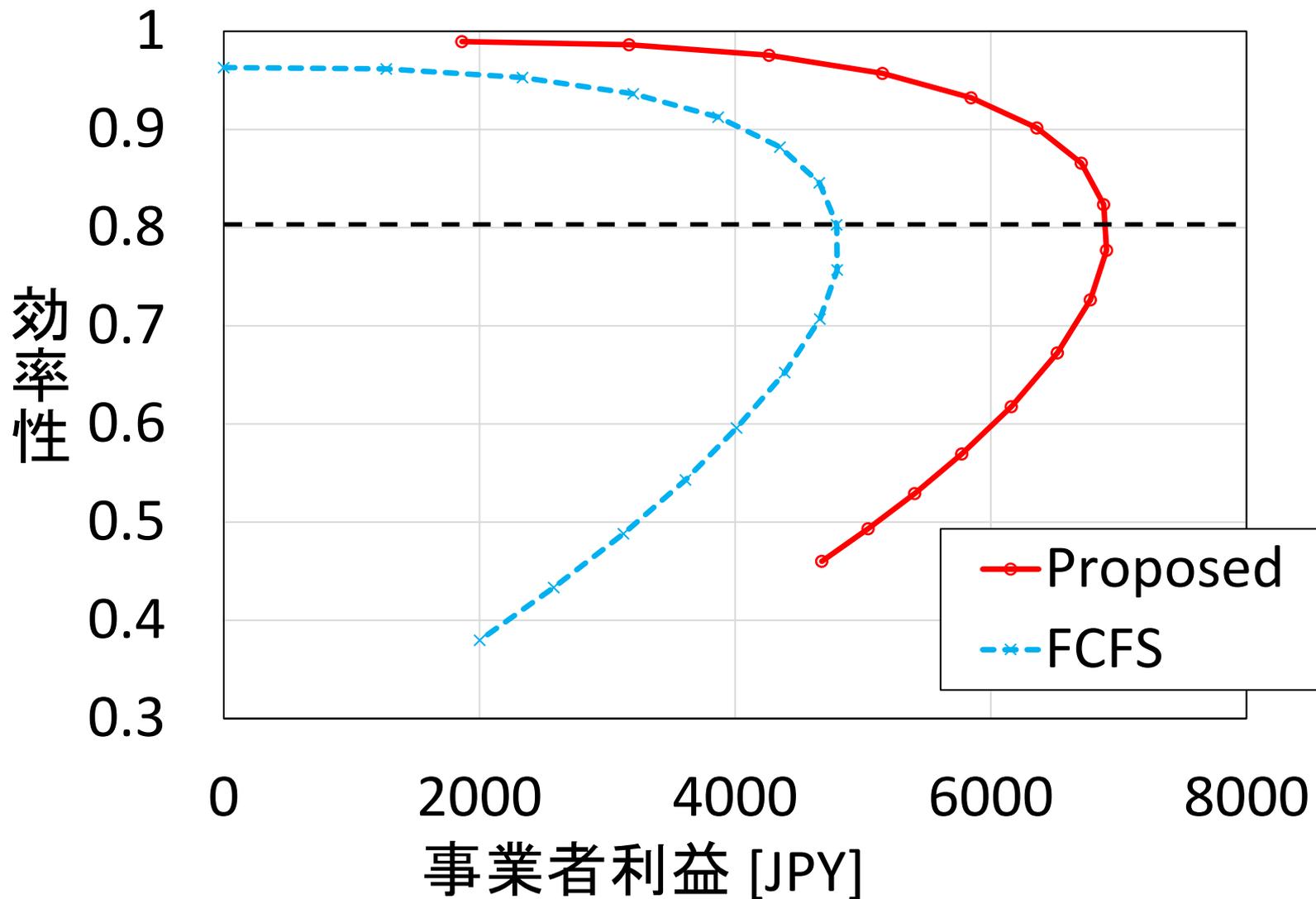


# 総社会効用(事業者効用と利用者効用の総和)の評価



$$\text{効率性} = \frac{\text{(各メカニズムで得られた)総社会効用}}{\text{(静的最適化で得られる)総社会効用}}$$

# 総社会効用と事業者効用のトレードオフ



# AAMAS18で発表したアルゴリズム

Session 9: Auctions and Mechanism Design 2

AAMAS 2018, July 10-15, 2018, Stockholm, Sweden

## Price-based Online Mechanisms for Settings with Uncertain Future Procurement Costs and Multi-unit Demand

Keiichiro Hayakawa  
Toyota Central R&D Labs., Inc.  
Nagakute, Aichi, Japan  
kei-hayakawa@mosk.tytlabs.co.jp

Sebastian Stein  
University of Southampton  
Southampton, United Kingdom  
ss2@ecs.soton.ac.uk

Enrico H. Gerding  
University of Southampton  
Southampton, United Kingdom  
eg@ecs.soton.ac.uk

Takahiro Shiga  
Toyota Central R&D Labs., Inc.  
Nagakute, Aichi, Japan  
t-shiga@mosk.tytlabs.co.jp



# 電力調達コストの不確実性を考慮

- 将来の電力コストに不確実性があることを想定

電力調達コスト;  $c(t, k)$   
 ・充電時刻と充電量(台数)に依存

電力市場



- Price-based online mechanismの枠内で具体的な4つのアルゴリズムを提案

時刻 $t$ に情報入手 ↓ 事前<sup>に</sup>情報入手  
 実際のコスト  $c(t, k)$  ↓ 推定コスト  $\tilde{c}(t, k)$



アグリゲーター事業者

## (1) 早い者勝ち(FCFS)

- 割り当てルール  $Y(\hat{\theta})$ : 早い者勝ち
- 支払ルール  $X(\hat{\theta})$

[1-1] FCFS(Max)アルゴリズム

$$p_{i,j}^{(t)} = \underline{\rho_1} c_{max} \left( t, k_{-i,t}^{(\hat{a}_i)} + j \right)$$

[1-2] FCFS(Est)アルゴリズム

