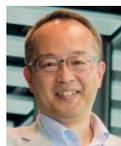




2018年2月15日

# 汎用的な実証基盤体系を利用した シナリオ対応型分散協調EMS実現手法の創出

研究代表者 林 泰弘  
早稲田大学



- 林チームの研究目標・研究組織体制
- EMS評価基盤プラットフォームの構築状況について
  - EMSシミュレーションプラットフォーム
  - EMS実験プラットフォーム
- 研究進捗状況
- 国際連携
- 研究業績

# 林チームの研究目標・研究組織体制

# 研究体制 (3カ国, 5グループ, 教授15名)



**NSF/DOE CURENT**  
**Kevin Tomsovic**  
・ 電力工学



**林 泰弘** [研究代表者]  
・ 電力工学  
・ 電力エネルギーシステム



**Hans-Arno Jacobsen**  
・ エネルギーインフォマティクス



**田辺 新一**  
・ 建築環境学  
・ ビルのエネルギーマネジメント



**天野嘉春**  
・ 機械工学  
・ 数値最適化

**HEMS-G**

**B/M  
EMS-G**



**下田 吉之**  
・ 環境工学  
・ 都市エネルギーシステム



**稲垣 伸吉**  
・ メカトロニクス



**馬場 旬平**  
・ パワーエレクトロニクス  
・ エネルギー機器



**村田 昇**  
・ 情報処理  
・ 機械学習



**若尾 真治**  
・ 電気工学  
・ 太陽光発電システム

**協調  
EMS-G**



**藤本 悠**  
・ 機械学習  
・ データマイニング



**入江 仁士**  
・ リモートセンシング  
・ 大気環境



**大橋 弘**  
・ 経済学

**経済-G**



**大森 浩充**  
・ 制御理論  
・ 数値最適化

**GEMS-G**



**石井 秀明**  
・ システム制御理論  
・ サイバーセキュリティ



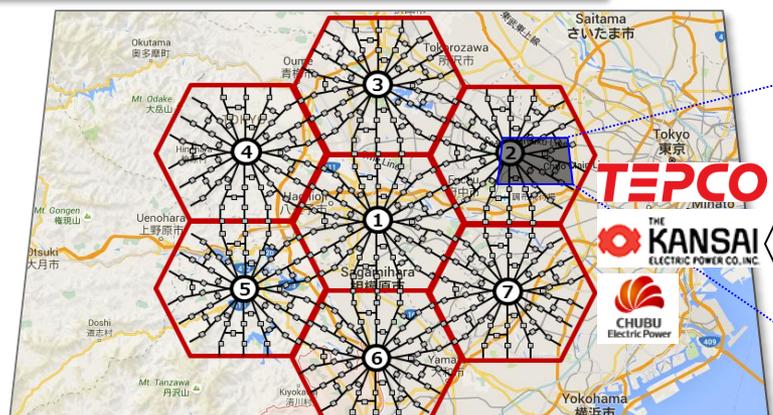
**林 泰弘**  
・ 電力工学  
・ 電力エネルギーシステム

# 研究開発の方針

## 1. 複数シナリオ対応型統合協調EMS手法の開発



## 2. EMSプラットフォームの構築



EMS シミュレーションプラットフォーム (エネルギーサイバー層)

System Link



EMS 実験プラットフォーム @早大 (エネルギーフィジカル層)

## 3. EMS手法の社会実装



結果のフィードバック

# EMS手法開発プロジェクトの展望

## 1. 複数シナリオ対応型統合協調EMS手法の開発

G/H/B/MEMS 手法  
 予測 → 運用計画 → 制御

配電損失  
 最小化手法



計算機科学 衛星データ  
 サイバーセキュリティ 経済学

## 2. EMSプラットフォームの構築

実装

I. 持続可能なスマートシティ構築のための  
 EMSシミュレーションおよび実験プラットフォーム

II. 国際共同研究 with UTK and TUM

EMS シミュレーションプラットフォーム  
 (エネルギーサイバー層)

EMS 実験プラットフォーム @早大  
 (エネルギーフィジカル層)

実装

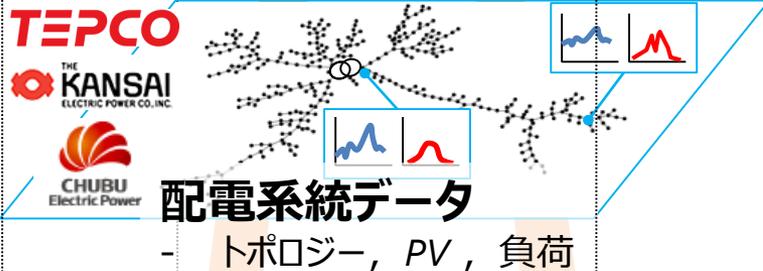
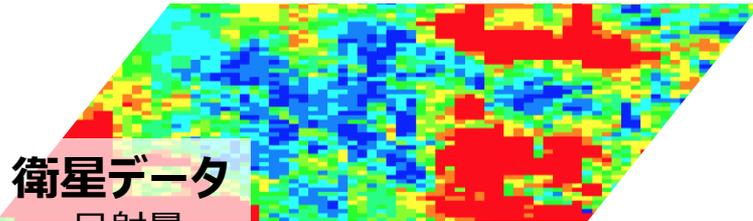
## 3. EMS手法の社会実装

III. 東京電力PGの実配電系統における損失最小化実証実験

# EMS シミュレーションプラットフォーム

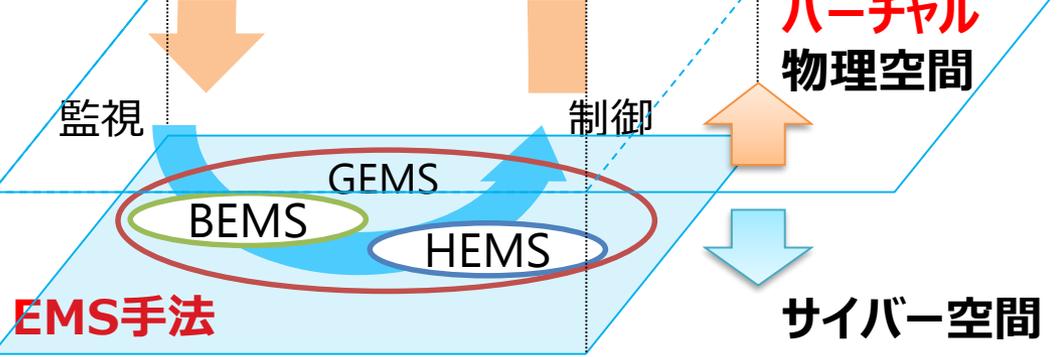
# 持続可能なスマートシティ構築のためのEMSプラットフォームの構築

## スマートシティ構築のためのEMSプラットフォーム

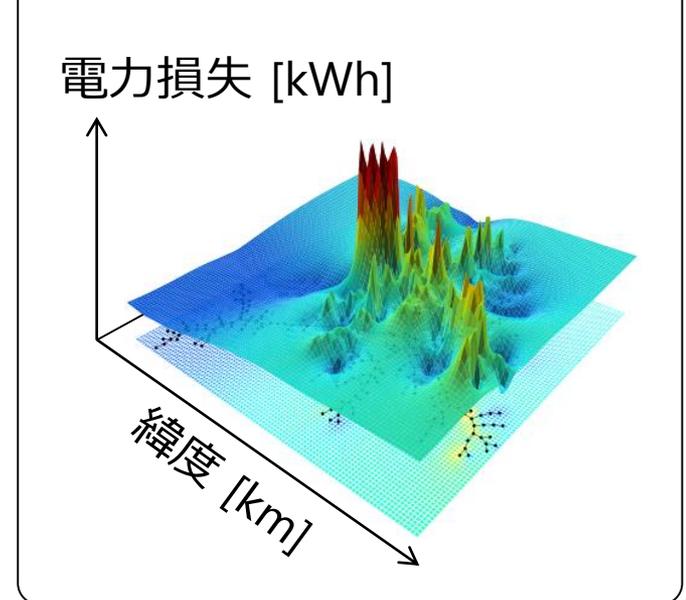
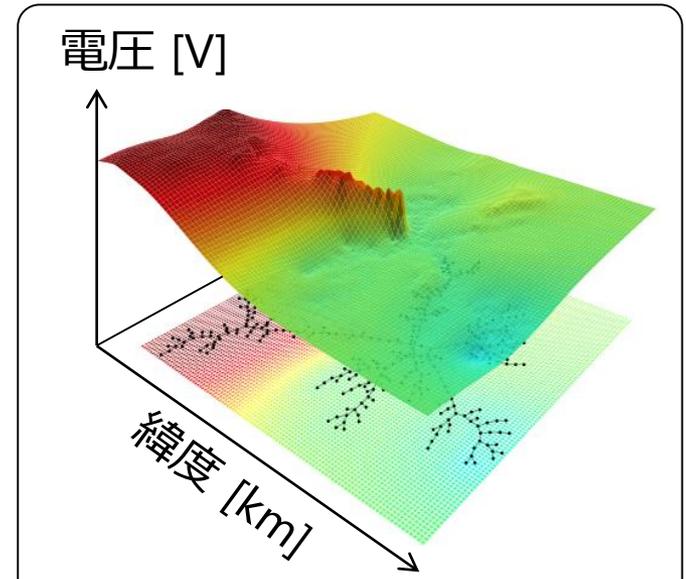


- ・電圧逸脱
  - ・配電損失
  - ・PV出力抑制量
  - ・CO2排出量
  - ・線路容量余裕量
  - ・需要家コスト
  - ・エネルギー自給率
- etc.

**評価**



## スマートシティの持続可能性評価指標



# 協調EMS評価のためのシミュレーションプラットフォームの構築

FSで構築 (GEMS+HEMSのみ)

最強チームで構築

		1配電線 モデル	1バンク モデル	1営業所 モデル
システム規模		約500軒	約3000軒	約63000軒
モデル構成図		<p>GEMS</p> <p>HEMS</p> <p>B/MEMS</p> <p>1配電線</p> <p>拡張</p> <p>6配電線</p> <p>拡張</p> <p>最強T Open CREST EMS Model</p> <p>123配電線 約400km<sup>2</sup></p> <p>1変電所モデル 18配電線 約9000軒</p>		
電圧制御	時間的	○	○	○
	面的	✖	△	○
開閉器制御 (配電損失最小構成)		✖	△	○
地域特性の反映 (人・EV・PVなど)		△	△	○

# 3 電力会社との協同による汎用的配電線モデルの構築

## 【123配電線モデル】

14600ノード, 7変電所, 123配電線,  
開閉器: 800, 総線路長: 755 km



【対象地域】: 東京都狛江市

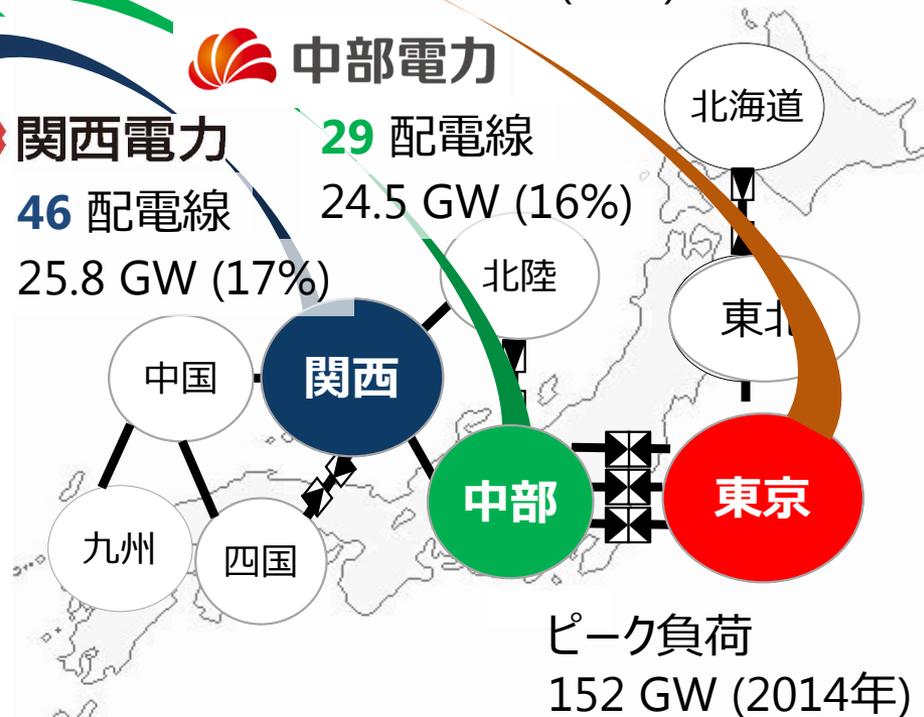
- $4.8 \times 5.5$  [km<sup>2</sup>]
- 18 配電線 (公開モデル使用)
- 住宅数: 10,546 軒
- PV 80%

**TEPCO** 48 配電線  
49.8 GW (32%)

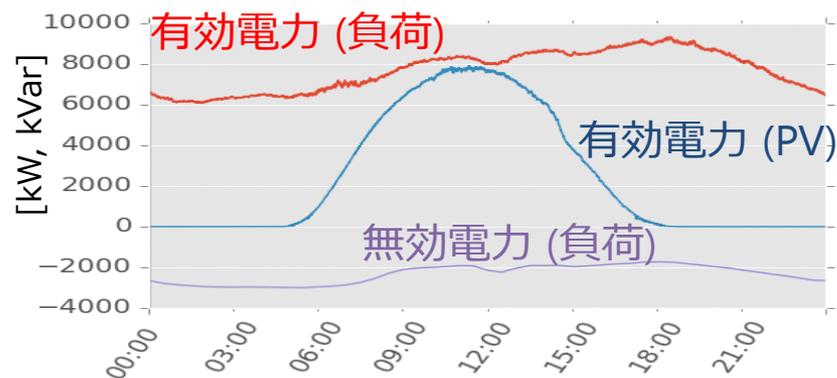
**中部電力**

29 配電線  
24.5 GW (16%)

46 配電線  
25.8 GW (17%)



ピーク負荷  
152 GW (2014年)



# 18配電システムモデル公開のプレスリリース (2017年10月11日)

データ提供実績：8件



WASEDA University



2017年10月11日

早稲田大学

科学技術振興機構 (JST)

## 早大、地域特性を都市規模で捉えた配電システムモデルを国内外で公開 東電PG・中電・関電が運用する実配電線データに基づきモデル構築

10月11日、早稲田大学スマート社会技術融合研究機構 (ACROSS) (機構長：林泰弘・はやし やすひろ・理工学術院教授) の研究グループは、東京電力パワーグリッド (以下、東京電力PG)、中部電力、関西電力が運用する実配電線データに基づき、地理情報を別途付与し、地域特性を都市規模で捉えた汎用的な配電システムモデルを構築し、国内外で公開しました。

近年、太陽光発電等の分散型電源の普及や、ディマンドレスポンスを含む需要制御など、需要家におけるエネルギーの消費形態が目まぐるしく変化しています。これまで各研究機関は独自の配電システムモデルを用いて開発技術の評価をしてきましたが、これらの単一の配電システムモデルは配電システム各所の設備等に関する情報量が乏しく、用途も限られていました。そのため、公平かつ定量的に比較、評価することのできる、実データに基づく汎用性の高い配電システムモデルの構築、公開が待たれていました。

今回、本研究グループは、電力各社の実配電線情報を基に、一般家庭、コンビニエンスストア、ビルなどで実測された電力消費データから、各需要家の建物用途・電力消費カーブを推定し、実地域を模擬するような配電システムモデルの構築に成功しました。また、配電システムに地理情報を付与したことにより、雲の移動に伴う日射情報変化や、電力負荷となる電気自動車の移動などを想定した解析が可能になり、太陽光発電等により生じる課題を時空間的、多面的に解析できるようになりました。

今回構築・公開した配電システムモデルは、エネルギー管理システム (EMS) を定量的に評価するための汎用的な計算シミュレーションプラットフォームとしての役割を果たします。本モデルを国内外に公開することで、各研究機関が需要家の実態に即した大規模 (都市規模) シミュレーションを同一条件で行うことが可能になります。

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業チーム型研究 (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」研究領域の一環で実施しました。

# シミュレーションモデル作成のプロセス

## 入力

### ネットワーク情報



広がり	平均、上下限
ブランチ	インピーダンス 距離
ノード	低圧集約 / 高圧負荷 容量 用途地域属性 対象期間 時間分解能 PV定格出力

### 地理情報

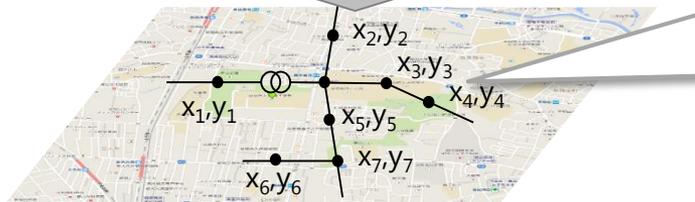
例：新宿区

### 対象地域

- 対象経緯度
- 用途地域
- 世帯数
- 地点別日射量情報 (中島T)
- 業態比率 (下田T)
- 世帯構成 (下田T)
- 建築物の性能 (林T:田辺)

