



# 第19回 ITSシンポジウム 2021

## 企画セッション

### 電動車両を活用した カーボンニュートラルのための エネルギーマネジメント

2021年12月9日

名古屋大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻 教授  
鈴木 達也

# 自己紹介



1991/03 名古屋大学 大学院工学研究科 電子機械工学専攻  
博士課程後期課程 修了 (工学博士)

1991/04 名古屋大学 工学部 電気学科 助手

1998/09- カリフォルニア大学バークレー校 機械工学科  
1999/08 客員研究員 (PATHプロジェクト)

2006/04 名古屋大学 大学院工学研究科  
機械理工学専攻 電子機械工学分野  
(現機械システム工学専攻) 教授

2012/04- 理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センター  
2015/03 ロボット制御研究チーム チームリーダー

2015/04 **JST CREST (EMS領域 5 最強チームの一つ)**  
**「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管理システム」(研究代表者 事後評価A+)**

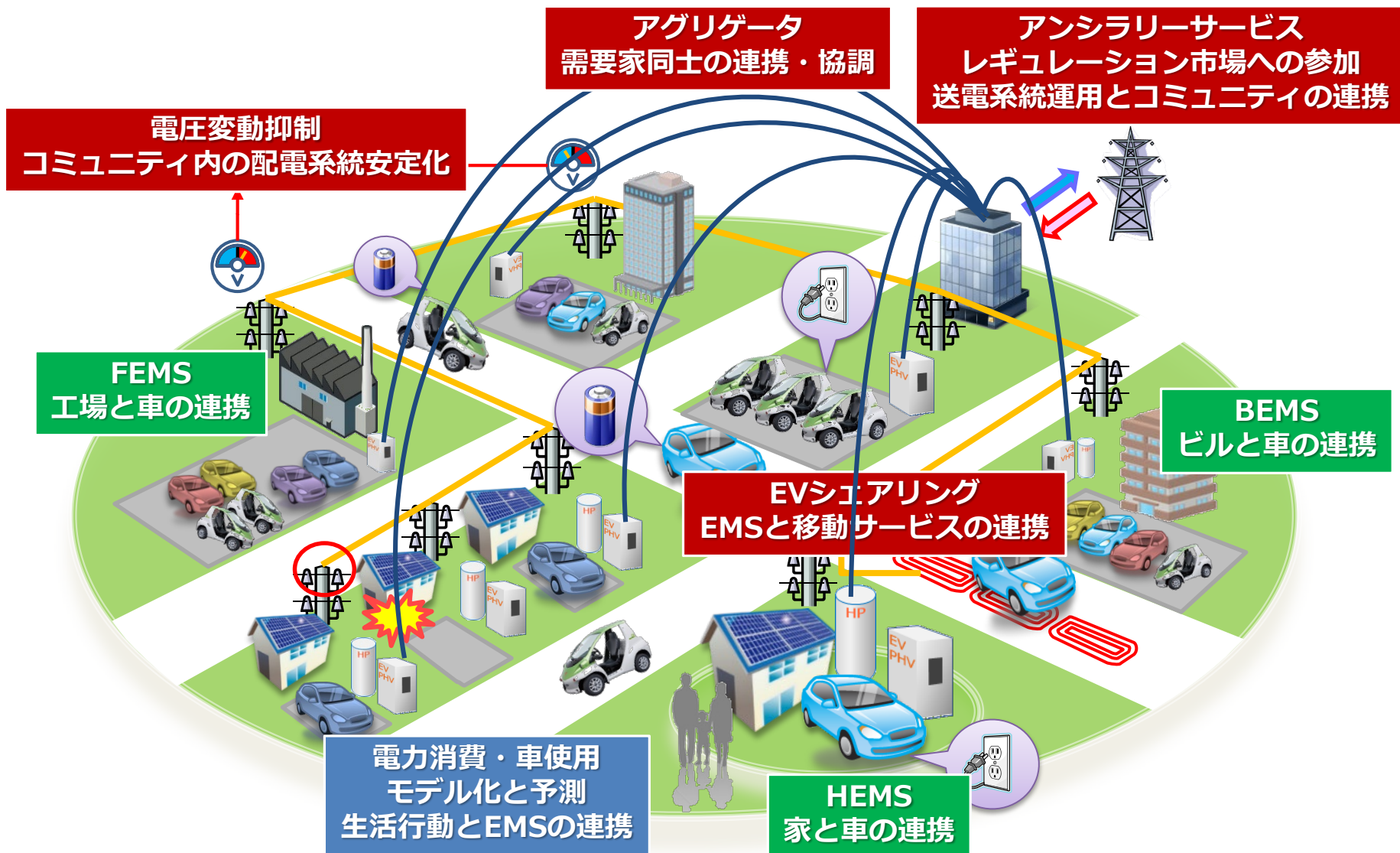
2016/04 名古屋大学COI拠点 副研究リーダー

2017/11 JST 未来社会創造事業 (知の拡張 領域) 「認知科学と制御工学の融合による  
知能化機械と人間の共生」研究代表者

2019/04- 名古屋大学 未来社会創造機構・モビリティ社会研究所長  
2021/03



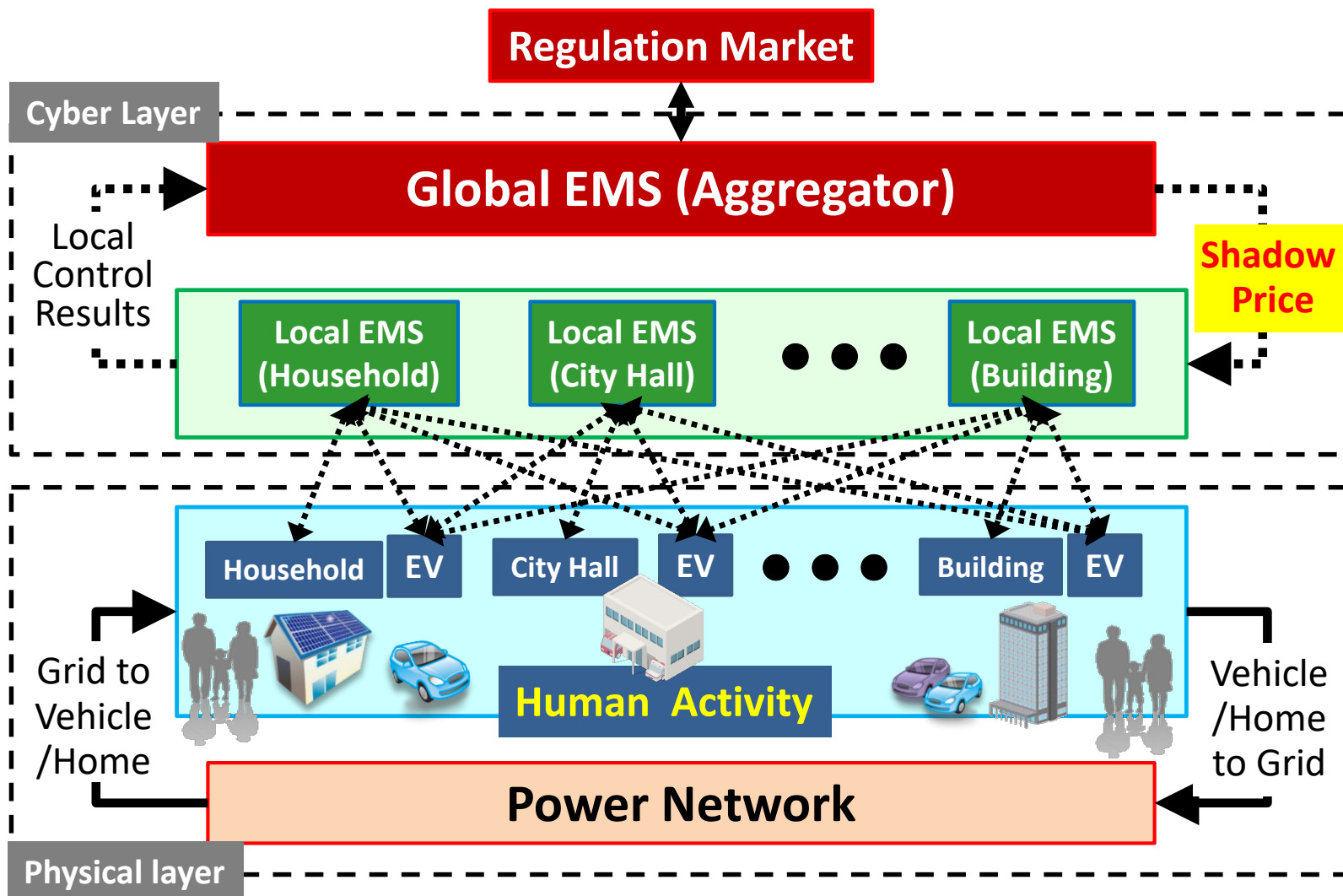
# 電動車両活用EMSの課題群



# EMSにおける Global と Local の調和



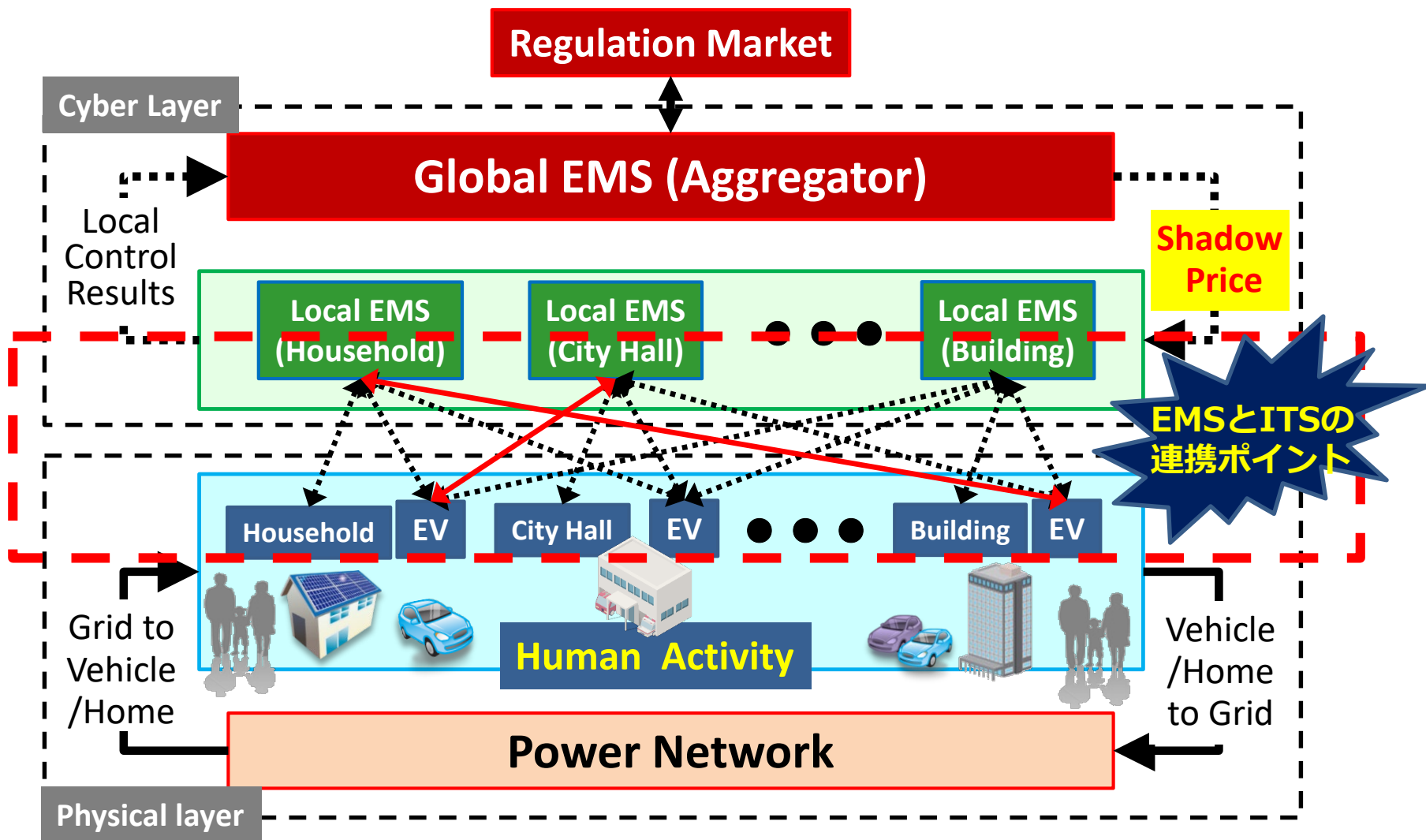
個の要求を満たしつつ全体の調和を図るには？