$$p_{i,j}^{(t)} = \underline{\rho_1} \tilde{c} \left( t, k_{-i,t}^{(\hat{a}_i)} + j \right)$$

**仮予約充電量:**  $y_{i,d_i}^{<t>} = \operatorname{argmax}_{0 \leq k \leq \hat{a}_i - \hat{a}_{i+1}} \sum_{j=1}^k (\hat{v}_{i,j} - p_{i,j}^{(t)})$

**上限充電量:**  $h_i^{(t)} = y_{i,t}^{(t)}$



# (2) Responsive メカニズム

- 割り当てルール  $Y(\hat{\theta})$   
 ⇒ 与えられた制約条件の下で、**毎時刻、最適化計算をやり直す**。  
 = 後からやってきた High-value エージェントを合理的に優先する仕組み
- 支払ルール  $X(\hat{\theta})$  ⇒ 以下の2種類

## [2-1] Count ルール

(保守的な支払方法)

Using this, the virtual cost  $c'_{i,t'}$  is defined as follows:

$$c'_{i,t'} = \begin{cases} c(t', \lfloor \rho_2 \cdot n_{i,t'}^{(t)} \rfloor) & (t' \leq t) \\ c_{max}(t', \lfloor \rho_2 \cdot n_{i,t'}^{(t)} \rfloor) & (t' > t) \end{cases} \quad (16)$$

Here, parameter  $\rho_2 \leq 1$  can be set by the mechanism. Then, the cost  $c_{i,t'}^{(t)}$  is set for each agent as follows:

$$c_{i,t'}^{(t)} = \begin{cases} c'_{i,t'} & (t = \hat{a}_i) \\ \min\{c_{i,t'}^{(t-1)}, c'_{i,t'}\} & (otherwise) \end{cases} \quad (17)$$

If  $t \leq \delta_i$ , the marginal price  $p_{i,l}^{(t)}$  is obtained by sorting all  $c_{i,t'}^{(t)}$  during the period  $t \in [\hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i]$  in ascending order, and if  $t > \delta_i$ ,  $p_{i,l}^{(t)} = p_{i,l}^{(t-1)}$ .