## 出力

ノード経緯度  
ノード負荷・PV

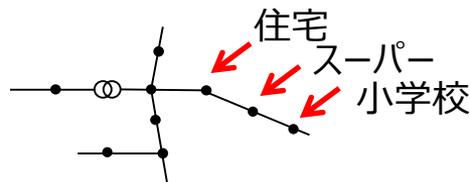


### 【Step1】 対象地域の 業態比率の決定



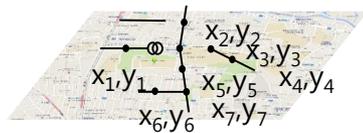
【家庭用(世帯構成)】	核家族 ○○%	【業務用】	小学校 ○○%
直径家族 XX%	複合家族 △△%	中学校 XX%	スーパー △△%
一人暮らし □□%		衣料品 □□%	

### 【Step2】 負荷ノードへの 業態の割り当て

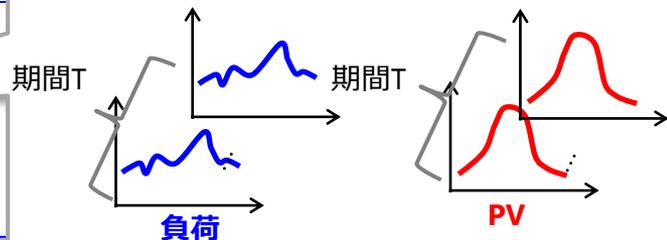
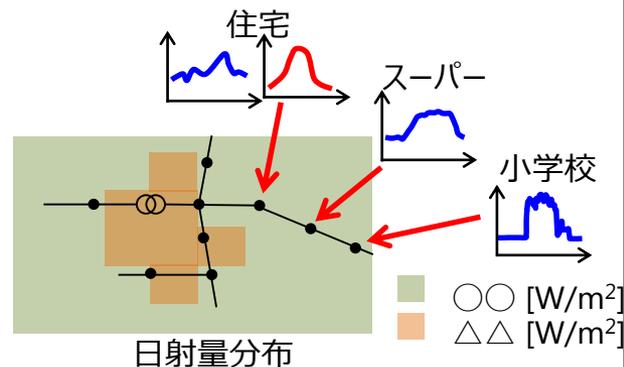


負荷容量等  
から想定

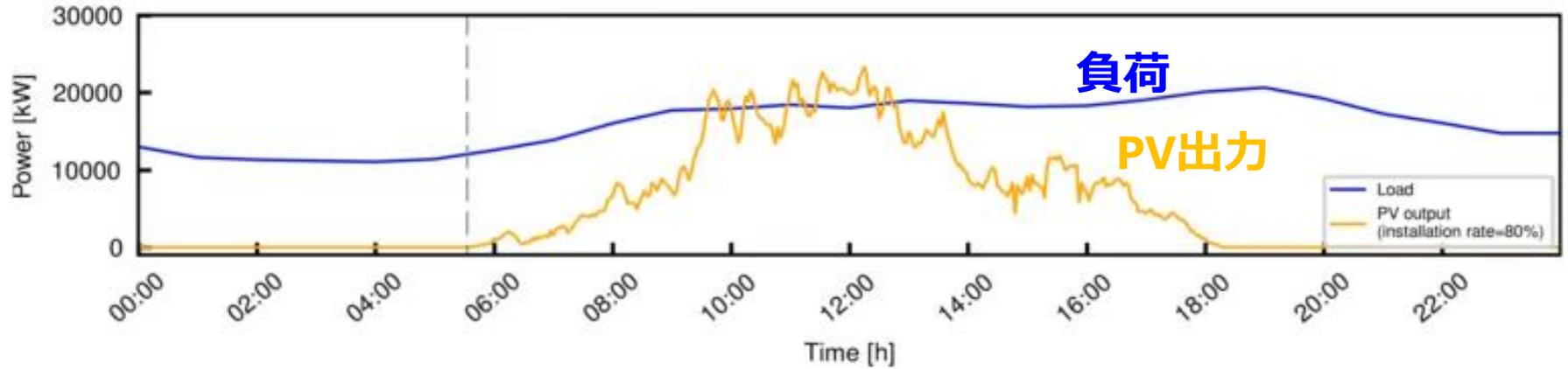
### 【Step3】 負荷ノードに 経緯度情報の割り当て 用途地域 (国土交通省) 世帯数 (総務省)



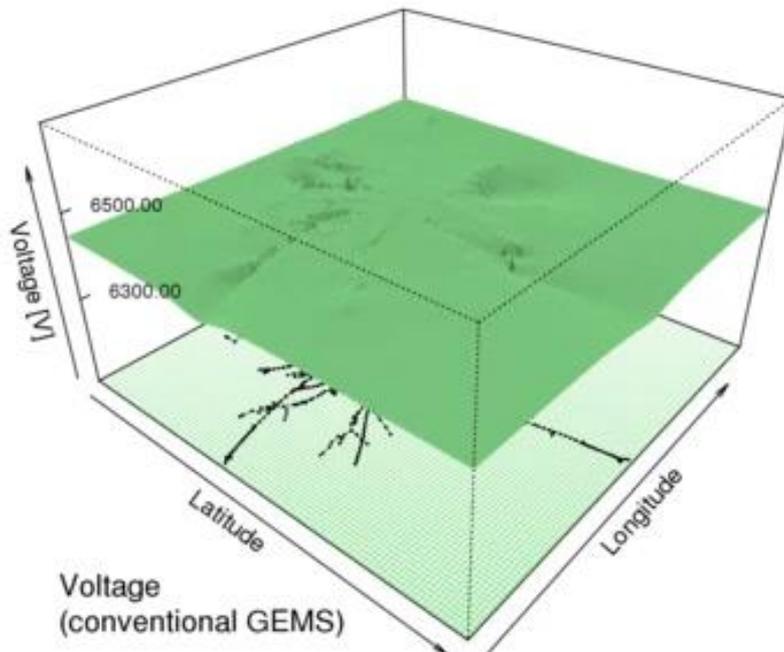
### 【Step4】 業態に基づく負荷生成 地点別日射量に基づくPV生成



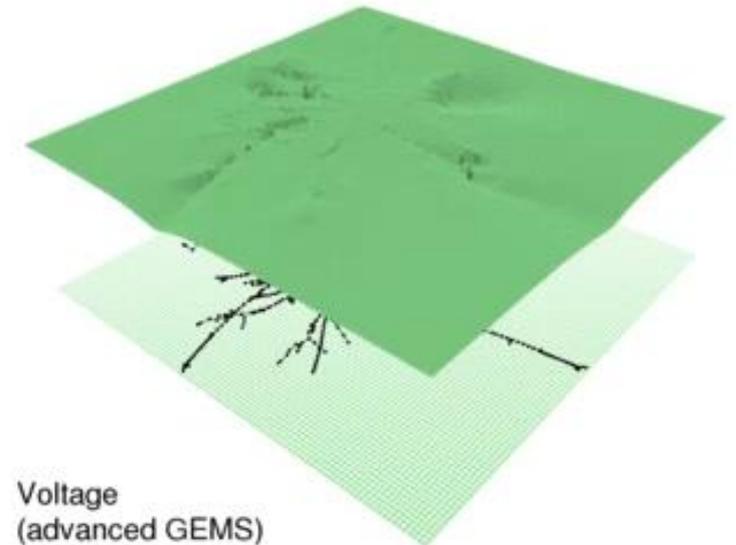
# 対象地域における出力抑制の評価結果 (PV導入80%)



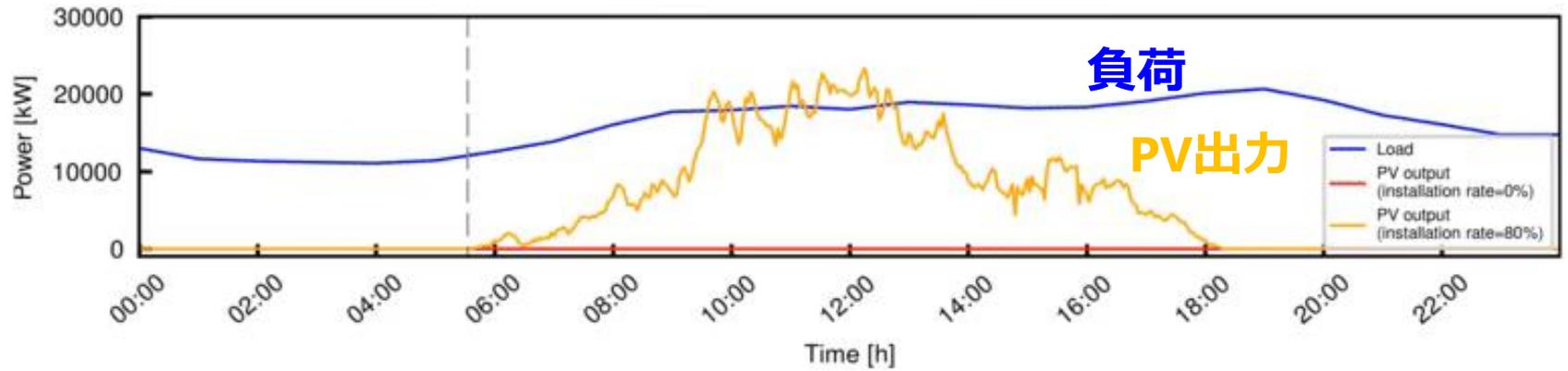
従来GEMS



開発GEMS

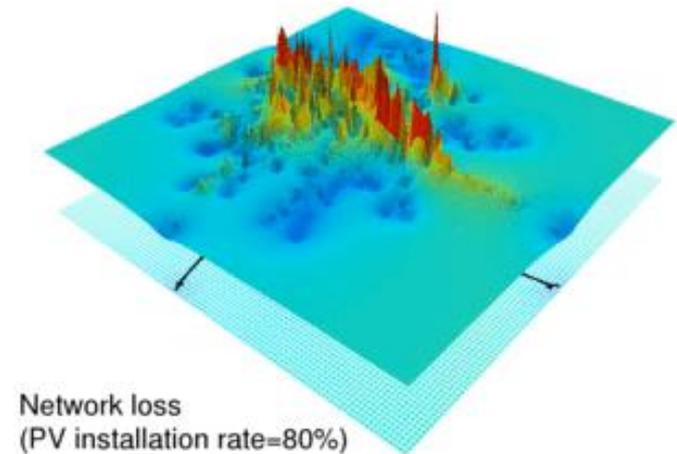
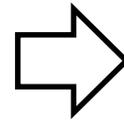
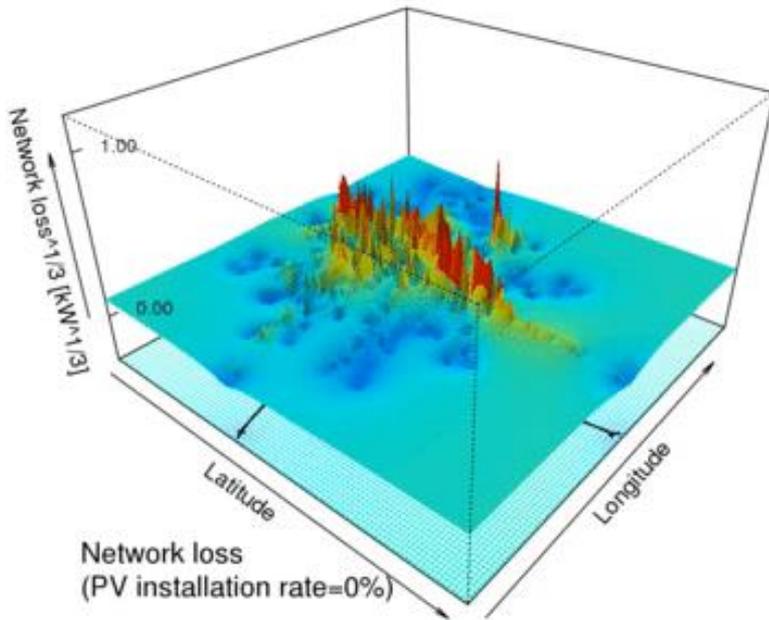


【対象地域】住宅 10,546 軒, PV80%, 18配電線



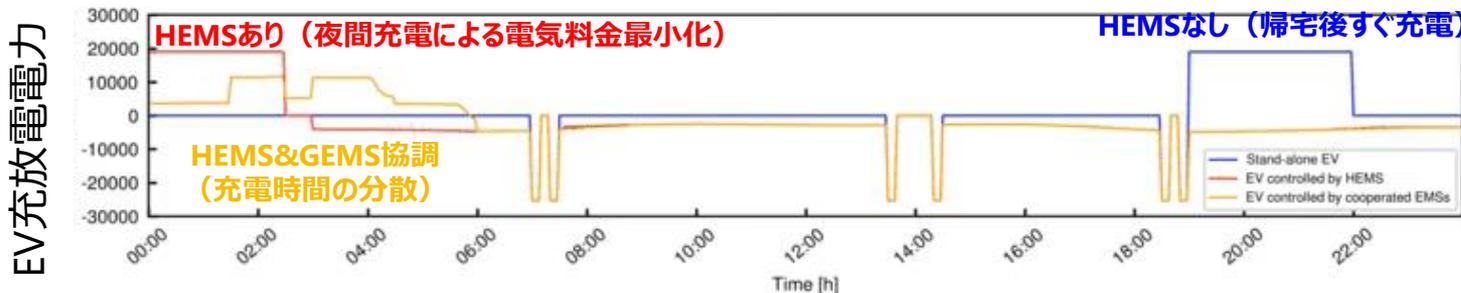
電力損失 (PV導入なし)

電力損失 (PV導入80%)



【対象地域】住宅 10,546 軒, PV80%, 18配電線

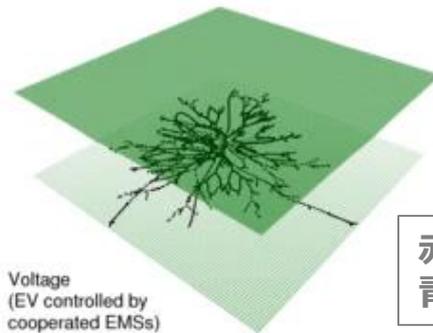
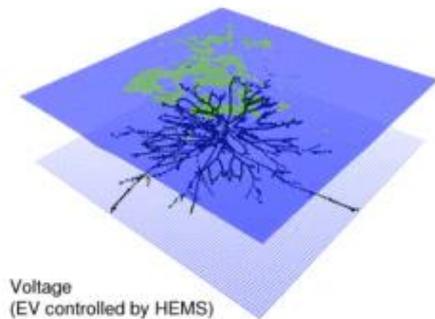
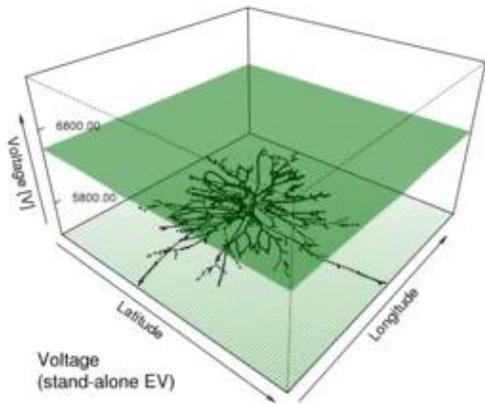
# EV普及による配電系統への影響評価 (PV導入80%, EV導入60%)



電圧(HEMSなし)

電圧(HEMSあり)

電圧(HEMS&GEMS協調)

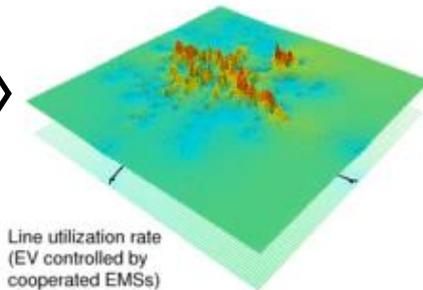
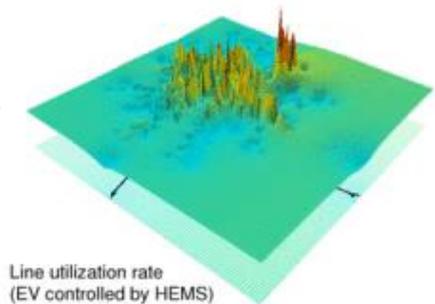
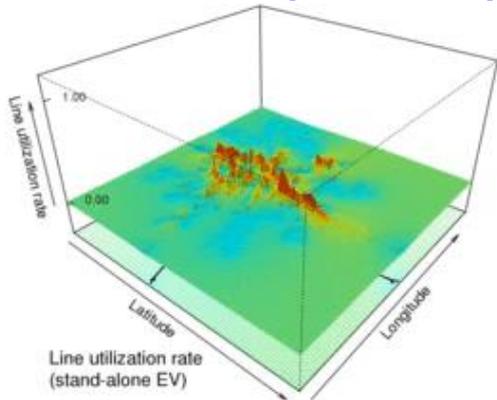


赤：上限逸脱  
青：下限逸脱

線路利用率(HEMSなし)

線路利用率(HEMSあり)

線路利用率(HEMS&GEMS協調)





# Proceedings of the IEEE, a special issue "Smart Cities"

## タイトル : Versatile Modeling Platform for Cooperative Energy Management Systems in Smart Cities

著者 : 早大, 阪大, 東電, 中電, 関電, テネシー大, ミュンヘン工科大

内容 : スマートシティにおける多様なEMSの方法論・データの利活用スキームの有用性を検証するためのシミュレーションプラットフォームを開発

Page 2 of 20

PROCEEDINGS OF THE IEEE

### Versatile Modeling Platform for Cooperative Energy Management Systems in Smart Cities

Yasuhiro Hayashi, Member, IEEE, Yu Fujimoto, Member, IEEE, Hideo Ishii, Member, IEEE, Yuji Takenobu, Student Member, IEEE, Hiroshi Kikusato, Student Member, IEEE, Shinya Yoshizawa, Member, IEEE, Yoshiharu Amano, Shin-ichi Tanabe, Yohei Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda, Jun Yoshinaga, Masato Watanabe, Shunsuke Sasaki, Takeshi Koike, Hans-Arno Jacobsen, Senior Member, IEEE, and Kevin Tomsovic, Fellow, IEEE

**Abstract**—With growing attention to sustainability and recognition of the impact of global warming problems, energy supply and consumption have become critically important. This paper presents the construction of a modeling platform accommodating cooperative energy management systems (EMS), which virtually produces the model of a smart city with a distribution network (DN) by using a wide range of data obtained from the real world. The platform involves models of various EMSs, governing the operation of a power system or controlling consumer-installed devices, and simulating the power flow, electrical losses, and voltage in the DN. In addition, indices measuring the sustainability of the model city, such as CO<sub>2</sub> emission, are estimated from scenarios, for example, photovoltaic system installation, electric vehicle penetration, etc. The results can be visually displayed and the platform is highly versatile and applicable to various types of issues associated with smart cities. Two case studies are presented in detail.