# EMSにおける Global と Local の調和

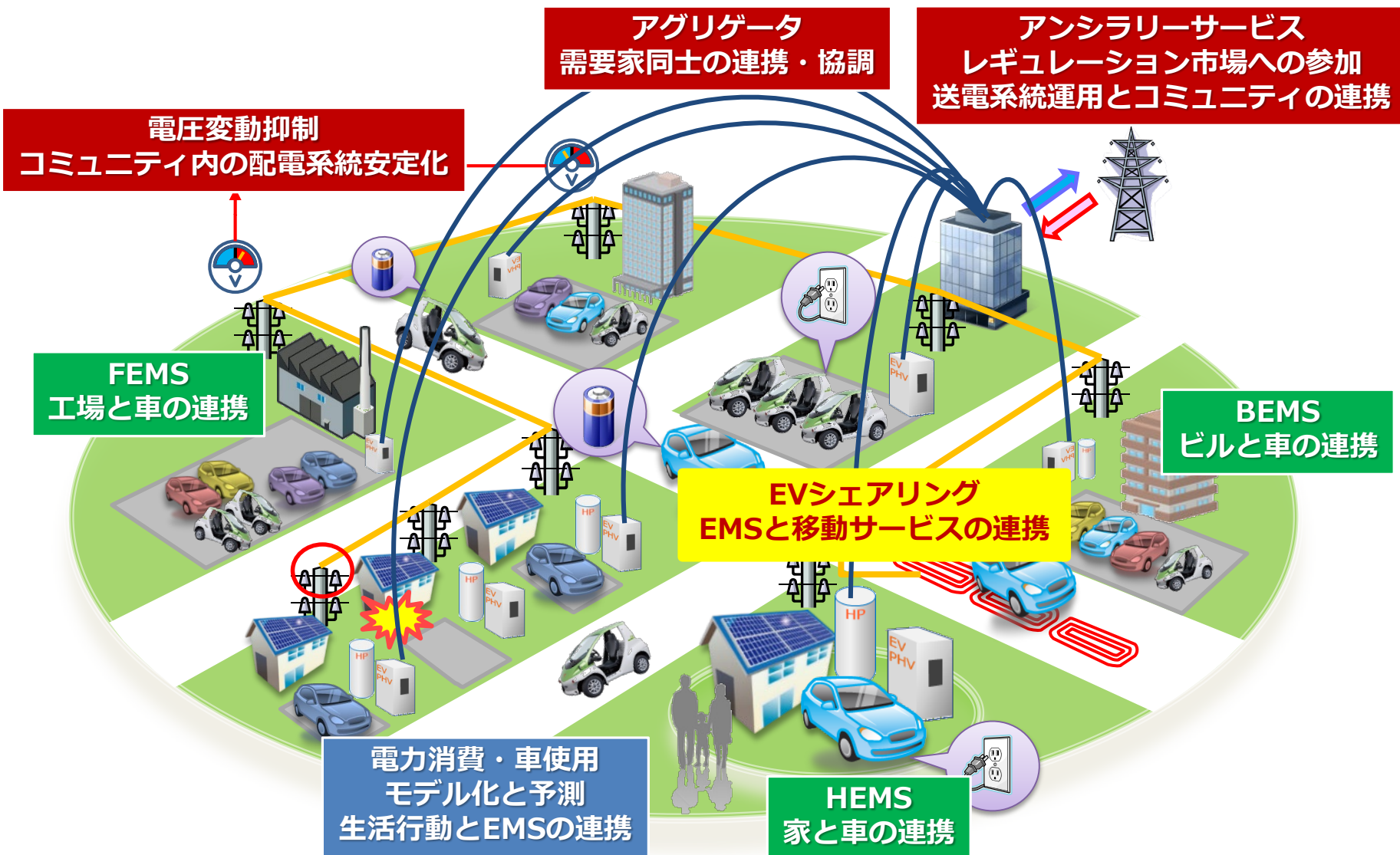


個の要求を満たしつつ全体の調和を図るには？





# 電動車両活用EMSの課題群

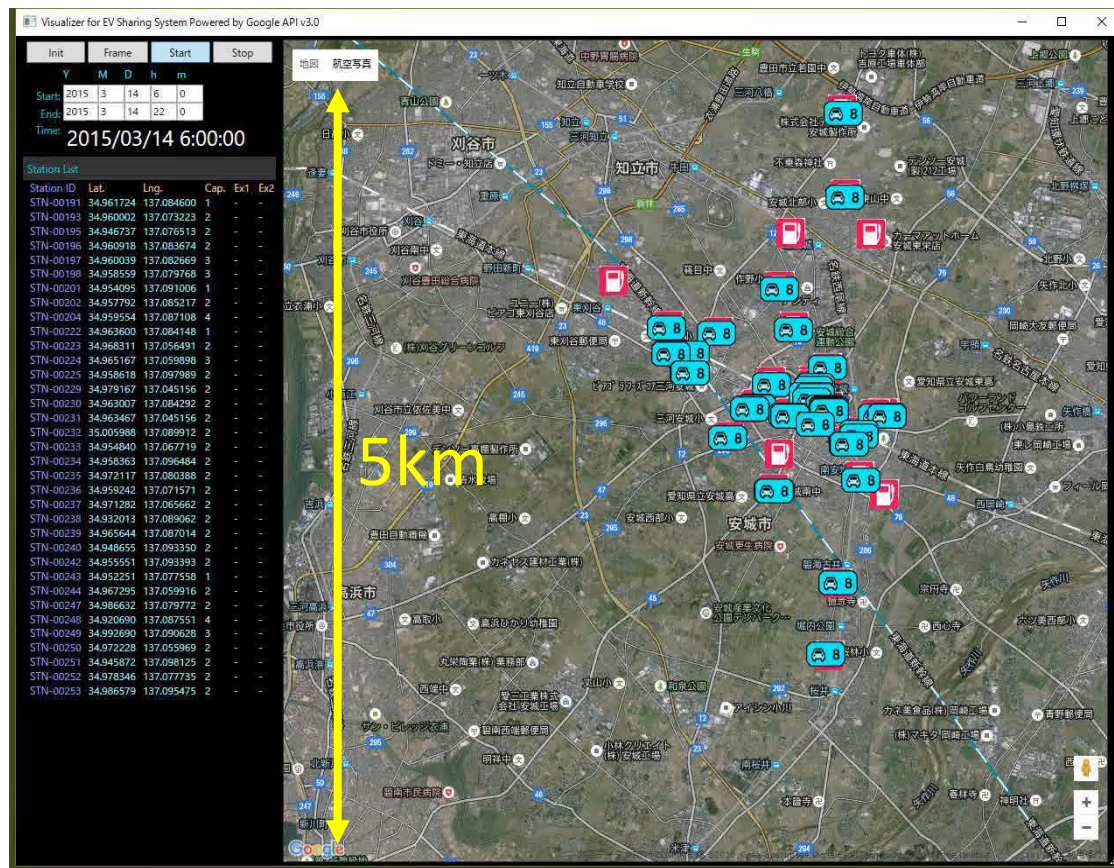


# EVシェアリングにおける連携例



(20stations, 30cars; 1day Behavior of EV and SOC)

安城市



Collected data: Location(GPS), Drive distance [m], Battery SOC [%], Reservation info. (1sec)

# EVシェアリングの多目的最適化



## ■ワンウェイ型カーシェアリングを対象とした車両運用システムの全体最適化

以下を満たすように車両割当と充放電計画，再配車計画を同時に最適化する．

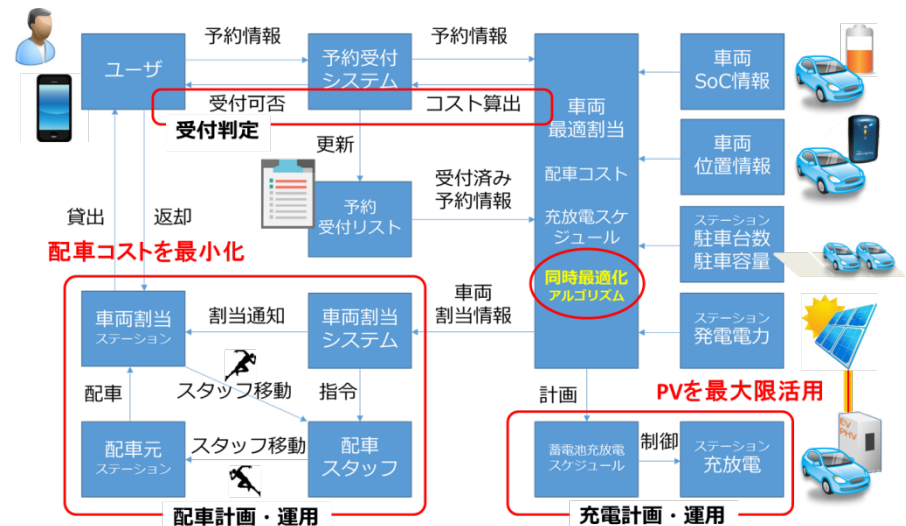
- ・ 運営スタッフによる車両の再配車（予約への対応に必要な車両の移動）を極力減らす．
- ・ 太陽光発電電力をできる限り車両の蓄電池に充電する（系統への売却は不可とする）．
- ・ 電力料金（外部の電力系統から購入する電力）を抑える．

$$E = \underbrace{\sum_{\tau=t'}^T f_m(\tau) \left( \sum_{j=1}^V x_{S+1,j}(\tau) - \sum_{k=1}^{R(t)} y_{S+1,k}(\tau) \right)}_{\text{再配車コスト}} + \underbrace{\sum_{\tau=t'}^T \left( f_w(\tau) \sum_{i=1}^S w_i(\tau | t) \Delta t \right)}_{\text{PV発電電力の抑制による損失}} + \underbrace{\sum_{\tau=t'}^T \left( f_l(\tau) \sum_{i=1}^S l_i(\tau | t) \Delta t \right)}_{\text{購入電力料金}}$$