## [2-2] PayEX ルール

(VCG価格に近い計算方法)

$$p_{i,l}^{(t)} = \begin{cases} \rho_3 \cdot \{EX_i(t, l) - EX_i(t, l-1)\} & (t = \hat{a}_i) \\ p_{i,l}^{(t-1)} & (t > \delta_i) \\ \min\{\rho_3 \cdot \{EX_i(t, l) - EX_i(t, l-1)\}, p_{i,l}^{(t-1)}\} & (otherwise) \end{cases}$$

**仮予約充電量:**  $y_{i,d_i}^{<t>} = \operatorname{argmax}_{0 \leq k \leq \hat{a}_i - \hat{a}_{i+1}} \sum_{j=1}^k (\hat{v}_{i,j} - p_{i,j}^{(t)})$

**上限充電量:**  $h_i^{(t)} = \operatorname{argmax}_{0 \leq k \leq \hat{a}_i - \hat{a}_{i+1}} \sum_{j=1}^k (\hat{v}_{i,j} - p_{i,j}^{(t)})$

どのアルゴリズムも、支払ルールに**自由度がある**→パラメータスタディを実施



# 各メカニズムの特徴

メカニズム	パラメータ	耐戦略性 (DSIC)	個人合理性 (IR)	予算バランス (BB)
[1-1]早い者勝ち [FCFS(Max)]	$\rho_1 \geq 1$	✓	✓	✓
	$\rho_1 < 1$	✓	✓	
[1-2]早い者勝ち [FCFS(Est)]	$\rho_1 \geq 1$	✓	✓	$\Delta$ (ex-interim WBB)
	$\rho_1 < 1$	✓	✓	
[2-1] Responsive [Count]	$\rho_2 = 1$	✓	✓	✓
	$\rho_2 < 1$	✓	✓	
[2-2] Responsive [PayEX]	$\forall \rho_3$	✓	✓	

提案する手法は、全て、「耐戦略性」と「個人合理性」を満たす  
 ⇒「Private Information の収集」という点はクリア

では、効率は??? ← 実環境を想定した数値実験を実施

# 実験結果(1)

まずは、 $\rho_1 = \rho_1 = \rho_3 = 1$  とおいて、各アルゴリズムの *Efficiency* を評価

$$Efficiency = \frac{SW}{SW_{OPT}}$$

外部条件に関するパラメータ

$\gamma$ : 供給の厳しさ

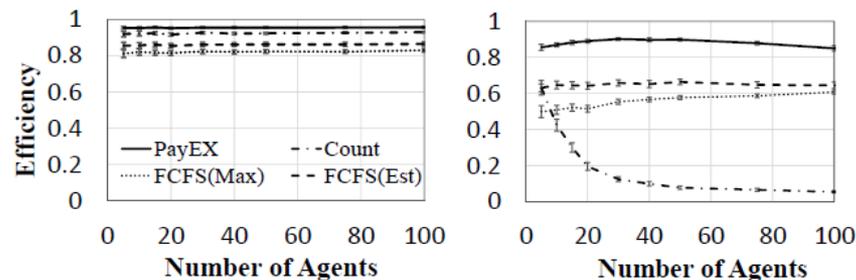
$\varepsilon$ : 電力価格の推定誤差の大きさ

将来電力価格の振れ幅が大きい( $\varepsilon$ が大)場合

⇒ PayEX が有利 (EV充電はこっちに近い?)