**Index Terms**—Smart city, smart grid, energy management system, modeling platform, PV/EV hosting capacity, CO<sub>2</sub> emission, energy self-sufficiency, power quality.

This work was supported by the JST CREST Grant Number JPMCR15K5. In addition, this work was supported in part by the IERC program of the US NSF and DOE agencies under NSF Award Number EEC-1041877.

Y. Hayashi and S. Yoshizawa are with the Department of Electrical Engineering and Bioscience, Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan (e-mail: hayashi@waseda.jp, syoshizawa@aoni.waseda.jp).

Y. Fujimoto and H. Ishii are with the Advanced Collaborative Research Organization for Smart Society, Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan (e-mail: yfujimoto@aoni.waseda.jp, hidashi@aoni.waseda.jp).

Y. Takenobu and H. Kikusato are with the Graduate School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan (e-mail: yotakenobu@akatsuki.waseda.jp, hiroshi.kikusato@akatsuki.waseda.jp).

Y. Amano is with the Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan (e-mail: yoshina@waseda.jp).

S. Tanabe is with the Graduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University, Tokyo 169-8555, Japan (e-mail: taanabe@waseda.jp).

Y. Yamaguchi and Y. Shimoda are with the Department of Sustainable Energy and Environmental Engineering, Osaka University, Osaka 565-0872, Japan (e-mail: yoshiyuki@eng.osaka-u.ac.jp, shimoda@eng.osaka-u.ac.jp).

J. Yoshinaga and M. Watanabe are with the TEPCO Power Grid, Inc., Tokyo 230-8511, Japan (e-mail: yoshinaga.jun@tepcoco.jp, m.watanabe@tepcoco.jp).

S. Sasaki is with the Chubu Electric Power Company, Inc., Aichi 464-8600, Japan (e-mail: Sasaki.Shunsuke@chuden.co.jp).

T. Koike is with the Denso Corporation, Inc., Osaka 530-8270, Japan (e-mail: tsuka.takeshi@denso.com).

H.-A. Jacobsen is with the Department of Computer Science, Technical University of Munich, Munich 85748, Germany (e-mail: jacobe@in.tum.de).

K. Tomsovic is with the Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Tennessee, Knoxville, TN37996, USA (e-mail: tomsovic@utk.edu).

PROCEEDINGS OF THE IEEE

Page 8 of 20

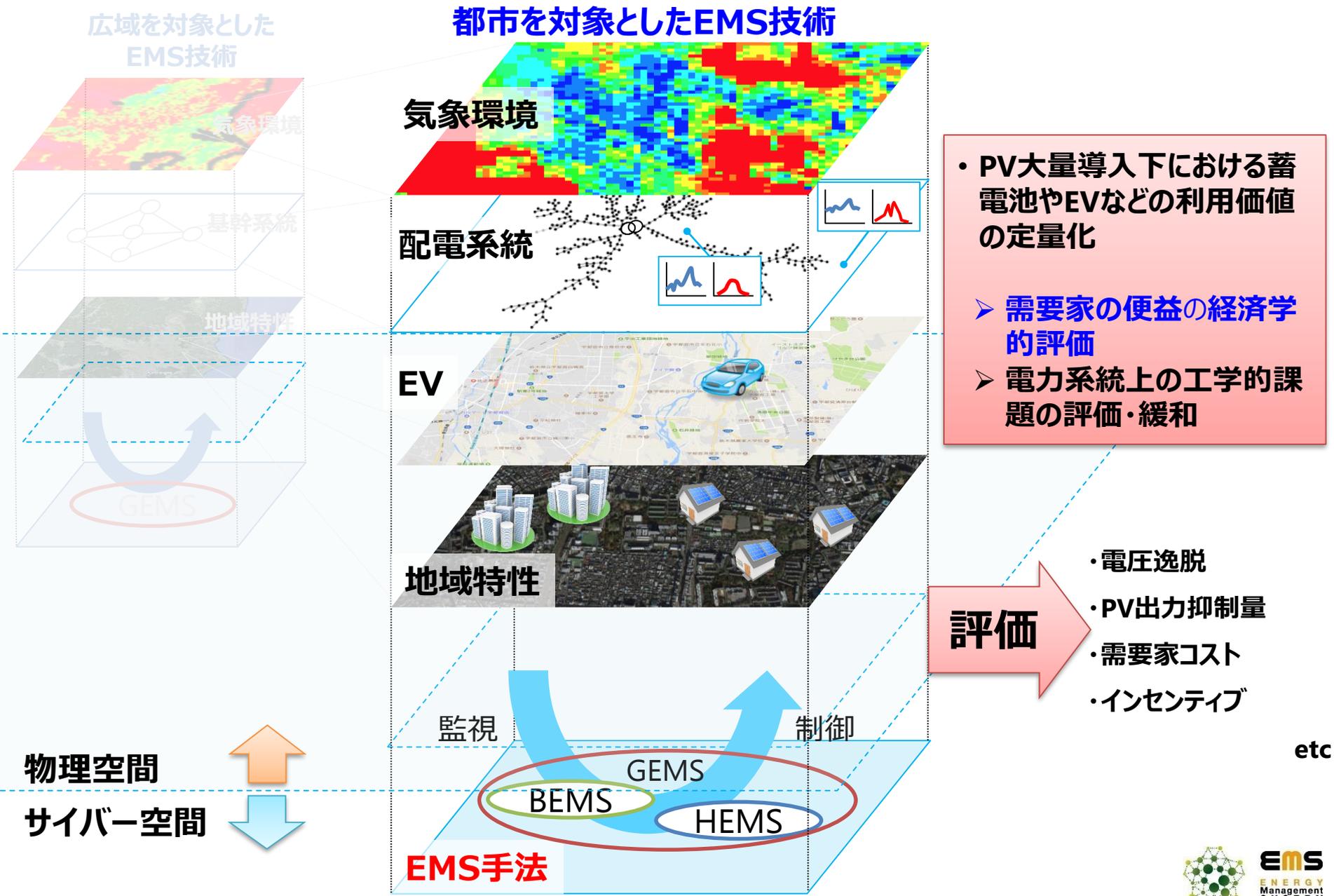
PROCEEDINGS OF THE IEEE

Fig. 2. Electricity consumptions of the model city; (a) the ratio of electricity consumption types, and (b) illustration of the daily electricity consumption profile.

Fig. 3. Snapshot of the constructed EMS platform used in our evaluation. The DN model is mapped onto the target district, and various consumers are allocated on the nodes by reflecting characteristics of the target city. Spatiotemporal information collected in the physical world is provided to the simulated physical system. In this figure, solar radiation data collected through a meteorological satellite is shown in the upper plane. By allocating demand-side energy appliances (PVs, EVs, and other energy appliances) and various supply-side devices (SVRs, voltage sensors, and other control devices), the spatiotemporal dynamics of power quality in the city is derived. In this figure, voltage information reflecting reverse power flow from the distributed residential PVs corresponding to the current solar radiation is shown in the lower plane. Temporal transition of spatial information is visualized by operating the slide bar in the graphical user interface and the time series behavior at each point can be visualized as a graph. We have included a supplementary MOV file according to EMS platform visualized by using Google Earth. This is available at <http://ieeexplore.ieee.org>.

PROCEEDINGS OF THE IEEE

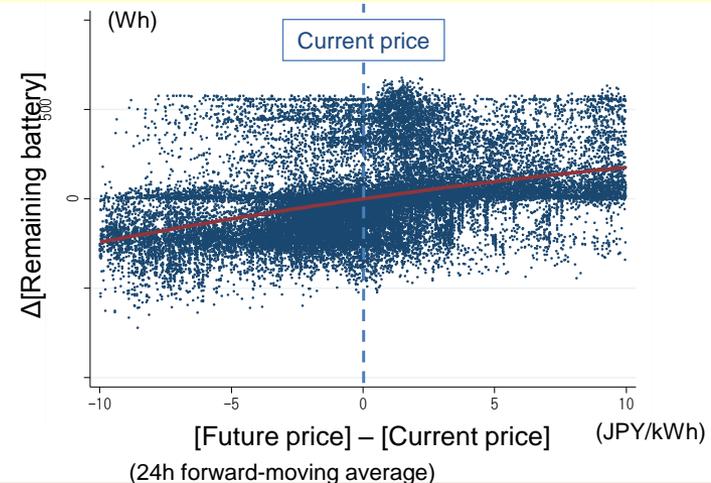
# 東大 大橋SGの主な研究対象



# 東大 大橋SGの代表的な研究成果

- デマンドレスポンスについて、家庭用電力需要家を対象に使用電力量および蓄電池利用の意思決定を捉える経済モデルを構築
- 電力単価の事前通知について経済的インパクトを定量的に評価

- 家計別・時間帯別のデータから、電力単価と電力利用の関係を仔細に分析。
- 動学的な要素を考慮し、需要家が将来の電力単価をどのように予想しているかを識別。
- 将来の電力単価が蓄電池の利用に与える影響を定量化。



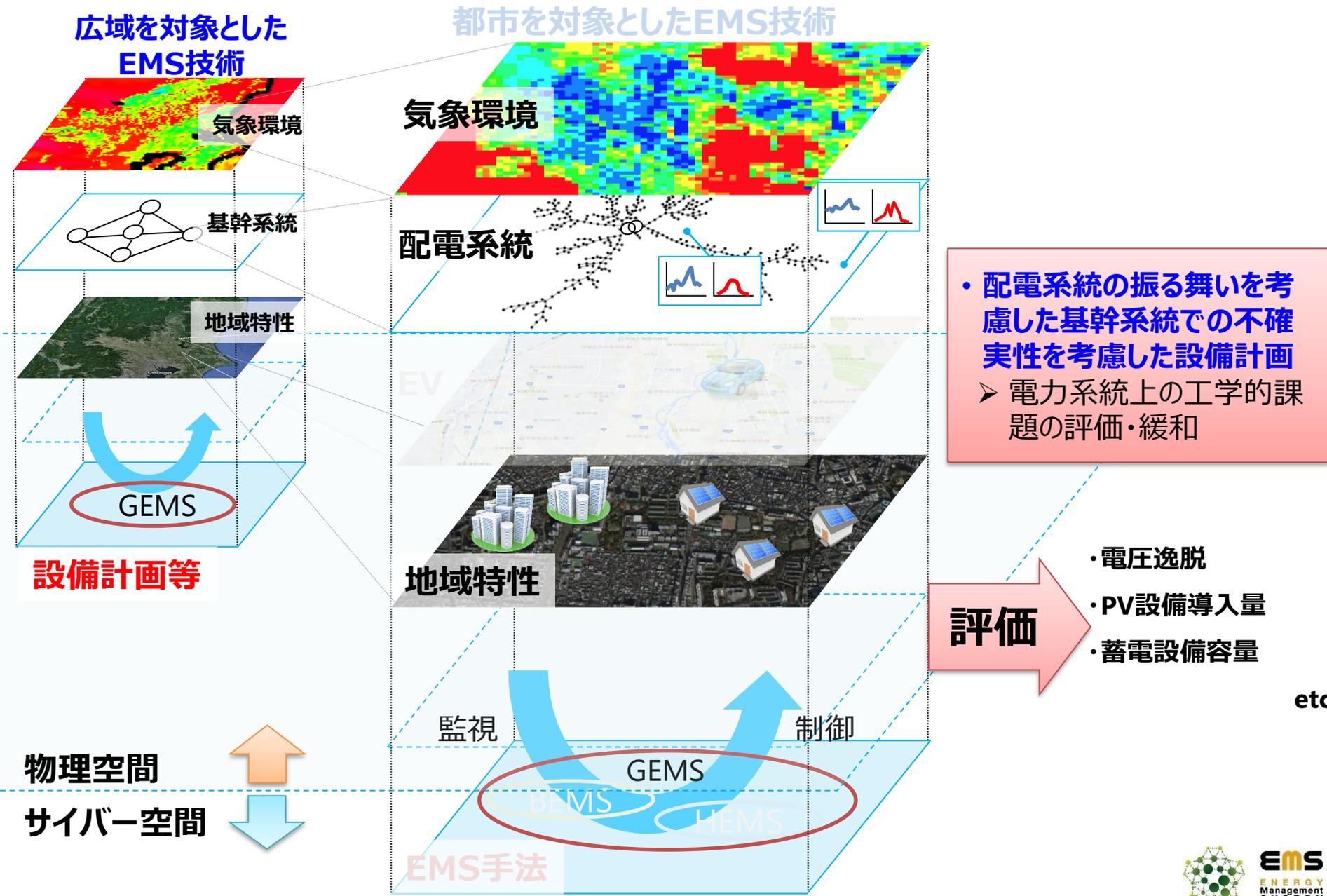
- 構築したモデルを用いて需要家が電力料金型デマンドレスポンスから得られる便益の定量化が可能に。
- 電力単価の事前通知やADRの普及が与えるインパクトについて検討。
  - 1日前の事前通知によって需要家の電力料金が平均800(円/月)程度抑制。

$$\begin{aligned}
 & V_t(k_{it}, P_{it}, z_{it}, \varepsilon_{it}; \theta) \quad \text{/'s utility from his/her electricity consumption} \\
 & = \max_{c_{it}, s_{it}} \{u(c_{it}, z_{it}, \varepsilon_{it}; \theta)\} - p_t(c_{it} + s_{it} - e_{it}) \quad \text{Price} \\
 & \quad + EV_{t+1}(k_{it+1}, P_{it+1}, z_{it+1}, \varepsilon_{it+1}; \theta). \quad \text{PV power generation} \\
 \text{s.t.} \quad & \text{Remaining battery charge} \quad k_{it+1} = k_{it} + \delta s_{it} \quad (= 0.88) \quad \text{Charge efficiency} \\
 & \quad s_{it} \leq e_{it} - c_{it}, \quad 0 \leq k_{it+1} \leq K \quad \text{Battery capacity (=5,000Wh)}
 \end{aligned}$$

	Electricity consumption (kWh/month)	Electricity bill (JPY/month)
Without advance notice	608 (112)	6,355 (2,451)
With advance notice (observable for a day ahead)	606 (219)	5,540 (2,959)

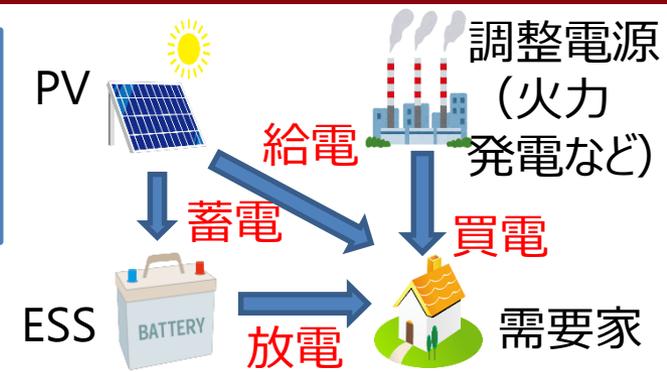
- Isogawa, D. and H. Ohashi “Economic Analysis on Price-Based DR Programs on Residential Customers”, 2017 JST-NSF-RCN Workshop on Distributed Energy Management Systems, 2017.
- Isogawa, D. and H. Ohashi “Effects of Dynamic Electricity Pricing on Residential Customers”, 7th Asia-Pacific Innovation Conference, 2016.