## ■対象とするシステムの仕様

- ・ ワンウェイトリップ型
- ・ 超小型EV（トヨタ車体，COMS）
- ・ 太陽光発電電力によるEV走行電力の供給
- ・ 事前の利用予約が可能

「予約情報」・ 利用開始予定時刻  
・ 利用終了予定時刻  
・ 貸出ステーション  
・ 返却ステーション, etc.





# EVシェアリングの多目的最適化



## ■ 最適化問題としての定式化

### Given:

$S$  : ステーション数  
 $V$  : 車両台数  
 $T$  : 時刻ステップ数  
 $R(t)$  : 時刻 $t$ における予約件数  
 $x_{i,j}(t)$  : 車両の初期配置  
 $f_m(\tau)$  : 再配車のコスト  
 $f_w(\tau)$  : PV発電コスト  
 $f_l(\tau)$  : 電力料金

$\{\hat{r}_p(t)\}_{p \in \{1, \dots, R(t)\}}$  : 予約情報

・ 利用開始時刻 ・ 貸出ステーション  
 ・ 利用終了時刻 ・ 返却ステーション  
 ・ 走行時の消費電力量  $\hat{e}_k(\tau|t)$

$\{y_{i,k}(t)\}_{i \in \{1, \dots, S+1\}, k \in \{1, \dots, R(t)\}}$  : 予約を満たす車両の位置情報

$\{\hat{g}_i(\tau|t)\}_{i \in \{1, \dots, S\}}$  : PV発電電力 (予測値)

※各ステーションにPV発電設備を設置

### Slack Variables:

$l_i(\tau|t)$  : 購入電力  
 $w_i(\tau|t)$  : PV発電抑制電力

**Which Minimize:** システムの1日の運用コストを最小化

$$E = \underbrace{\sum_{\tau=t'}^T f_m(\tau) \left( \sum_{j=1}^V x_{S+1,j}(\tau) - \sum_{k=1}^{R(t)} y_{S+1,k}(\tau) \right)}_{\text{再配車コスト}} + \underbrace{\sum_{\tau=t'}^T \left( f_w(\tau) \sum_{i=1}^S w_i(\tau|t) \Delta t \right)}_{\text{PV発電電力の抑制による損失}} + \underbrace{\sum_{\tau=t'}^T \left( f_l(\tau) \sum_{i=1}^S l_i(\tau|t) \Delta t \right)}_{\text{購入電力料金}}$$

最適化対象の時刻:  $\tau \in \{t', \dots, T\}$ ,  $t' = \begin{cases} t^s & (t < t^s) \text{ (サービス開始前)} \\ t+1 & (t \geq t^s) \text{ (サービス開始後)} \end{cases}$   
 $t^s$  : サービス開始時刻

### Find:

$\{a_{j,k}(t)\}_{j \in \{1, \dots, V\}, k \in \{1, \dots, R\}}$  : 各予約に対する車両の割当  
 $\{p_{i,j}^{\text{Charge}}(\tau|t)\}_{j \in \{1, \dots, V\}, \tau \in \{t, \dots, T\}}$  : 各時刻における各車両の充放電計画  
 $\{x_{i,j}(\tau|t)\}_{i \in \{1, \dots, S\}, j \in \{1, \dots, V\}, \tau \in \{t, \dots, T\}}$  : 各時刻における各車両の位置情報

### Subject to:

予約を満たす制約

$x_{i,j}(\tau|t) \geq a_{j,k}(t) y_{i,k}(t)$  : 各予約に割り当てられた場合の車両の満たすべき位置制約

$\sum_{j=1}^V a_{j,k} = 1$  : 各予約に対する車両割当の唯一性

$\sum_{i=1}^{S+1} x_{i,j}(\tau|t) = 1$  : 各車両の各時刻に対する車両位置の唯一性

$l_i(\tau|t) + g_i(\tau|t) - w_i(\tau|t) - \sum_{j=1}^V p_{i,j}(\tau|t) = 0$  : 電力需給制約

$b_j(\tau|t) - b_j(\tau-1|t) = \sum_{i=1}^S p_{i,j}(\tau|t) \Delta t - \hat{e}_k(\tau|t) x_{S+1,j}(\tau|t)$  : 車両のSoC

その他の制約: 各ステーションの各時刻の駐車台数, etc.

# EVシェアリングの計算機実験



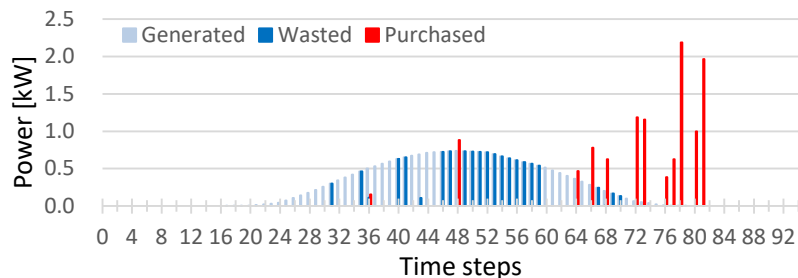
PV発電電力を可能な限り車載蓄電池に充電するように同時最適化を行った。

配車時間	なし	9:00-12:30 & 16:00-18:00	全時刻
配車回数	0	51	58
受け付けた予約数	68	95	100
受け付けられなかった予約数	32	5	0
無駄になったPV発電電力量[kWh]	2.87	2.45	1.31
購入した電力量[kWh]	2.86	4.00	3.48