電力供給が非常にタイト( $\gamma$ が大)な場合

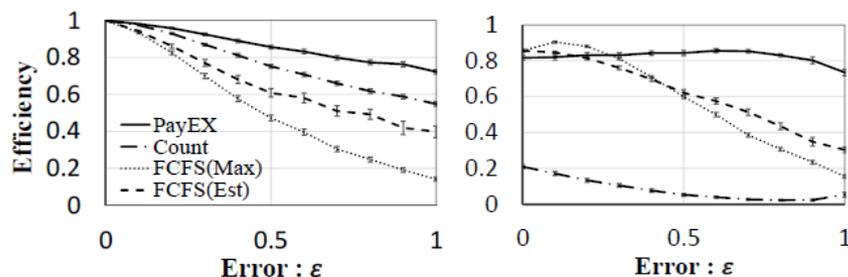
⇒ 早い者勝ちが有利



Case 1:  $\gamma = 1.0, \varepsilon = 0.2$

Case 2:  $\gamma = 1.1, \varepsilon = 0.5$

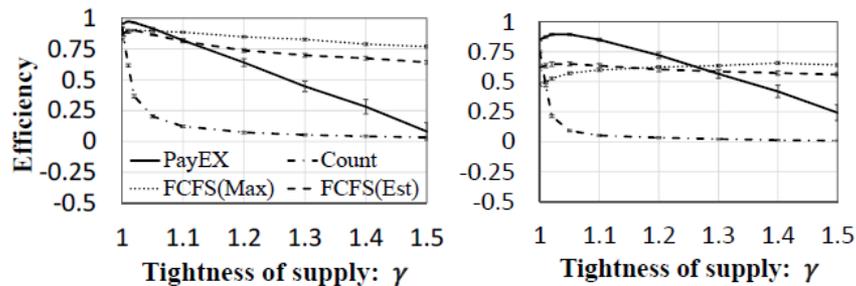
Figure 2: Efficiency of the mechanisms.



Case 1:  $\gamma = 1.0$

Case 2:  $\gamma = 1.1$

Figure 3: Influence of the error band  $\varepsilon$ .

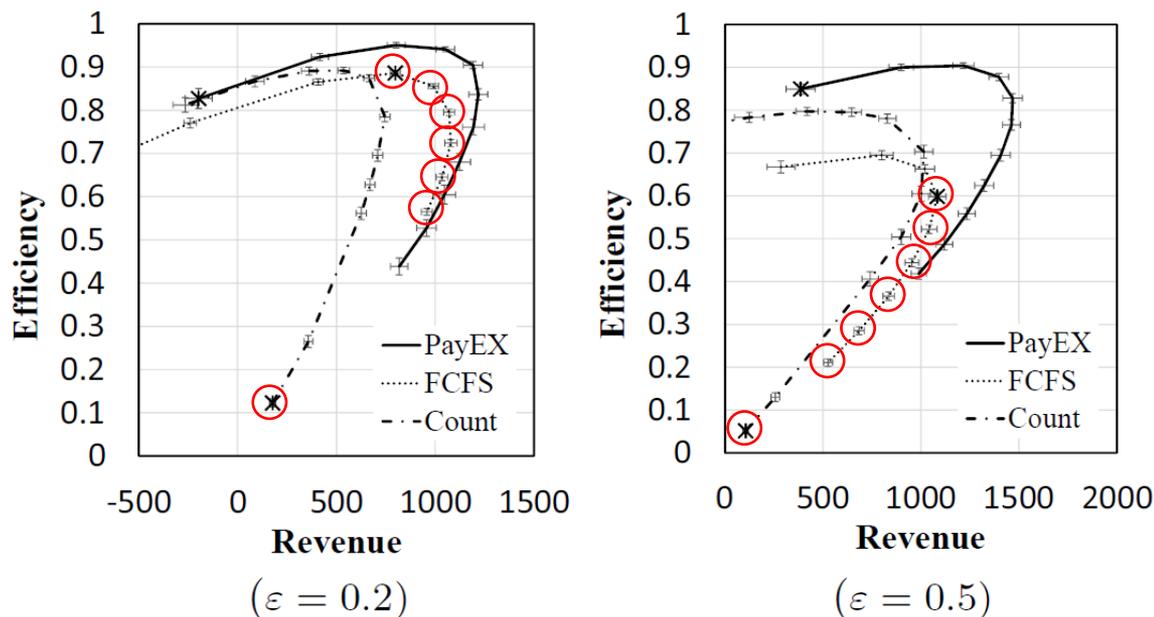


Case 1:  $\varepsilon = 0.2$

Case 2:  $\varepsilon = 0.5$

Figure 4: Influence of supply tightness  $\gamma$ .