# 慶大 大森SGの主な研究対象



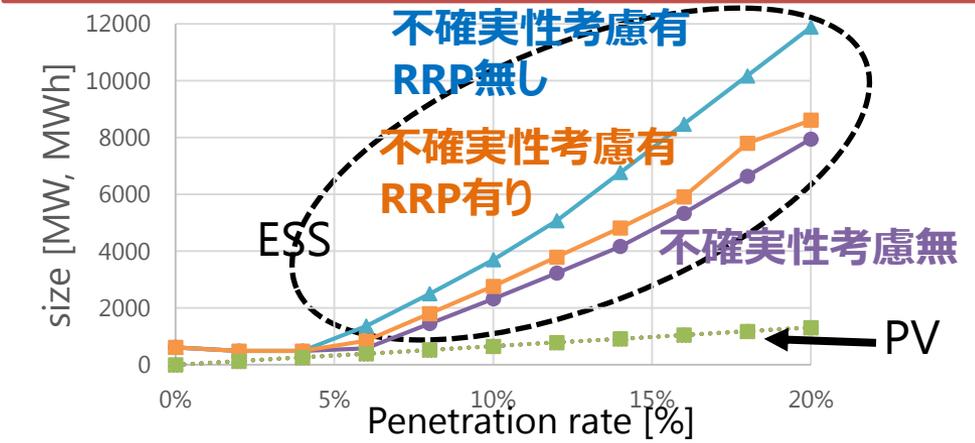
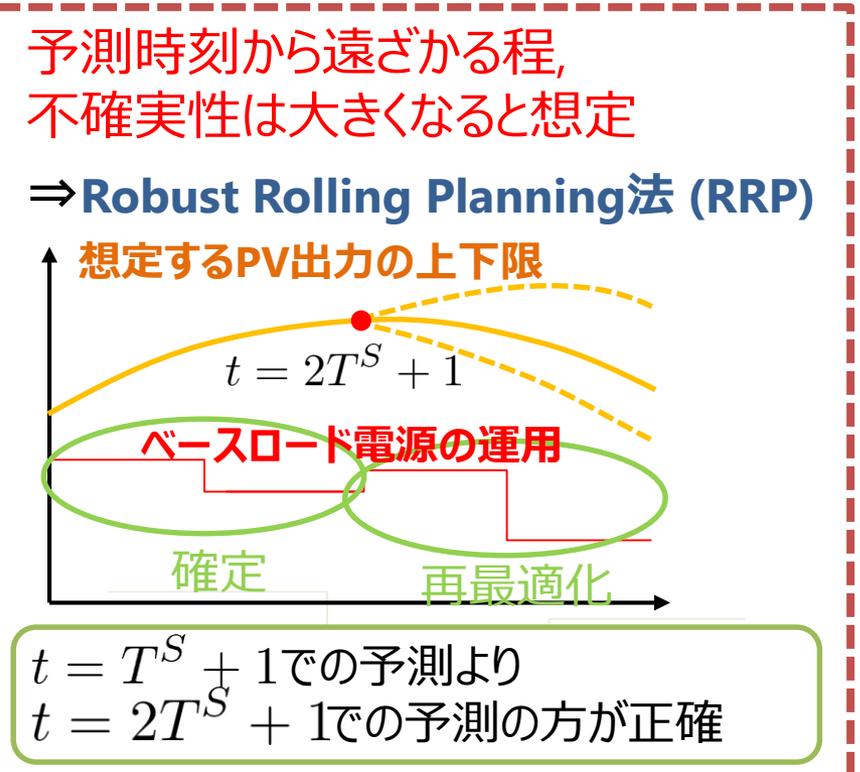
# 慶大 大森SGの代表的な研究成果

エネルギーシステムのコストを最小にするようなPVとESSの導入量を決定する問題に対し、PV出力の不確実性の考慮したRRP法を提案

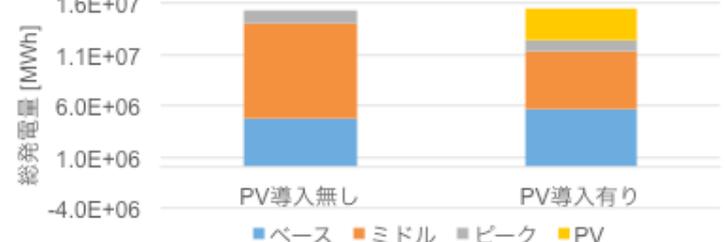


PV出力は天候・気温により変動  
 → PV出力の不確実性の考慮するため、**ロバスト最適化**の適用

総需要に対する目標供給量の割合 (Penetration rate) に対するPV・ESSの最適導入量



PV導入無とPenetration rate=20% (PV導入有)で各電源の総発電量を比較



松永, 小西, 高橋, 武田, "ベースロード電源の負荷追従運転を考慮した再生可能エネルギーのロバスト設備投資 計画問題", 第58回自動制御連合講演会, 2015/11/14.

# EMS実験プラットフォーム

# EMS実験プラットフォーム (EMS新宿実証センター)



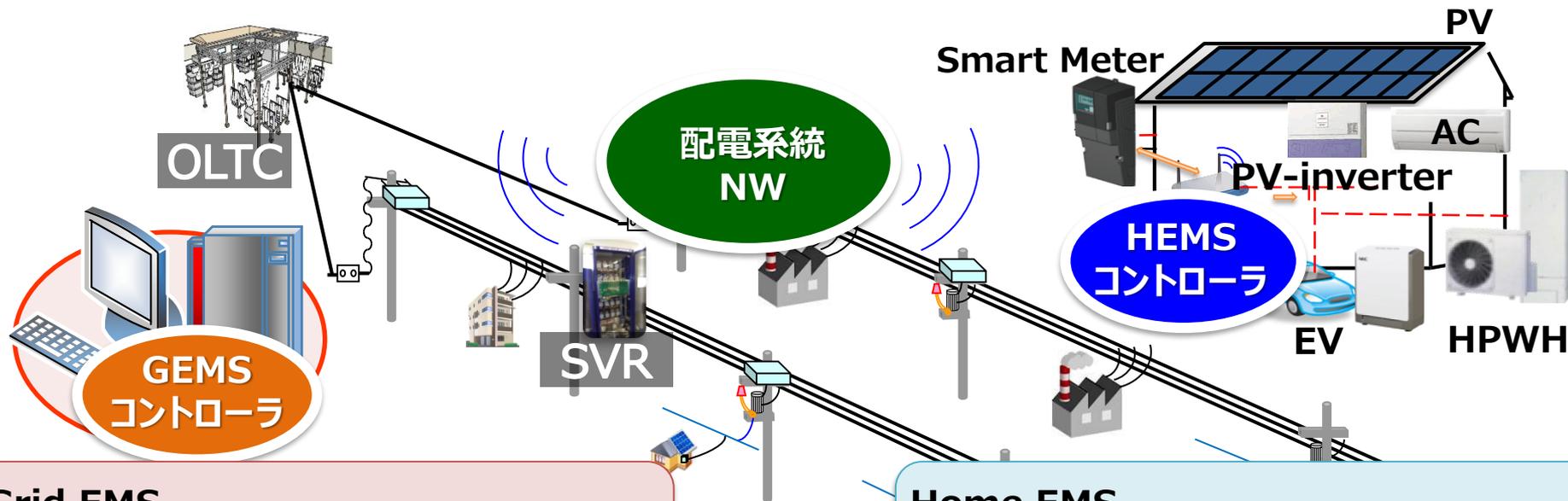
**Distribution NW  
R&D platform**



**Total system design  
R&D platform**



**Smart home  
R&D platform**



## Grid EMS

⇒ 配電系統の電圧逸脱量・電圧制御機器のタップ動作回数最小化のための制御手法

## Home EMS

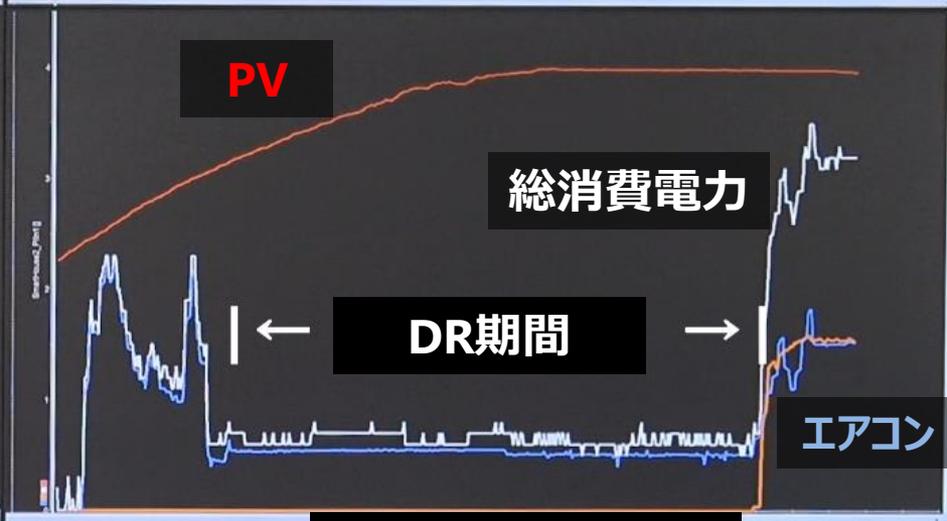
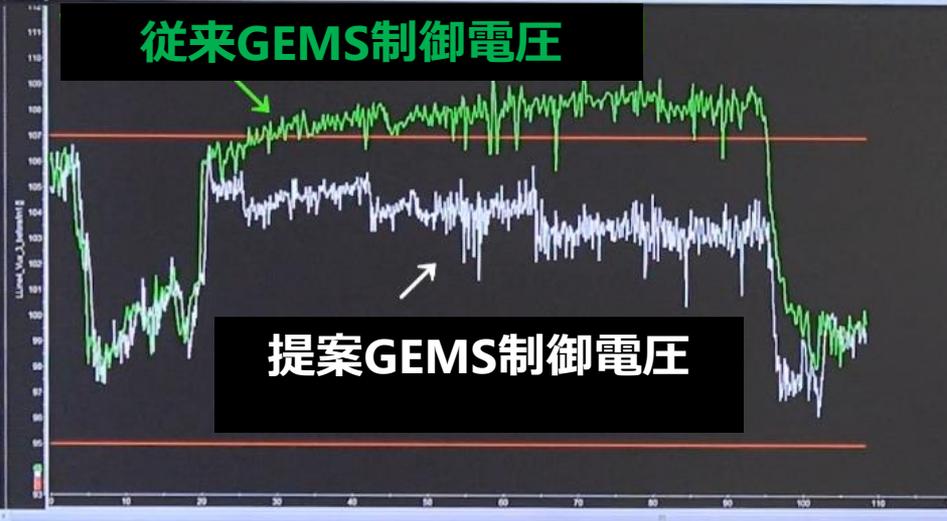
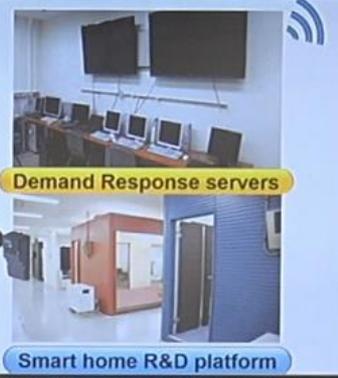
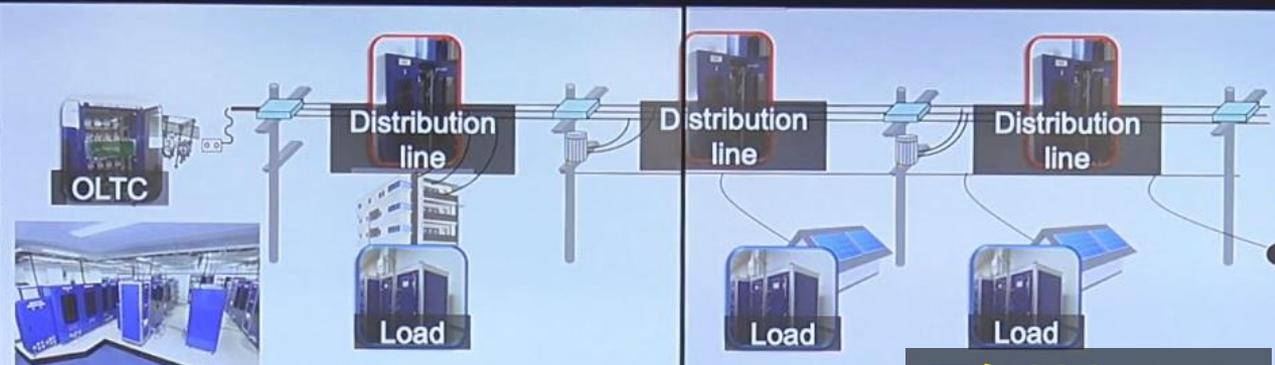
⇒ 需要家の熱的快適性の維持，電気コスト最小化を可能にする宅内負荷自動制御

# EMS実験プラットフォームを用いたHEMS・GEMS制御結果

Waseda University

simState  
Stop  
Pause  
Run

currentTime  
110.7



ヒートポンプ給湯器

# リアル・バーチャルの協調シミュレーションシステムの開発 (EMS実験PF)

従来：  
EMS実効値解析 + 実機実効値実験



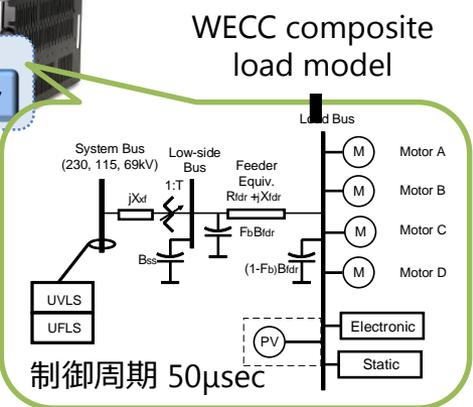
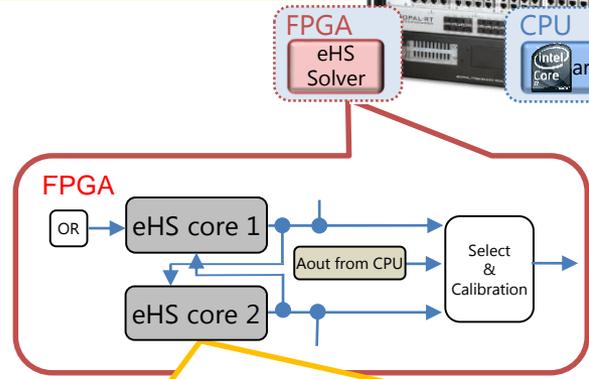
今後：  
瞬時値解析 + 実機瞬時値実験  
(UTK・NSF CURENTとの国際連携研究活用)

リアルタイム・シミュレーションを行うことが可能な開発用シミュレータを使用し、  
バーチャル・リアルの混合システムシミュレーションの実現を目指す

## バーチャルな世界 (瞬時値解析)

リアルタイムシミュレータ  
RT-LAB  
(2017年導入)

RCP/HIL FPGA-Based  
Real-Time Simulator



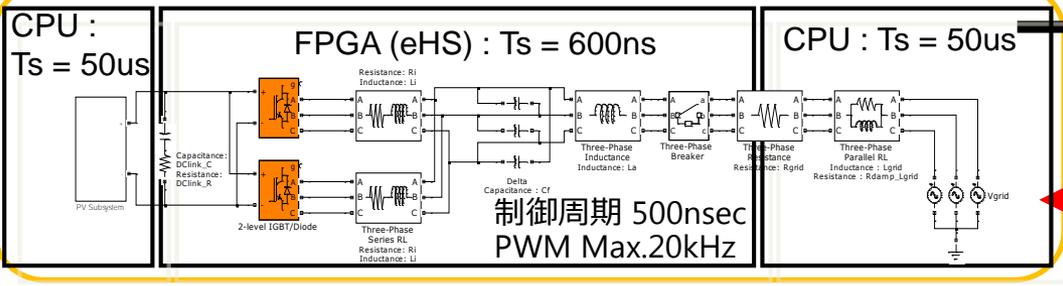
## リアルな世界 (配電系統電圧解析)

高速電子負荷装置  
Triphase Power Module  
(2018年2月導入)



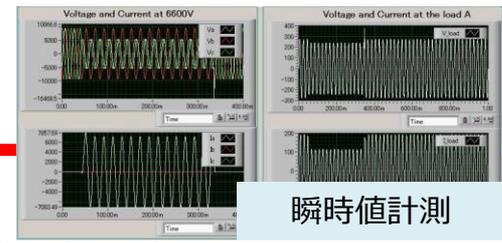
配電系統模擬シミュレータ  
ANSWER

精密電力増幅器  
(2018年2月導入)



瞬時値

瞬時値

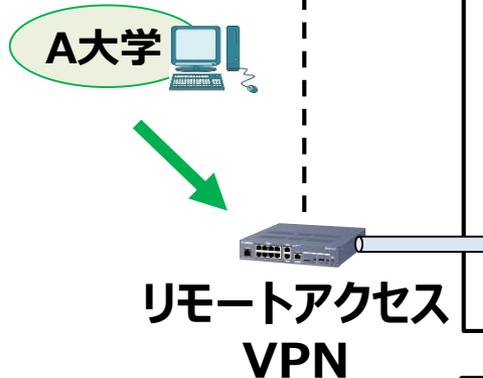


瞬時値計測

# リモートテストベッドの構築

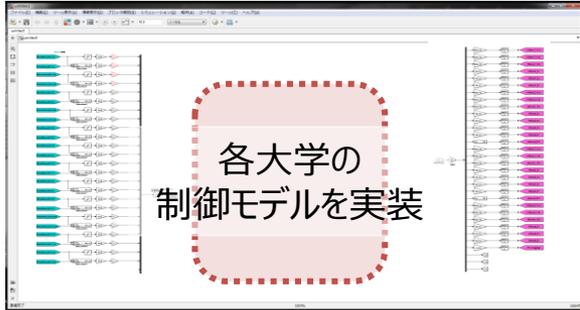
## ■ 電気実験の安全性を考慮したリモートテストベッドを構築

- 他大学・研究所：各種制御モデル作成，使用データの用意
- 早大：ANSWERを用いた電気実験を代理実施

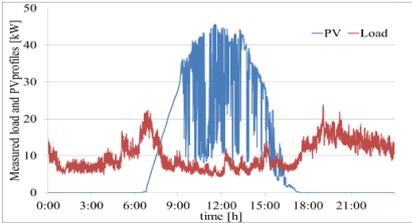


### 早大：セキュアストレージ（大学ごとに分離して用意）

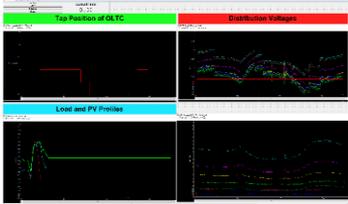
- ANSWERシステムデータ（トポロジー，機器仕様）の公開
- MATLAB/Simulinkベースの共通IFに各種モデルを実装