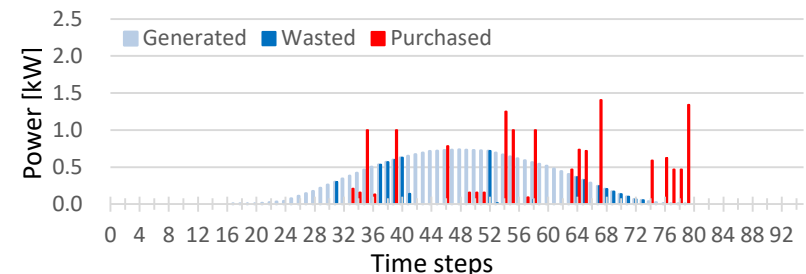
- ✓ Number of Station: 35
- ✓ Number of Vehicles: 30
- ✓ Number of reservation: 100
- ✓ Service time: 8:00 to 20:00 (12 hours)
- ✓ Battery capacity: 5.2kWh, initial: 2.6kWh
- ✓ PV car-port is equipped only at Sta.1
- ✓ Generation capacity (PV): 1kW
- ✓ Total electricity generated by PV: 5.64kWh
- ✓ Cost coefficient  $f_i(t)$  : 11.0 JPY/kWh
- ✓ Cost coefficient : 24.3 円/kWh

120秒以内に  
計算可能

配車なし



すべての時間で配車可能として最適化



予約割当，配車計画，充電計画を同時に最適化することにより，太陽光発電電力を車載蓄電池により無駄なく充電できることを確認

# EVシェアリングと電圧変動解析



## ◆ 配電電圧「分布」のODEモデル

$$\frac{d\theta}{dl} = \frac{s}{v^2}, \quad \frac{dv}{dl} = w,$$

$$\frac{ds}{dl} = -\frac{p(l, t)b - q(l, t)g}{g^2 + b^2}$$

$$\frac{dw}{dl} = \frac{s^2}{v^3} - \frac{p(l, t)g + q(l, t)b}{v(g^2 + b^2)}$$

Ref.) DistFlow  
ODE

変電所を  
基準とする距離

$$l \in \sum_{\text{配電NW}}$$

需給密度(有効分)

$$p(l, t) = p_L(l, t) + p_G(l, t) + p_{EV}(l, t, \rho_{EV})$$

消費密度

発電密度  
(太陽光)

充放電密度

$$p_{EV}(l, t, \rho_{EV}) = \int_D \rho_{EV}(\xi, t) \times P \times \phi_{\text{chargin.point}}(\xi, l) d\xi$$

組み込み  
(同化)

EV運行(時空間「分布」)の  
密度関数表現

$$\rho_{EV}(\mathbf{x}, t)$$

$$\mathbf{x} \in D$$

EV運行地域

粗視化

実測・予測データ



[検討課題]

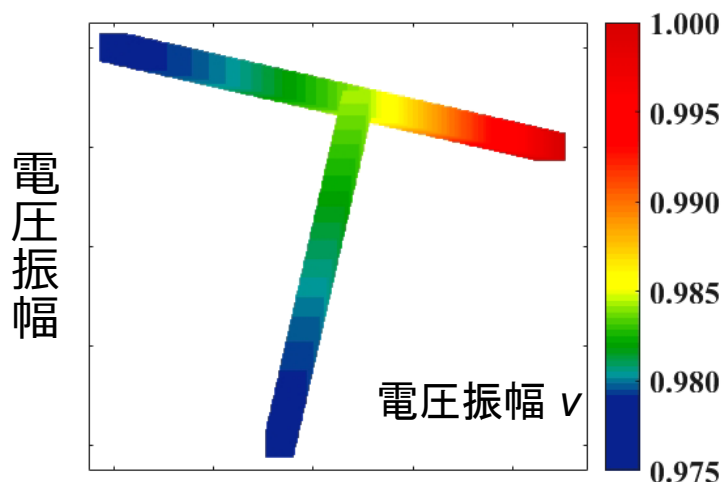
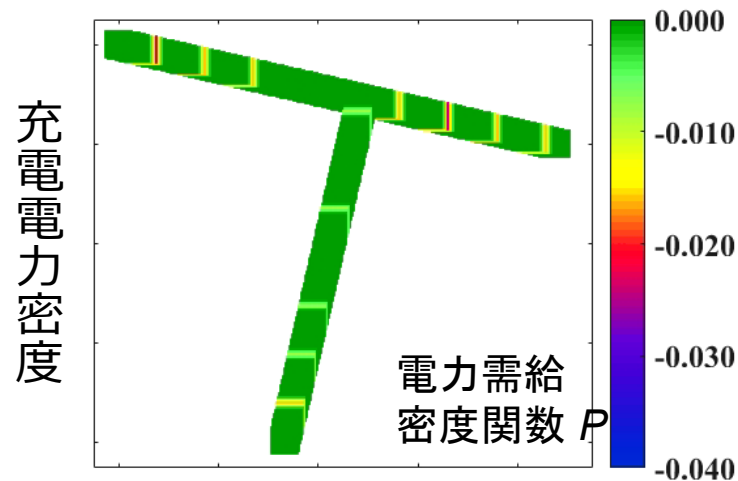
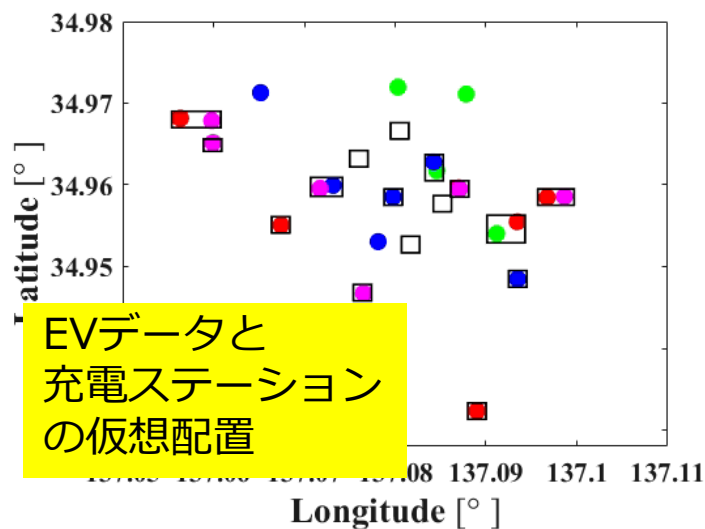
• EVシェアリングの実測データを組み込んだ  
配電電圧の変動シミュレーション