# 実験結果(2)



左図の全てのプロットが、「耐戦略性」「個人合理性」を満たす  
←正直申告を誘導

○: 予算バランスが理論的に保証されている点

Figure 5: Trade-off between efficiency and revenue.

- 「効率性」と「売上」はトレードオフだが、環境によっては、提案手法(PayEX)が、FCFSを大きくパレート改善する
- Worst Caseの予算バランス(=売上が常に正)は保証されないが。
- 提案フレームワークは、「売上」と「効率性」のトレードオフの中から、どのメカニズムを選ぶか、**幅広い選択肢を提供**

# 目次

- はじめに
  - V2G(Vehicle To Grid)への期待と課題
  - 「メカニズムデザイン」とオークション理論
- EV充電スケジュールと課金メカニズムの設計
  - 問題の定式化
  - Price-based Online Mechanism
  - IJCAI15 で発表したアルゴリズム
  - AAMAS18 で発表したアルゴリズム
- まとめ

# 研究内容のまとめ

- EV充電においては、システム最適状態(SO)と利用者均衡状態(UE)の間に乖離が生じる
- 利用者の「耐戦略性」に着目した制度設計というアプローチを提案
- オークション理論の知見に基づき、Price-based Online Mechanism というフレームワークを提示
- 具体的なアルゴリズムを示し、数値シミュレーション実験で評価

# 社会実装に向けて

昼間に充電した人に深夜電力を適用してもいいんじゃない？

提案手法の本質は...

## 充電時刻と課金額の分離

### 現状

- ・深夜に充電したら夜間電力
- ・昼間の節電に協力したらポイント



### 提案手法のコア

- ・実際の充電時刻は事業者が決める
- ・利用者の制約の強さに課金する



電力事業者は、将来の需給予想や天気予報に合わせて充電スケジュールを最適化したい  
(制約条件) 顧客の到着時刻, 出発時刻

制約条件が緩ければ緩いほど、最適解は良くなる

### 具現化の例

#### ご家庭EV充電プラン (サブスクリプション型料金プラン)

深夜12:00までにプラグを挿したら、プランの出発時刻までに満充電を完了します。

プラン	月額料金
朝7:00出発プラン	5000円
朝9:00出発プラン	4000円
昼12:00出発プラン	1500円

※ プランの出発時刻よりも早い時刻に充電完了を希望される場合、別途料金が発生します

#### プラグインでポイント還元！

EVを充電器とプラグ接続していた時間に応じて、1時間当たり10ポイントを付与します！

本質さえ外さなければ細かいアルゴリズムは気にしなくていいよね



TOYOTA CRDL, INC.

# ご清聴ありがとうございました

早川 敬一郎

kei-Hayakawa@mosk.tytlabs.co.jp

## 参考文献



人工知能学会誌 Vol.35 No.4 (2020/7) p549-557

“交通サービスの課金メカニズムデザイン” 早川 敬一郎

Hayakawa, K., Gerding, E. H., Stein, S., & Shiga, T. (2015, July). **Online mechanisms for charging electric vehicles in settings with varying marginal electricity costs.** In Proceedings of the 24th International Conference on Artificial Intelligence(IJCAI), pp. 2610-2616.

Hayakawa, K., Gerding, E. H., Stein, S., & Shiga, T. (2018, July). **Price-based Online Mechanisms for Settings with Uncertain Future Procurement Costs and Multi-unit Demand.** In Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems(AAMAS), pp. 309-317.

早川敬一郎, & 志賀孝広. (2015). **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.** In 人工知能学会全国大会論文集 第29回, pp. 2J12-2J12.