各大学の  
制御モデルを実装



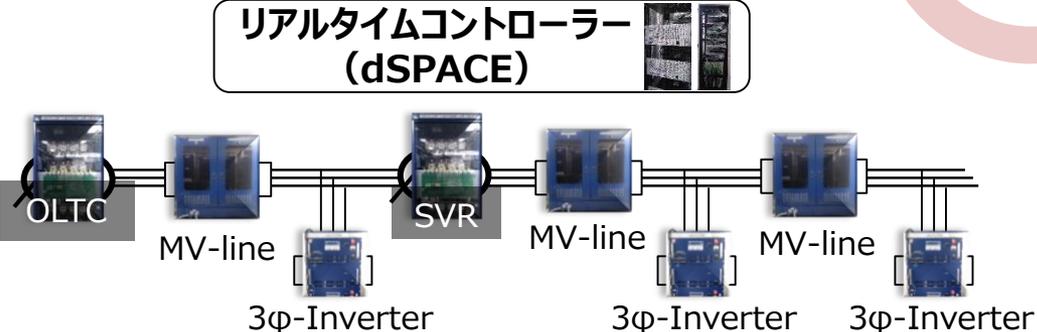
負荷・PVデータ等



制御結果等の保存

### 早大：ANSWER実験（代理実験）

リアルタイムコントローラー  
(dSPACE)



OLTC

MV-line

3φ-Inverter

SVR

MV-line

3φ-Inverter

MV-line

3φ-Inverter




# 国際連携研究成果

# 国際連携研究（早大-UTK・NSF CURENT）：概要

NSF/DOE  
CURENT



送電系統  
モデリング，解析

## 目的

- 送配電系統統合モデルの構築
- 送配電系統統合モデルを用いたCo-simulation

JST  
CREST EMS



配電系統  
モデリング，解析



## ハードウェアテストベッド

- 送電系統における動特性解析



## G/HEMS プラットフォーム

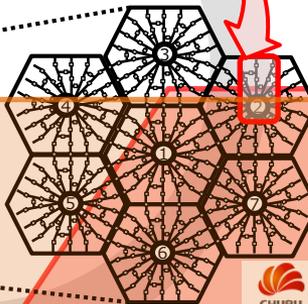
- 配電系統電圧制御（400V/100V）
- 計測値サンプリング：1kHz



## 大規模送電系統モデル

(WECC model)

- 送電系統における事故時の動特性解析
- 監視，モデリング，運用計画，制御



## 大規模配電系統モデル

(Japan model)

- 電圧解析，配電損失最小化
- 監視，モデリング，運用計画，制御



## 大規模送配電系統統合モデル

# 国際連携研究（早大-UTK・NSF CURENT）：研究テーマ

## Topic 1

評価：送配電系統の電圧  
 制御機器：**タップ制御機器**  
 （配電系統，離散的，遅い）

## Topic 2

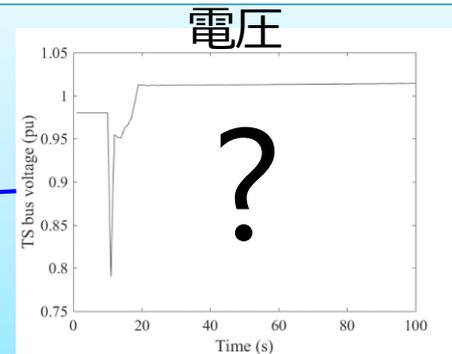
評価：送配電系統の電圧  
 制御機器：**スマートインバータ**  
 （配電系統，連続的，速い）

### 送電系統



事故発生

V (電圧)  
f (周波数)



### 配電系統

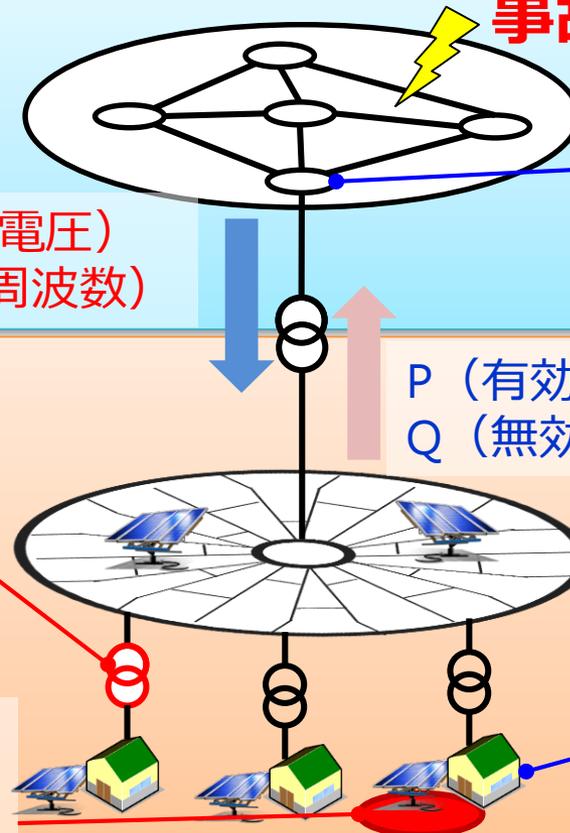
#### Topic 1 : タップ制御機器

- LRT
- SVR
- LVR

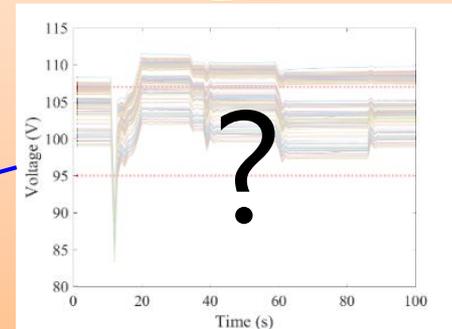
#### Topic 2 : スマートインバータ

- Volt-Var
- Volt-Watt
- Frequency-Watt

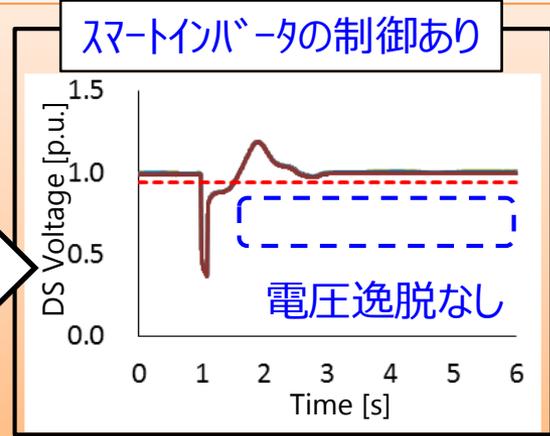
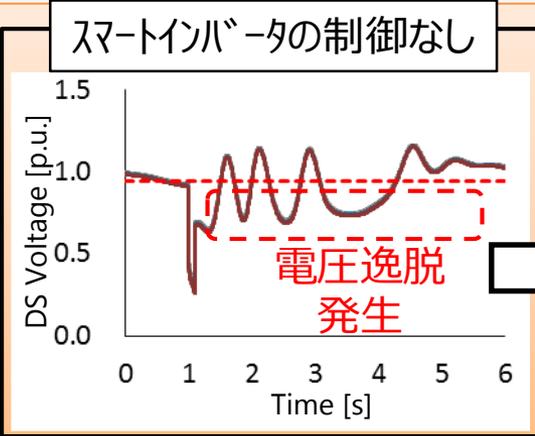
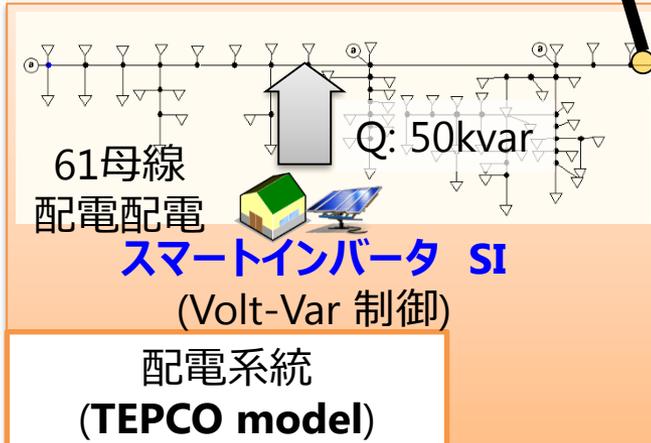
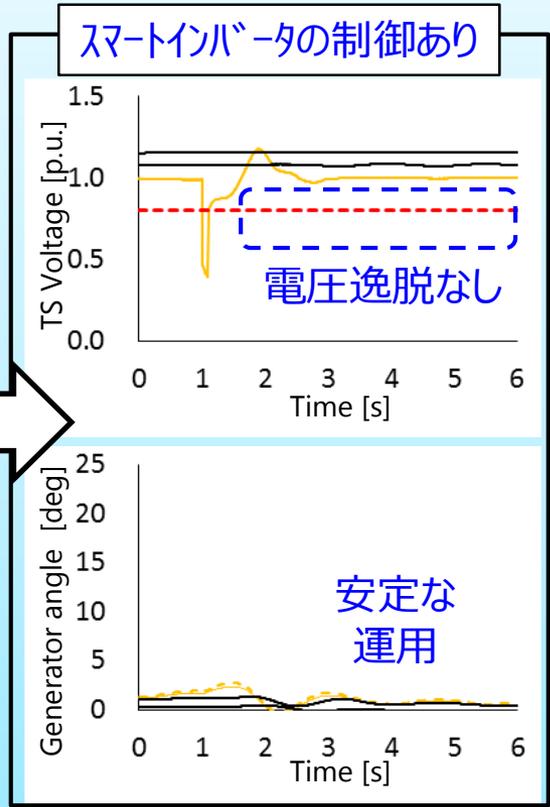
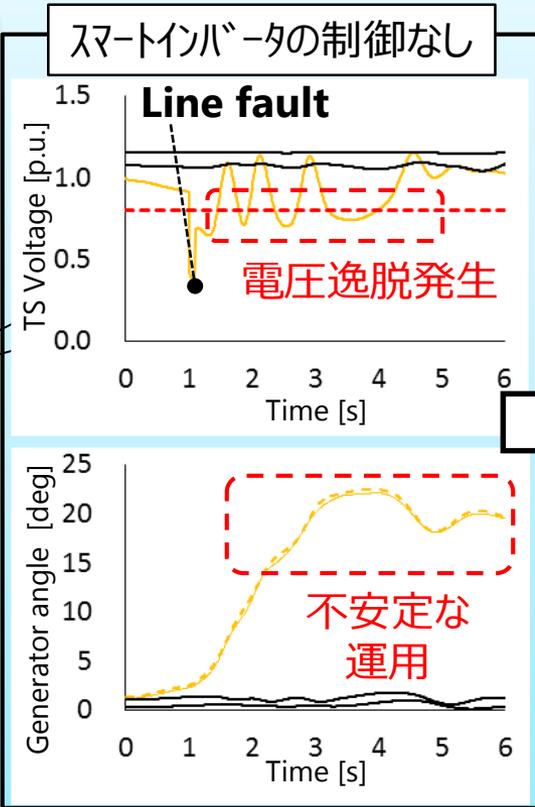
P (有効電力)  
Q (無効電力)



電圧



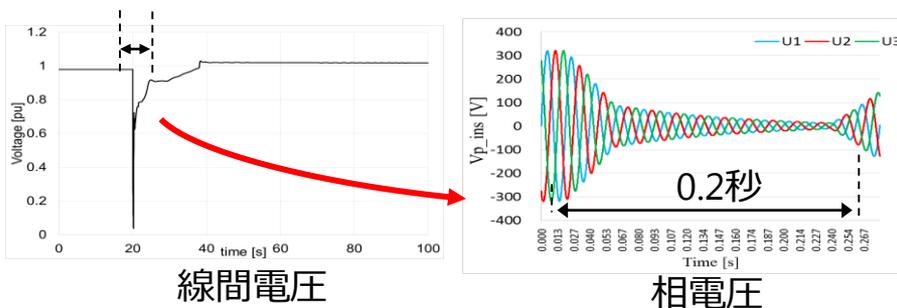
# Topic2 : 送配電系統統合モデルにおけるスマートインバータの動的電圧制御



# 今後の国際連携研究計画 (早大-UTK・NSF CURENT)

## 送電母線電力模擬

- 三相54kVAの電源環境シミュレータ
- 最大**500Hzサンプリング**の電圧降下発生可能

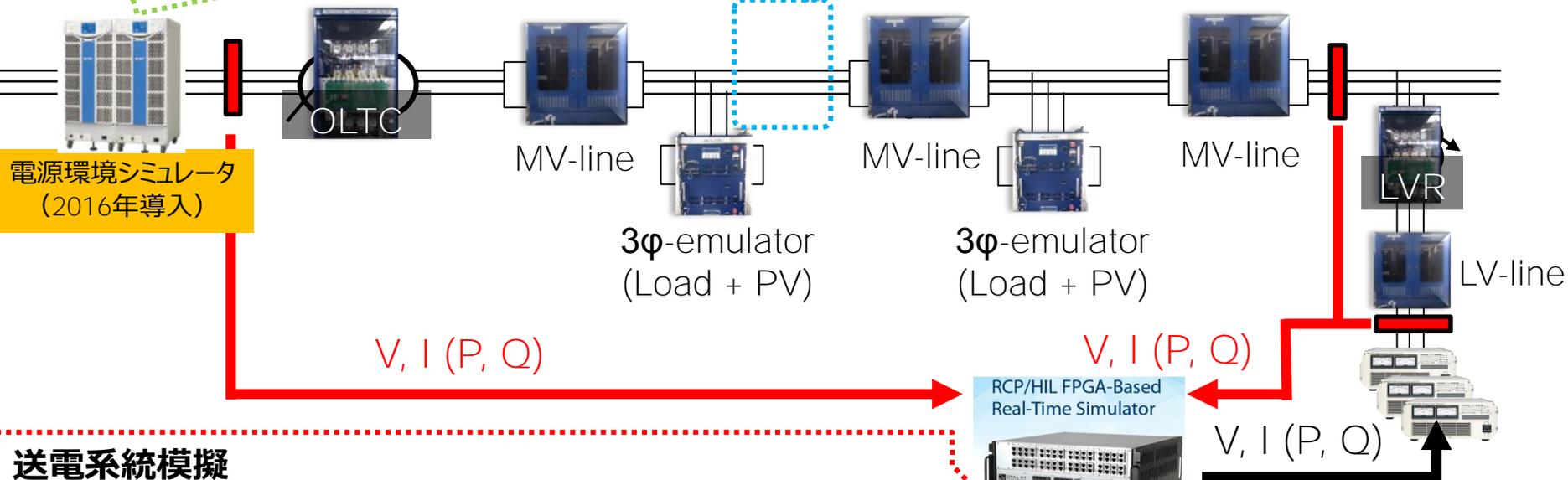
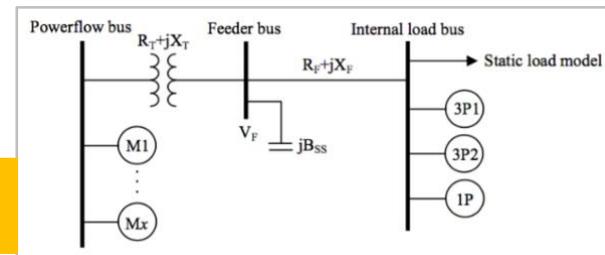


## 瞬時解析用・配電負荷模擬

- 单相/三相 15kWV AC/DC の高速電子負荷装置
- 応答速度 : < **0.5ms (2kHz サンプリング)**
- WECC composite load model** の実装

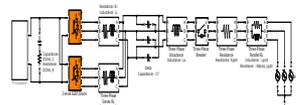


高速電子負荷装置  
(2018年2月導入)



## 送電系統模擬

- 瞬時値計測 (三相電圧・電流, **最大3kHzサンプリング**)
- HIL(Hardware-In-the-Loop-Simulation) を活用した実験環境の構築



リアルタイムシミュレータ  
RT-LAB  
(2017年導入)