- き～モビの車両運行実測データを使用
- 各EVの電池容量を10倍程度に拡張

# 配電系統の電圧変動解析例



## EV群の配電への時空間インパクトを評価可能



DSO（配電系統オペレータ）は  
電圧変動をリアルタイムでチェック  
しながら、EVシェアリングシステム  
に対して充放電要求を送る。



# EVシェアリングの多目的最適化



## ■ 最適化問題としての定式化

### Given:

$S$  : ステーション数  
 $V$  : 車両台数  
 $T$  : 時刻ステップ数  
 $R(t)$  : 時刻 $t$ における予約件数  
 $x_{i,j}(t)$  : 車両の初期配置  
 $f_m(\tau)$  : 再配車のコスト  
 $f_w(\tau)$  : PV発電コスト  
 $f_l(\tau)$  : 電力料金

$\{\hat{r}_p(t)\}_{p \in \{1, \dots, R(t)\}}$  : 予約情報  
 ・ 利用開始時刻 ・ 貸出ステーション  
 ・ 利用終了時刻 ・ 返却ステーション  
 ・ 走行時の消費電力量  $\hat{e}_k(\tau|t)$

$\{y_{i,k}(t)\}_{i \in \{1, \dots, S+1\}, k \in \{1, \dots, R(t)\}}$  : 予約を満たす車両の位置情報

$\{\hat{g}_i(\tau|t)\}_{i \in \{1, \dots, S\}}$  : PV発電電力 (予測値)

※各ステーションにPV発電設備を設置

### Slack Variables:

$l_i(\tau|t)$  : 購入電力  
 $w_i(\tau|t)$  : PV発電抑制電力

**Which Minimize:** システムの1日の運用コストを最小化

$$E = \sum_{\tau=t+1}^{t+T} f_m(\tau) \left( \sum_{j=1}^V x_{S+1,j}(\tau) - \sum_{k=1}^{R(t)} y_{S+1,k}(\tau) \right) + \sum_{\tau=t+1}^{t+T} \left( f_l(\tau) \sum_{i=1}^S l_i(\tau|t) \Delta t \right) + \sum_{\tau=t+1}^{t+T} \left( f_d(\tau) \sum_{n=1}^N \left| \sum_{i \in I_n} \sum_{j=1}^V p_{i,j}(\tau|t) - p_n^{Ref}(\tau|t) \right| \Delta t \right)$$

再配車コスト

購入電力料金

配電系統からの指令との差

最適化対象の時刻:  $\tau \in \{t', \dots, T\}$ ,  $t' = \begin{cases} t^s & (t < t^s) \text{ (サービス開始前)} \\ t+1 & (t \geq t^s) \text{ (サービス開始後)} \end{cases}$   
 $t^s$  : サービス開始時刻

### Find:

$\{a_{j,k}(t)\}_{j \in \{1, \dots, V\}, k \in \{1, \dots, R\}}$  : 各予約に対する車両の割当  
 $\{p_{i,j}^{Charge}(\tau|t)\}_{j \in \{1, \dots, V\}, \tau \in \{t, \dots, T\}}$  : 各時刻における各車両の充放電計画  
 $\{x_{i,j}(\tau|t)\}_{i \in \{1, \dots, S\}, j \in \{1, \dots, V\}, \tau \in \{t, \dots, T\}}$  : 各時刻における各車両の位置情報

### Subject to:

予約を満たす制約

$x_{i,j}(\tau|t) \geq a_{j,k}(t) y_{i,k}(t)$  : 各予約に割り当てられた場合の車両の満たすべき位置制約

$\sum_{j=1}^V a_{j,k} = 1$  : 各予約に対する車両割当の唯一性

$\sum_{i=1}^{S+1} x_{i,j}(\tau|t) = 1$  : 各車両の各時刻に対する車両位置の唯一性

$l_i(\tau|t) + g_i(\tau|t) - w_i(\tau|t) - \sum_{j=1}^V p_{i,j}(\tau|t) = 0$  : 電力需給制約

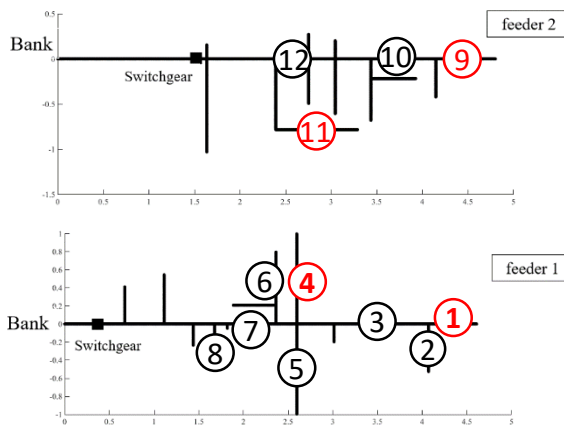
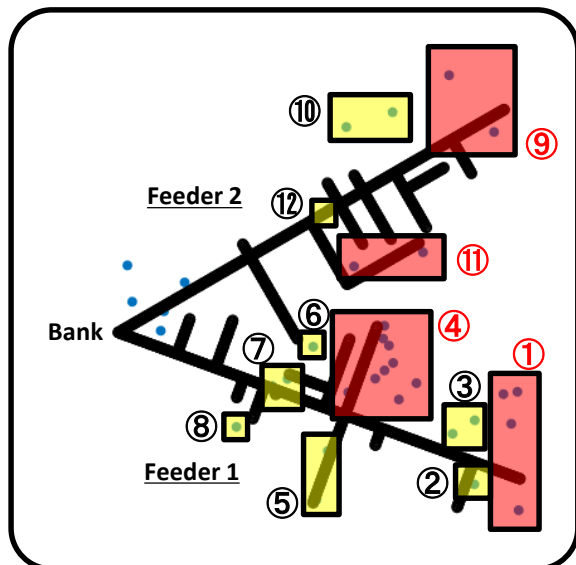
$b_j(\tau|t) - b_j(\tau-1|t) = \sum_{i=1}^S p_{i,j}(\tau|t) \Delta t - \hat{e}_k(\tau|t) x_{S+1,j}(\tau|t)$  : 車両のSoC

その他の制約: 各ステーションの各時刻の駐車台数, etc.

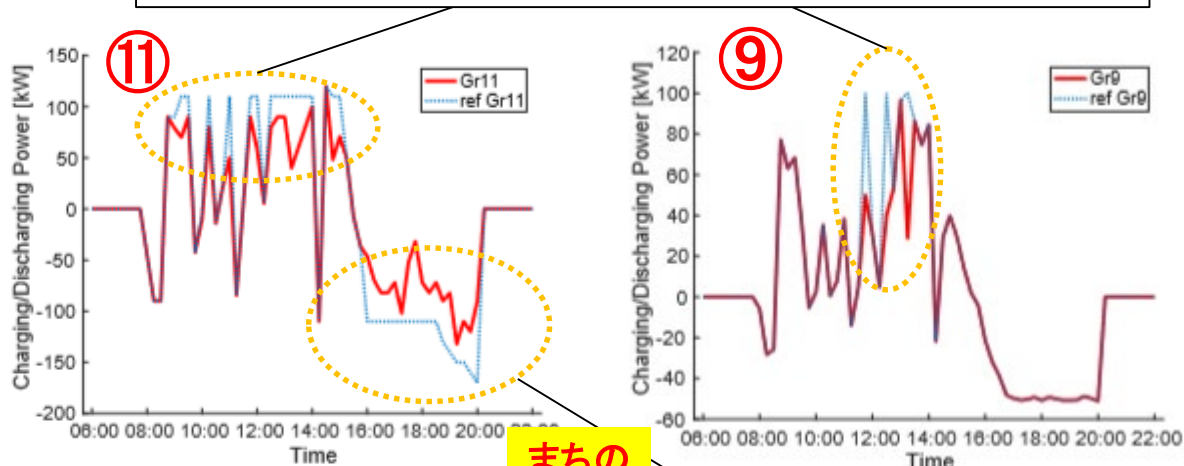
# DSOからのリクエストに対する応答



EV sharing area  
200 EVs, 41 Stations (12 groups)



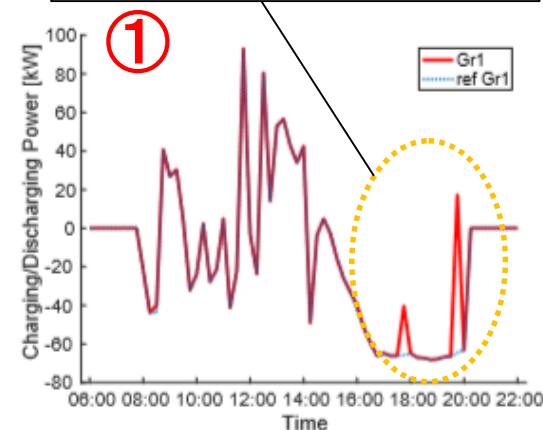
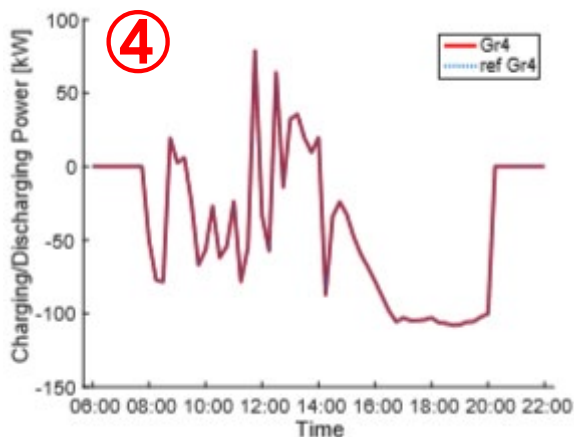
Not sufficiently respond to the charging request because of full SoC for each parked EV.



まちな  
価値

Gr. 4 can respond to the request because of 9 stations (many EVs).

Not provide enough discharging power in order to keep and satisfy the terminal SoC constraint.



# ご清聴ありがとうございました