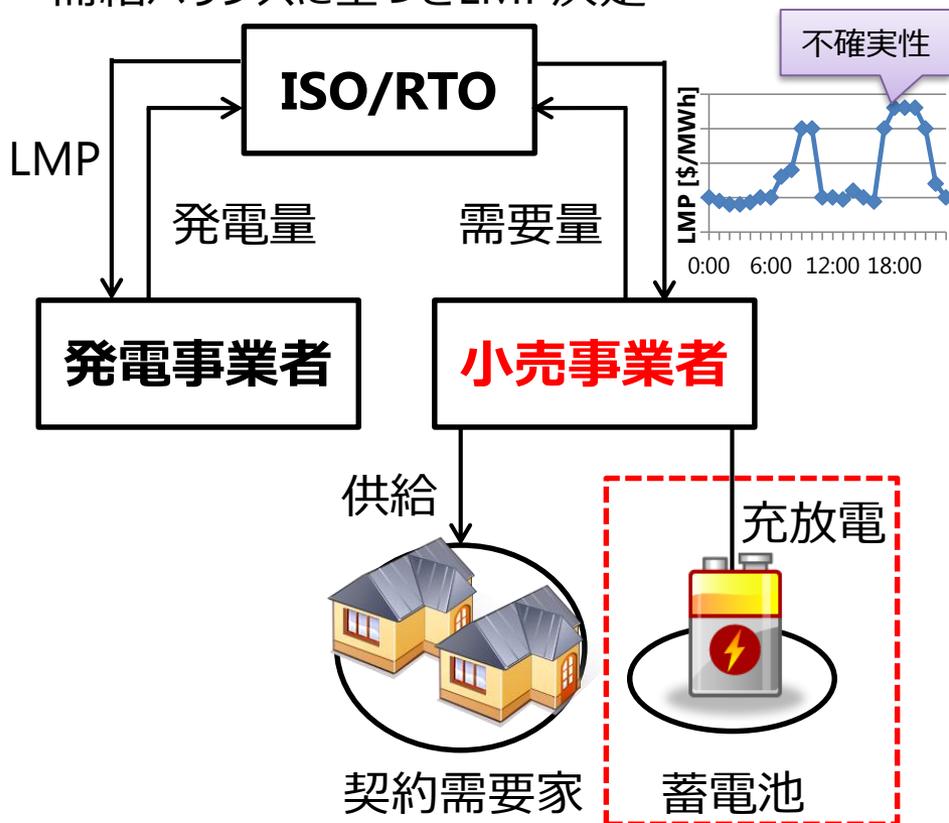
精密電力増幅器  
(2018年2月導入)

# 国際連携研究（慶大-UTK・NSF CURENT）

- 電力市場における小売事業者の利益最大化を達成するための蓄電池の導入・運用戦略の提案を目指し、テネシー大学の李グループとの国際連携を実施

## ■ 問題設定：米国電力市場

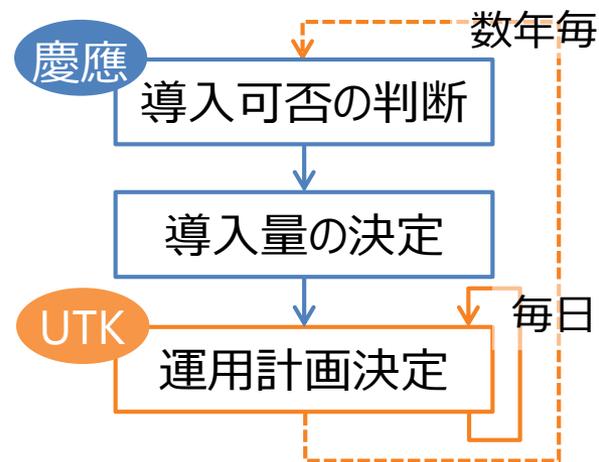
需給バランスに基づきLMP決定



小売事業者が自由に運用可

## ■ 国際連携内容

- LMPや蓄電池価格を踏まえた採算性の有無を評価するための小売事業者向けガイドラインの作成
- 利益を最大化する導入量の決定
- LMPの不確実性を考慮し導入した蓄電池の充放電量の決定



# 国際連携研究（早大-TUM）：概要



Prof. Hans-Arno Jacobsen



## エネルギーインフォマティクス

- 太陽光発電予測
- 風力発電
- 電力需要予測
- EV充電管理
- 配電系統地図

## 目的

- エネルギーマネジメント実施結果に基づく電力需要予測の開発
- 最適DER統合スキームの開発

JST  
CREST EMS



## エネルギー統計学

- 太陽光発電予測
- 電力需要予測

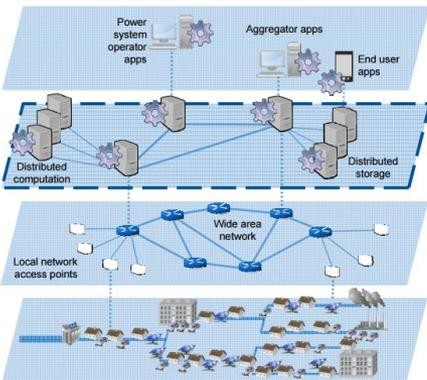


早稲田大学

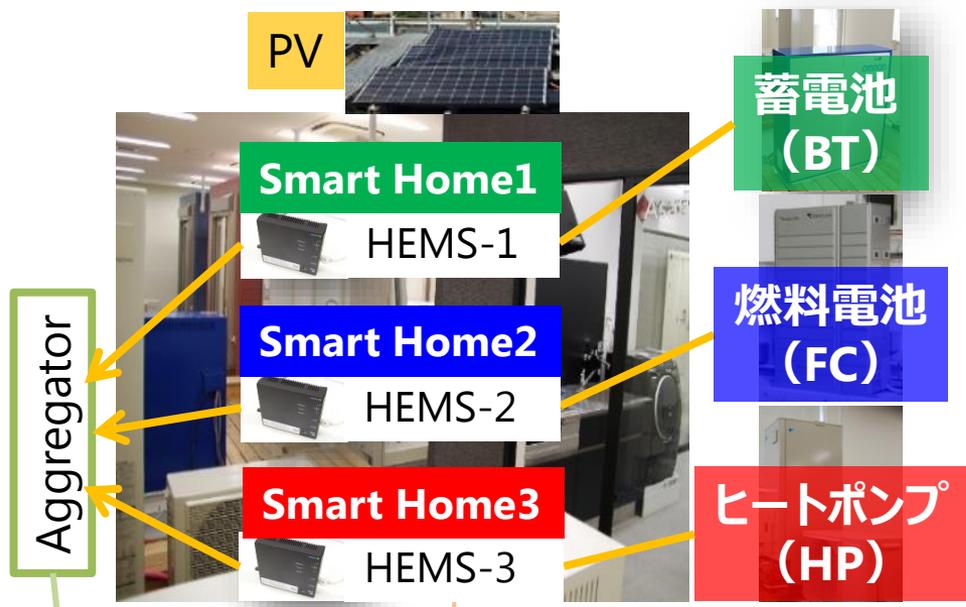
## 機械工学

- HEMS開発
- 家電モデリング

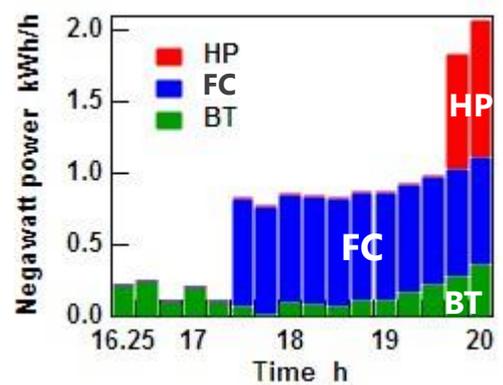
## Smart Grid Middleware Vision



# デマンドレスポンスに対応した統合HEMS制御結果

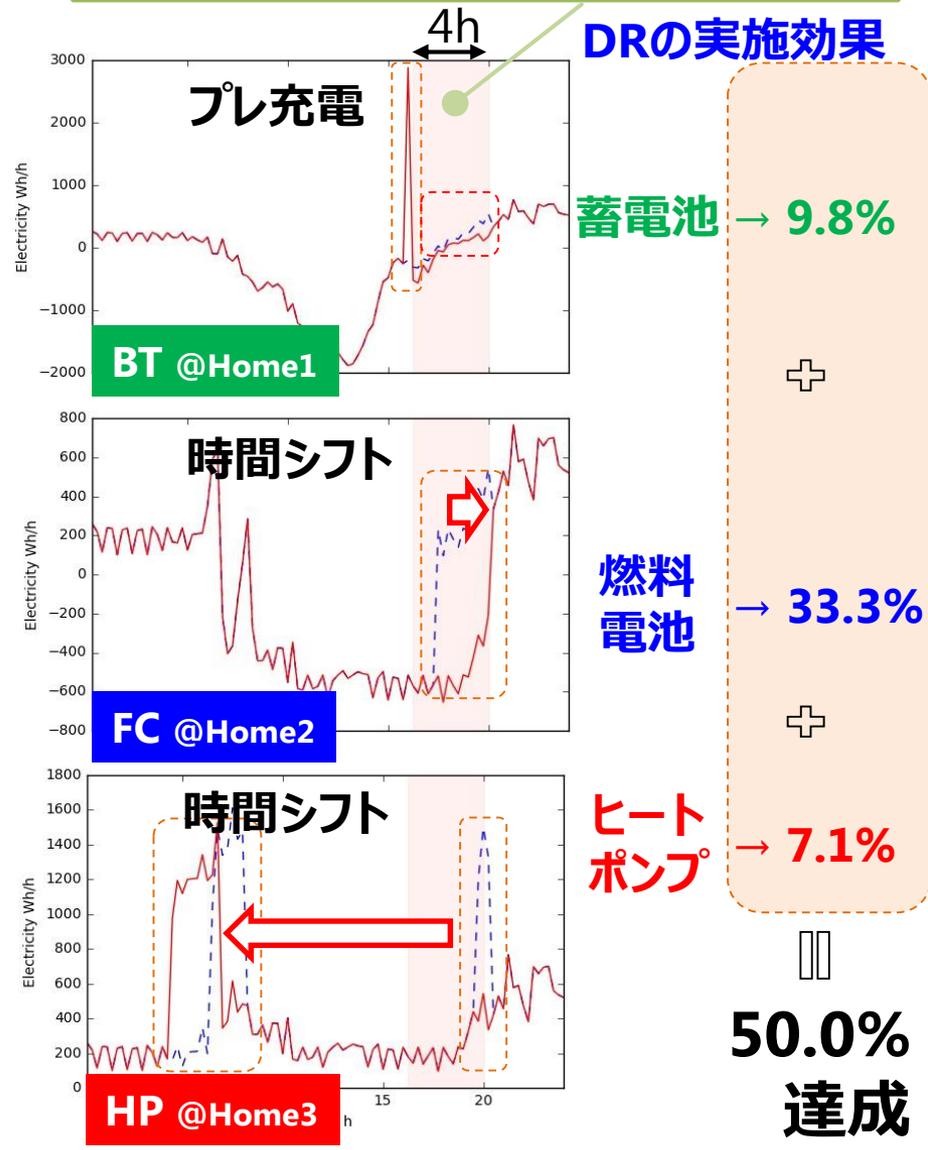


- 購入電力上限値の割当
- 乗数の調整
- 一次エネルギー消費量最小化
- 購入電力上限値の制約



← 地域レベルの  
ネガワット量

- デマンドレスポンス (DR) 要請  
16:00-20:00 (4h), 地域で50%削減



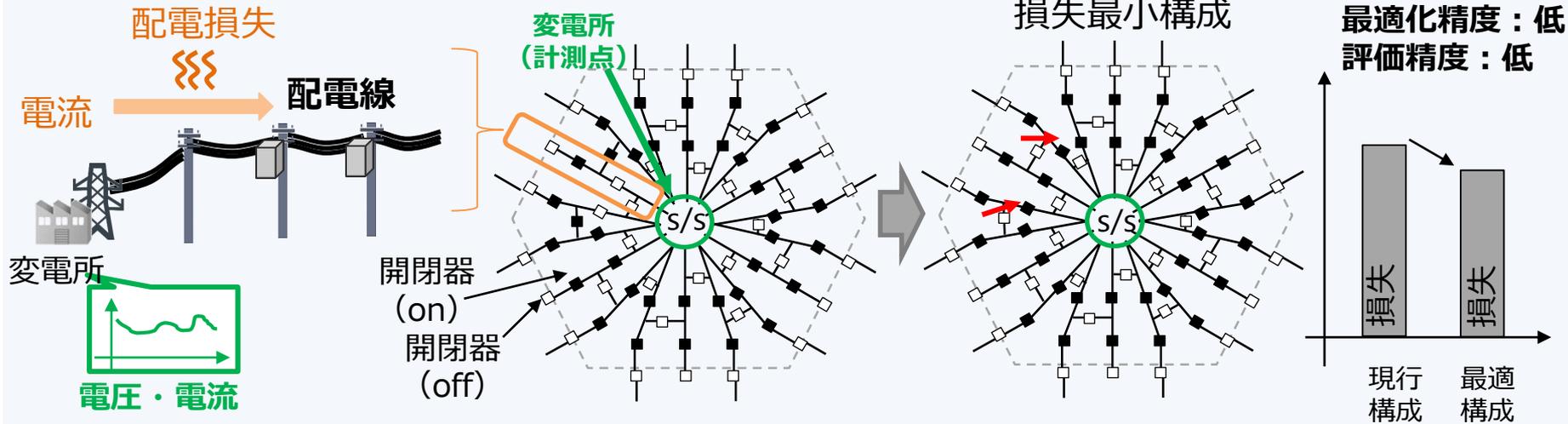
# 東京電力PGの実配電系統における 損失最小化実証実験

---

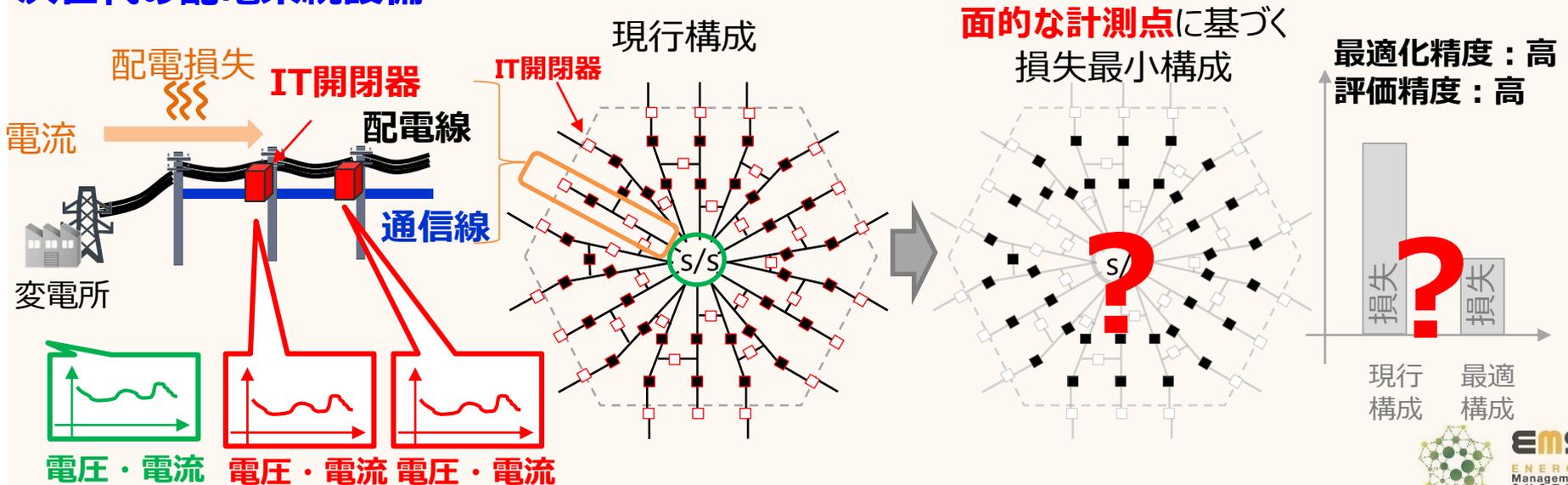


# 実システムにおける配電損失最小化実証試験の背景

## 一般的な配電系統設備



## 次世代の配電系統設備



# 配電損失最小化運用の実証試験の流れ

2016年度

2017年度

2018・2019年度

センサ開閉器の設置

現行構成での計測と  
損失最小構成の計算

損失最小構成での運用

センサ開閉器

配電線  
光通信線

①追加計測器 (10か所)  
2016年設置済

③追加計測器 (20か所)  
2017年設置済

開閉器  
切替情報

・ 2018年度は2017年度の  
損失最小構成で運用



処理機

センサ開閉器  
の実測情報

センサ開閉器の実測情報

損失最小構成情報

配電線  
通信線



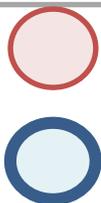
変電所

2016年度  
設置済

損失最小  
化プログラム

計算機

②最適化用  
計算サーバ



東電予算で設置

CREST予算で設置

- ・ (2017年度)現行構成での配電損失の計算,  
損失最小構成の計算
- ・ (2018年度)系統切替後の配電損失を評価

# 実配電ネットワーク：追加計測機器取り付け・計算用サーバ設置

## 追加計測器の取り付け



## 最適計算用サーバ@東京電力川崎研究所



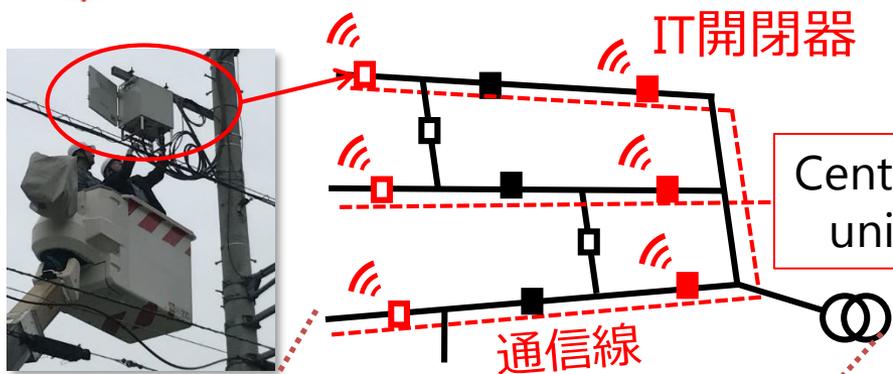
### 2017年度

- センサ開閉器の計測情報から最適構成を算出
- 損失最小構成の決定
- 簡易計算による配電損失削減効果の算出

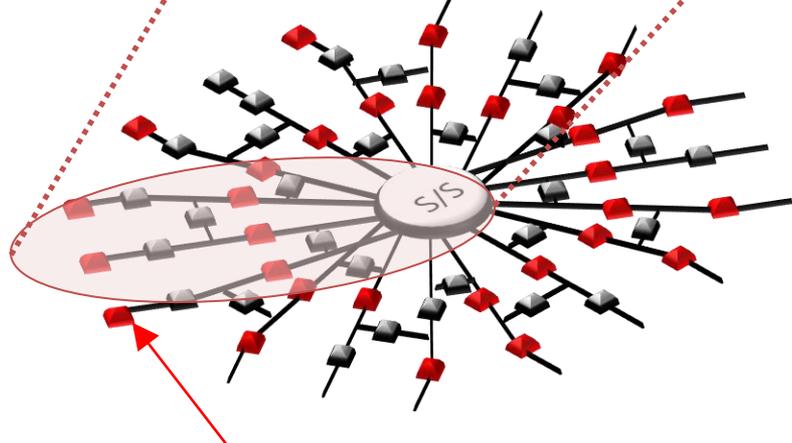
# 実システムにおける配電損失最小化実証実験



早稲田大学が開発する  
損失最小化手法



## 配電損失の量は？



192台の操作対象開閉器  
(79台センサ開閉器)  
(系統構成候補数： $2^{192}$ )



### 実証地域 (1 配電用変電所)

# 配電損失最小化シミュレーション（A変電所）：概要

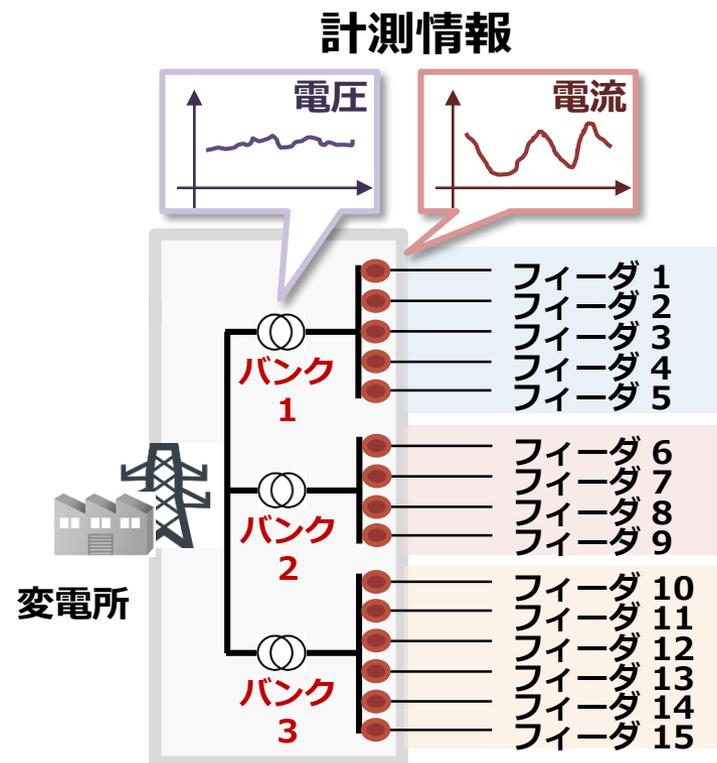
従来より計測されている変電所の計測電力情報を用いて，現行構成から最適構成に移行した際の**損失削減効果を事前評価**

## 実証対象地域の配電システムプロフィール

変電所数 /バンク数/フィーダ数	1/3/15	
線路長	140 [km]	
総契約電力	33.6 [MW]	
開閉器数	自動(IT開閉器)	84 [個]
	手動	155 [個]
	合計	<b>239個</b>

## 計測情報の対象期間

変電所計測情報 (電圧・電流)	2016年3月～ 2017年1月 (1時間刻み11ヶ月)
--------------------	------------------------------------

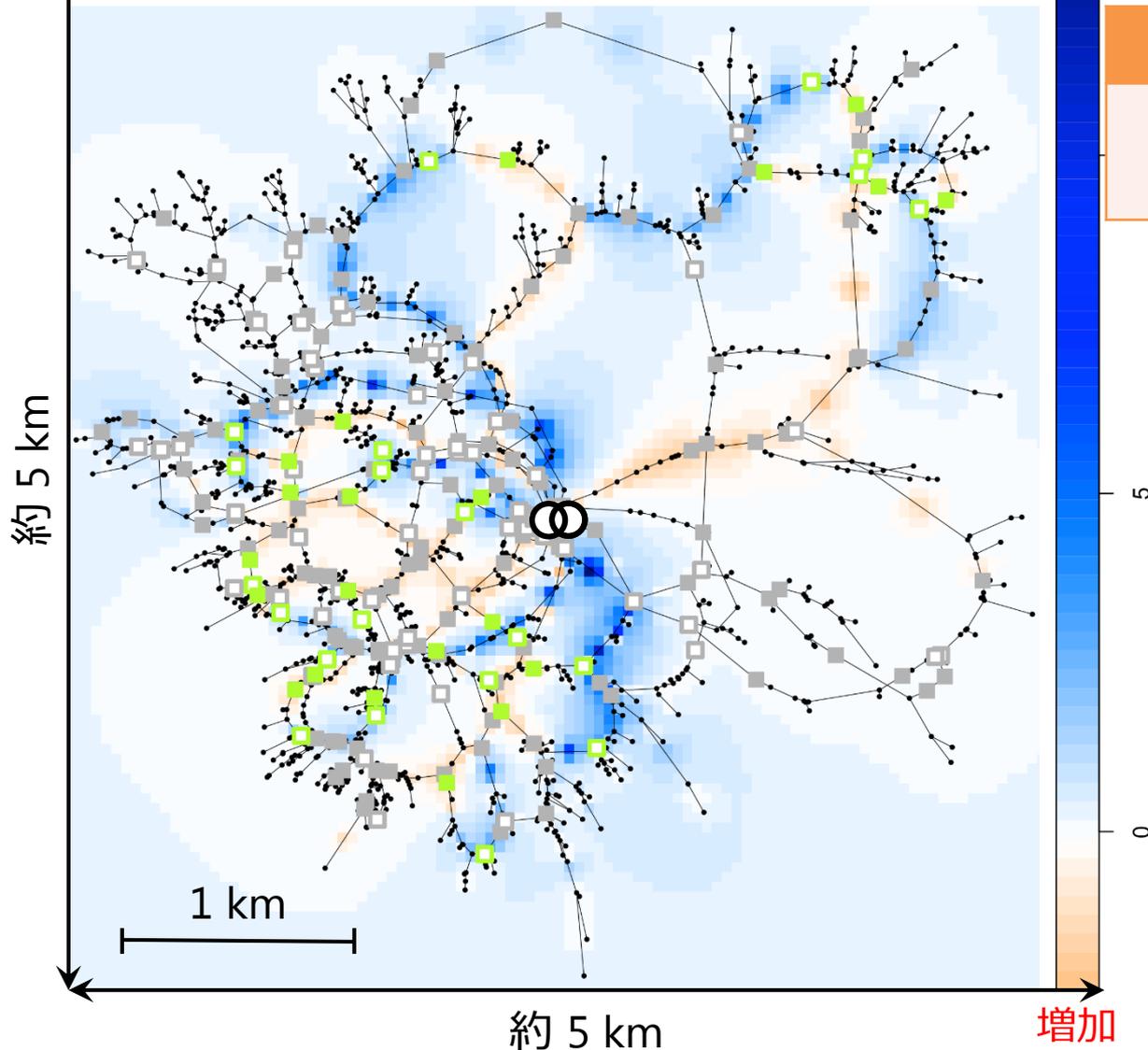


## シミュレーションによる配電損失最小化手法の評価結果 (A変電所)

## 変電所の計測情報を利用

削減

## 配電損失の改善状況



## 年間合計配電損失

現行構成

1757.26  
[MWh]

最適構成

1648.74  
[MWh]239台中**42台**の開閉器を切換え

**-108.52 [MWh]**  
**(-6.18 [%])**

## 開閉器状態

現行構成 → 損失最小構成

□ 閉 → 開

■ 開 → 閉

■ 閉 → 閉

□ 開 → 開



# 実証試験のシミュレーション評価の進捗状況

## 電力損失最小化試験の進捗状況

縮約データ：電圧解析に支障のない範囲でノード・線路を縮約したシステムモデル

詳細データ：電柱一本単位で詳細にシステムを表現したシステムモデル

変電所	配電システムモデル作成		変電所計測情報に基づく評価		IT開閉器計測情報に基づく評価	
	縮約データ	詳細データ	年間評価	次年度評価	年間評価	次年度評価
	システム構成最適化のために使用	システム運用評価のために使用	年間の計測情報を用いた運用評価	ある年の計測情報を用いた次年度の運用評価	年間の計測情報を用いた運用評価	ある年の計測情報を用いた次年度の運用評価
A変電所 (地方系統)	完了	50%	完了		センサ開閉器 設置完了・計測開始	センサ開閉器 設置完了・計測開始
B変電所 (地方系統)	完了	50%	完了	50%	センサ開閉器 設置完了・計測開始	センサ開閉器 設置完了・計測開始
C変電所 (都市系統)	完了	完了	完了		25%	

現在進行状況

本資料の内容

2017年4月-5月  
の計測情報を基に  
切替開閉器を選定

2018年4月から  
実際に切替実施

## 実証試験の進捗状況

	A変電所 (地方系統)	B変電所 (地方系統)	C変電所 (都市系統)
バンク数 / 幹線数	3 / 15	3 / 15	3 / 16
総線路長	140 [km]	194 [km]	66.8 [km]
自動開閉器数 (センサ開閉器)	84 [個]	86 [個]	79 [個]
手動開閉器数	155 [個]	160 [個]	113 [個]



# 数値計算評価の概要（C変電所，都市系統，開閉器数192）

## 評価ケース（全6ケース）

計測情報	運用計画（操作対象開閉器）	目的
①変電所 （年間）	<ul style="list-style-type: none"> <li>自動開閉器</li> <li>自動開閉器 + 手動連系開閉器</li> <li>全ての開閉器（自動・手動開閉器）</li> </ul>	損失削減効果の試算
②センサ 開閉器 （2ヶ月）	<ul style="list-style-type: none"> <li>自動開閉器</li> <li>自動開閉器 + 手動連系開閉器</li> <li>全ての開閉器（自動・手動開閉器）</li> </ul>	損失削減効果の試算 切替開閉器の選定

## 計測情報の概要

	①変電所計測情報	②センサ開閉器計測情報
対象期間	2016年11月1日– 2017年10月31日	2017年4月1日– 2017年5月31日
計測周期	1時間	10分
計測情報	電圧値，電流値（三相合計 値）	電圧値，電流値，力率（相別）
計測点数	16地点（フィード根本）	79地点



# 配電損失最小化の年間評価結果 (C変電所,変電所計測情報)

変電所の計測情報を用いた評価結果  
(自動・手動開閉器全てを操作対象)

年間合計配電損失

現行構成

最適構成

498.1  
[MWh]

453.5  
[MWh]

192台中**36台**の開閉器を切換え

**-44.6 [MWh]**  
**(-8.95 [%])**

開閉器状態

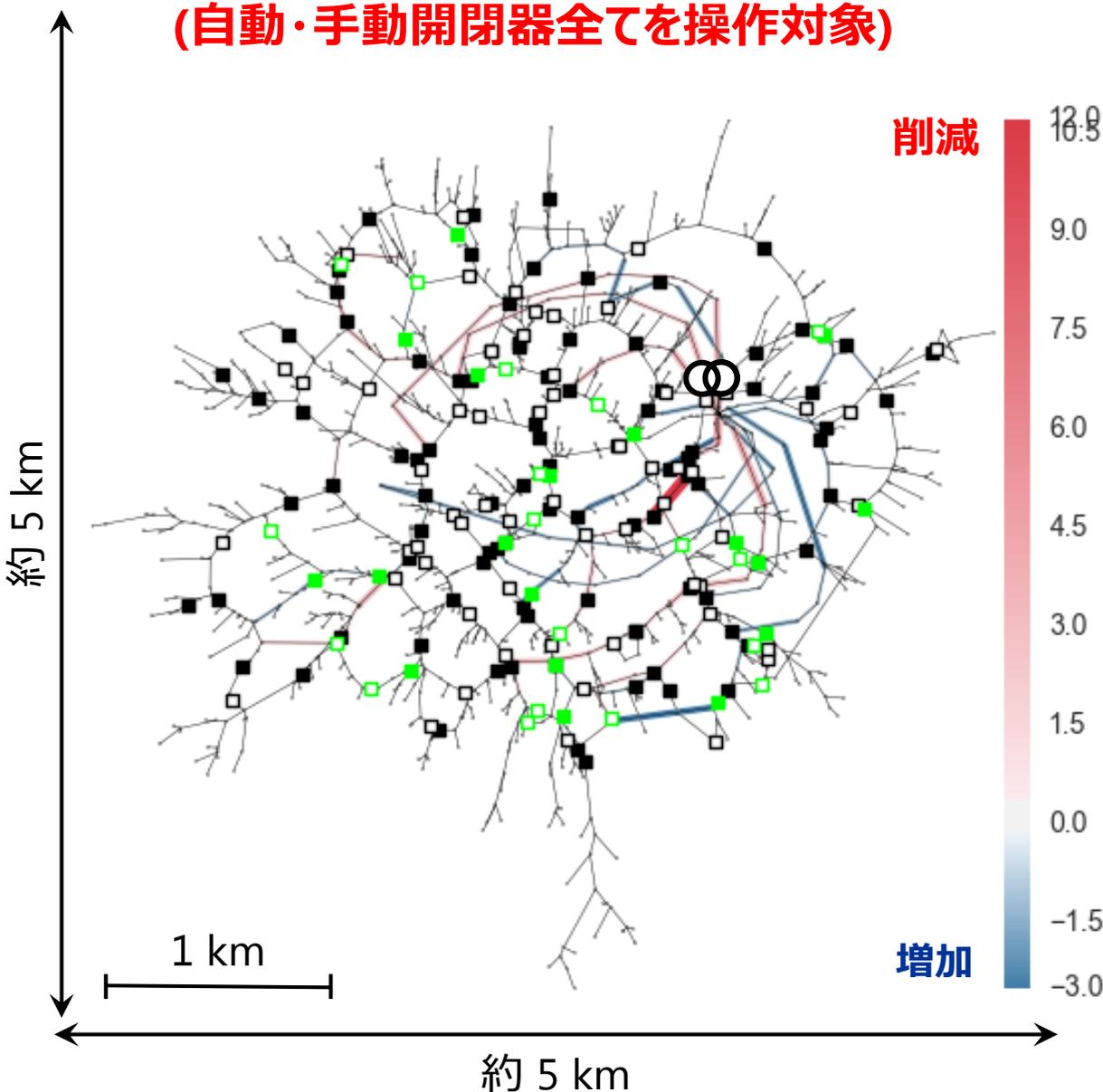
現行構成 → 損失最小構成

□ 閉 → 開

■ 開 → 閉

■ 閉 → 閉

□ 開 → 開

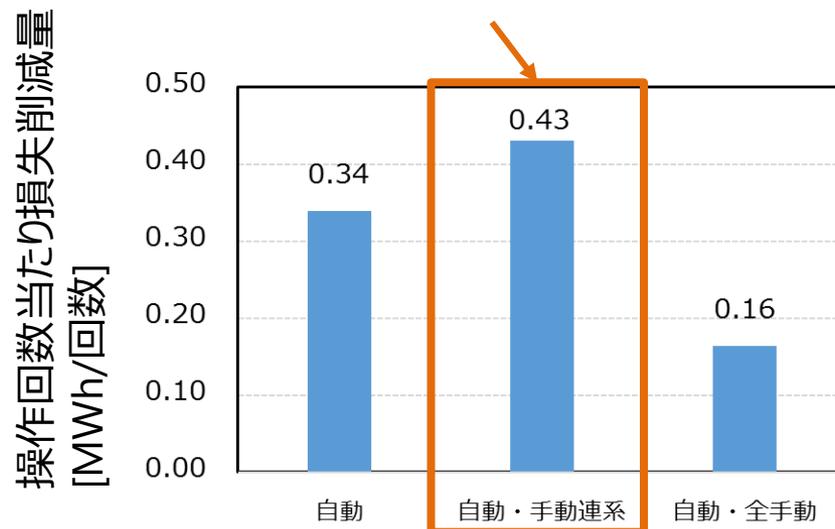
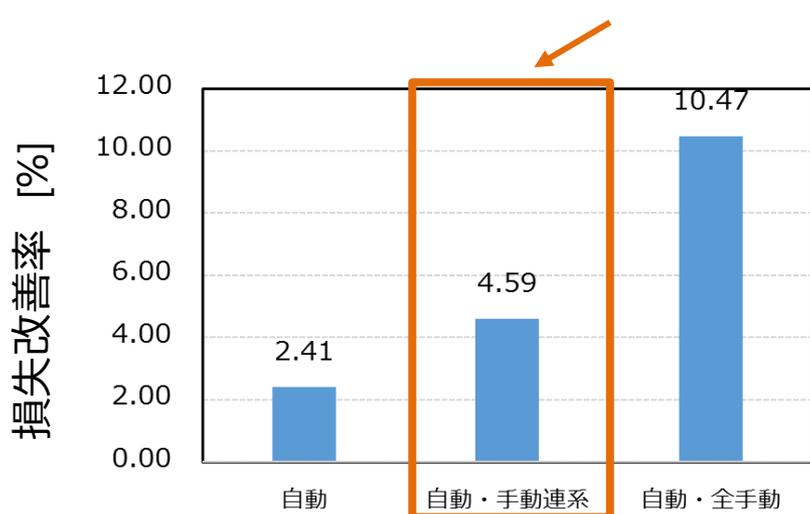




# 配電損失最小化の年間評価結果（C変電所,センサ開閉器計測情報）

## センサ開閉器の計測情報に基づく評価（二ヶ月間の評価）

### 実証試験での切替予定開閉器（2018年4月開始予定）



	電力損失量 [MWh]	CO2 排出量[t]*	操作開閉器数	
			自動	手動
現行構成	56.2	41.5	0	0
最適構成 (自動)	54.9	40.5	4	0
<b>最適構成 (自動・手動連系)</b>	<b>53.6</b>	<b>39.6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>
最適構成 (自動・全手動)	50.3	37.1	11	25

# 今後の展開



# 林チーム内のEMSプラットフォームを活用した連携イメージ

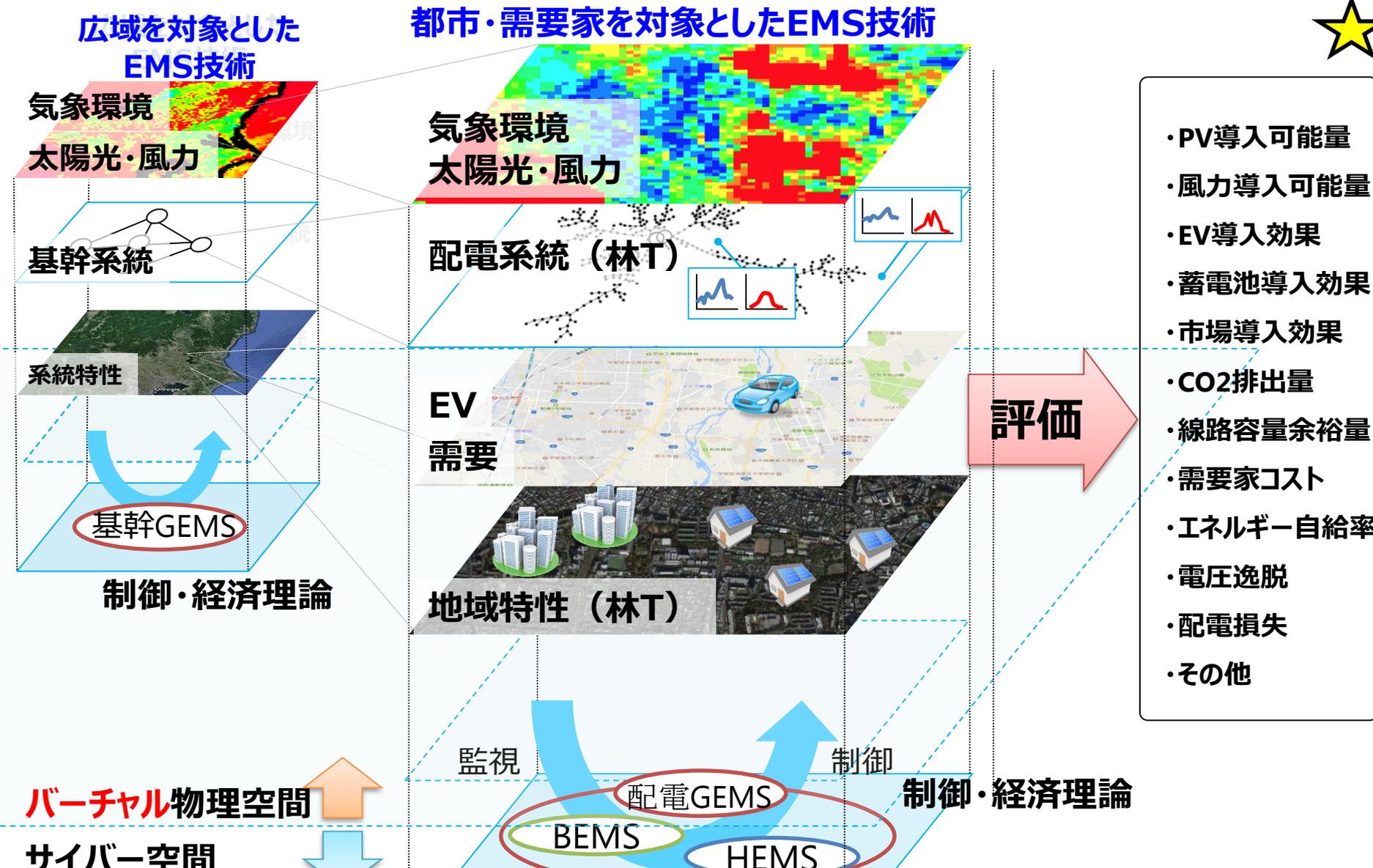
	対象	需要家モデル (阪大・下田G)	配電システムモデル (早大・林G)
Step1	狛江モデル (1フィーダ)	HP給湯器と省エネ機器の技術普及の評価	
Step2	狛江モデル ver.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー需要データ推定手法の開発： 将来人口・HP・省エネを考慮</li> <li>将来シナリオ生成手法構築</li> </ul>	都市エネルギー評価及び EMS手法の評価
Step3	狛江モデル ver.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー需要データ推定手法の開発： 将来人口・HP・省エネ・EV普及を考慮 (名大・稲垣G連携)</li> <li>将来シナリオ生成手法の構築</li> </ul>	都市エネルギーの評価及び EMS手法の評価
Step4	狛江モデル ver.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー需要データ推定手法の開発： 全体シナリオ（将来人口・HP・省エネ・ EV普及・電化等）を考慮</li> </ul>	都市エネルギー評価及び EMS手法の評価

## その他実施予定項目

- 配電システムモデルへの地域情報のリンク強化 (阪大・下田G, 千葉大・入江G, 早大・林G)
  - 地域需要（戸建・集合住宅比），人口密度の反映
  - 対象地域の気温に応じた熱需要の生成
  - 衛星データの展開
- 都市エネルギーおよびEMS手法の経済的評価 (東大・大橋G)
- 電力システム最適化手法の導入評価 (慶大・大森G)
- 開発モデルを用いたEMS手法の適用及び評価  
(名大・稲垣G, 東工大・石井G, 東大・馬場G, 早大・林G)



# EMSシミュレーションプラットフォーム活用の位置づけ



- ・PV導入可能量
- ・風力導入可能量
- ・EV導入効果
- ・蓄電池導入効果
- ・市場導入効果
- ・CO2排出量
- ・線路容量余裕量
- ・需要家コスト
- ・エネルギー自給率
- ・電圧逸脱
- ・配電損失
- ・その他

**分散協調EMS手法 = 需要家EMS手法 + 地域EMS手法 + 配電系統EMS手法 + 基幹系統EMS**

# 研究業績

◎ **学術論文誌：37本**（海外:27本、国内:10本）

・IEEE Trans. on Smart Grid: 5本 等

◎ **国際会議発表：81本**

**【合計】**

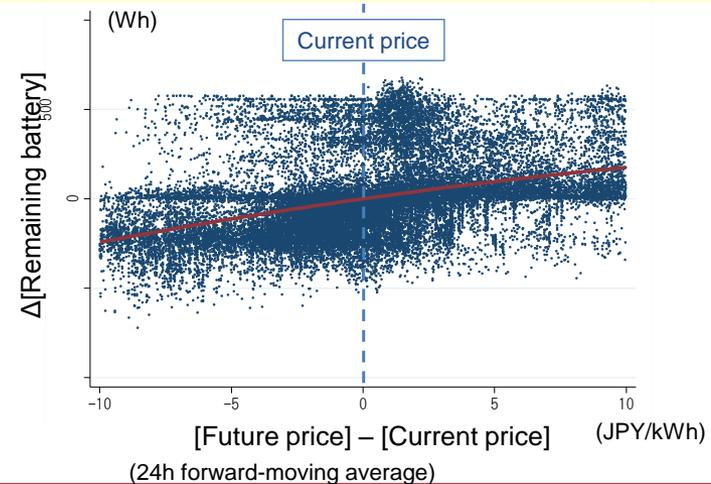
**学術論文・国際会議発表：118本**  
**（海外：108本、国内：10本）**

# 参考資料 各SGの研究成果

# 東大 大橋SGの代表的な研究成果(1/2)

- デマンドレスポンスについて、家庭用電力需要家を対象に使用電力量および蓄電池利用の意思決定を捉える経済モデルを構築
- 電力単価の事前通知について経済的インパクトを定量的に評価

- 家計別・時間帯別のデータから、電力単価と電力利用の関係を仔細に分析。
- 動学的な要素を考慮し、需要家が将来の電力単価をどのように予想しているかを識別。
- 将来の電力単価が蓄電池の利用に与える影響を定量化。



- 構築したモデルを用いて需要家が電力料金型デマンドレスポンスから得られる便益の定量化が可能に。
- 電力単価の事前通知やADRの普及が与えるインパクトについて検討。
  - 1日前の事前通知によって需要家の電力料金が平均800円 (/月) 程度抑制。

$$\begin{aligned}
 & V_t(k_{it}, P_{it}, z_{it}, \varepsilon_{it}; \theta) \quad \text{/'s utility from his/her electricity consumption} \\
 & = \max_{c_{it}, s_{it}} \underbrace{u(c_{it}, z_{it}, \varepsilon_{it}; \theta)}_{\text{Price}} - \underbrace{p_t(c_{it} + s_{it} - e_{it})}_{\text{PV power generation}} \\
 & \quad + EV_{t+1}(k_{it+1}, P_{it+1}, z_{it+1}, \varepsilon_{it+1}; \theta). \\
 \text{s.t.} \quad & \text{Remaining battery charge} \quad k_{it+1} = k_{it} + \underbrace{\delta}_{\text{Charge efficiency} (= 0.88)} s_{it} \\
 & \quad s_{it} \leq e_{it} - c_{it}, \quad 0 \leq k_{it+1} \leq \underbrace{K}_{\text{Battery capacity} (=5,000\text{Wh})}
 \end{aligned}$$

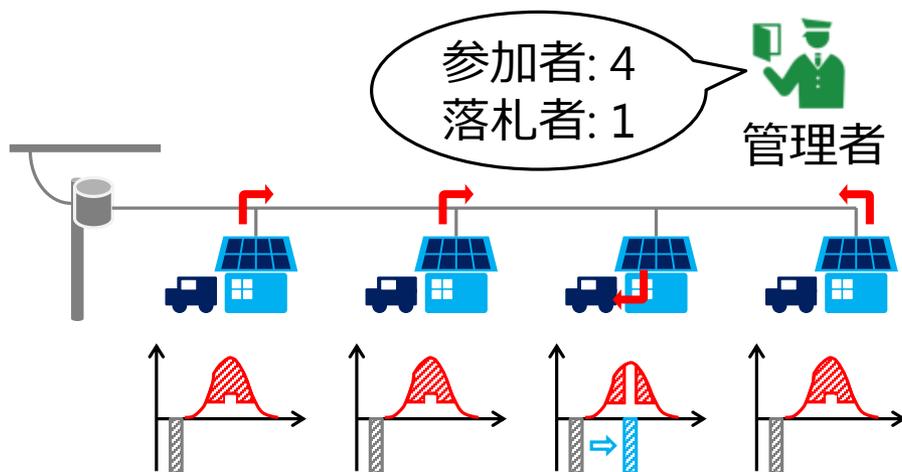
	Electricity consumption (kWh/month)	Electricity bill (JPY/month)
Without advance notice	608 (112)	6,355 (2,451)
With advance notice (observable for a day ahead)	606 (219)	5,540 (2,959)

- Isogawa, D. and H. Ohashi “Economic Analysis on Price-Based DR Programs on Residential Customers”, 2017 JST-NSF-RCN Workshop on Distributed Energy Management Systems, 2017.
- Isogawa, D. and H. Ohashi “Effects of Dynamic Electricity Pricing on Residential Customers”, 7th Asia-Pacific Innovation Conference, 2016.

# 東大 大橋SG – 早大 林SGの代表的な研究成果(2/2)

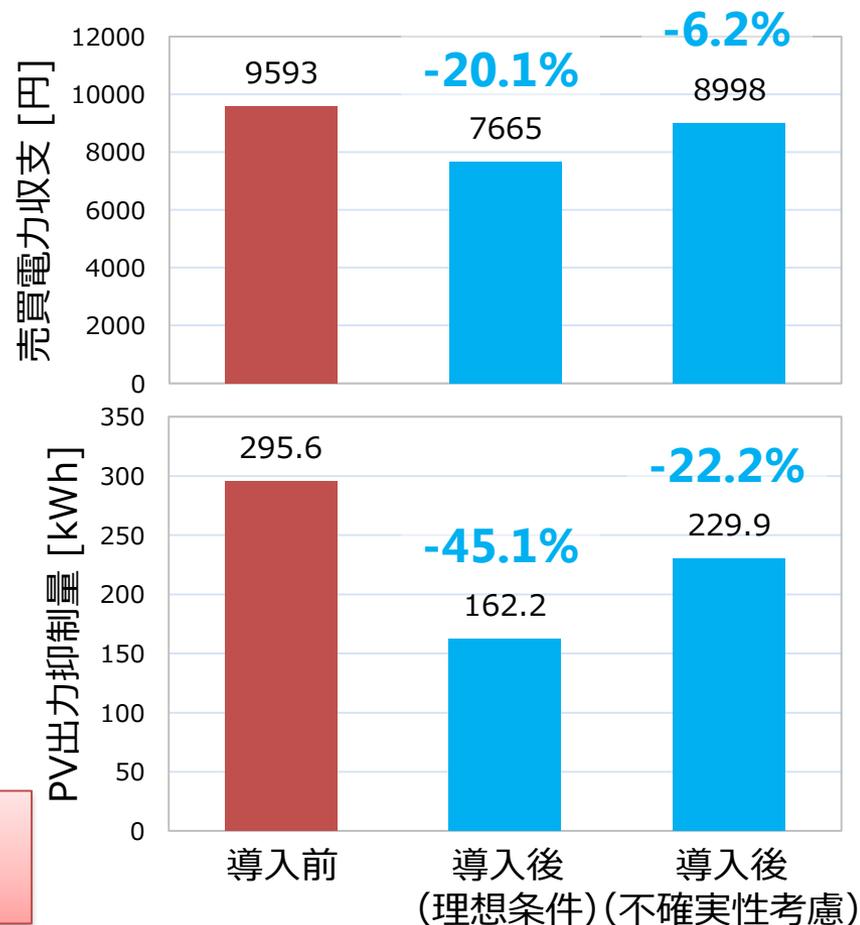
## 配電系統におけるEV充電オークション制度の導入検討

- 電圧制約によるPV出力抑制量を削減するためのEV充電時間帯をシフト
  - 落札者（充電シフト者）にインセンティブを付与することで充電負担の公平性を確保
  - 参加者は 充電シフトor外出 の意思を入札額で表示することで自主性を確保



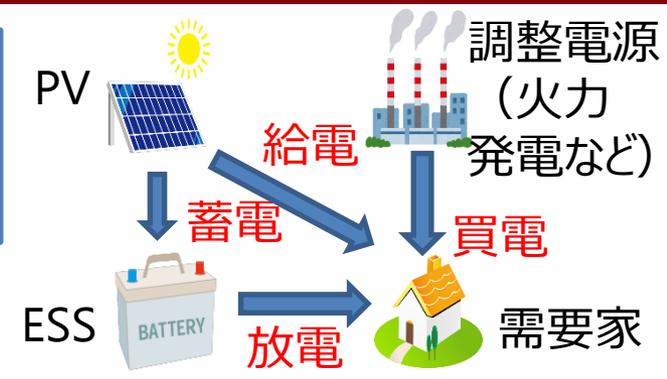
入札額	90円	60円	50円	80円
落札			○	
収支	-60円	-60円	+180円	-60円

- 充電シフトによる夜間買電量削減が、対象エリア全体のコスト削減に寄与することを確認。



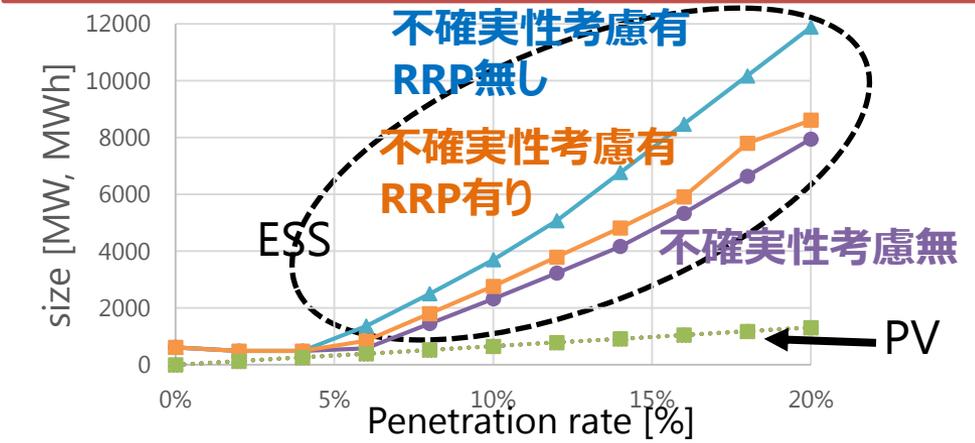
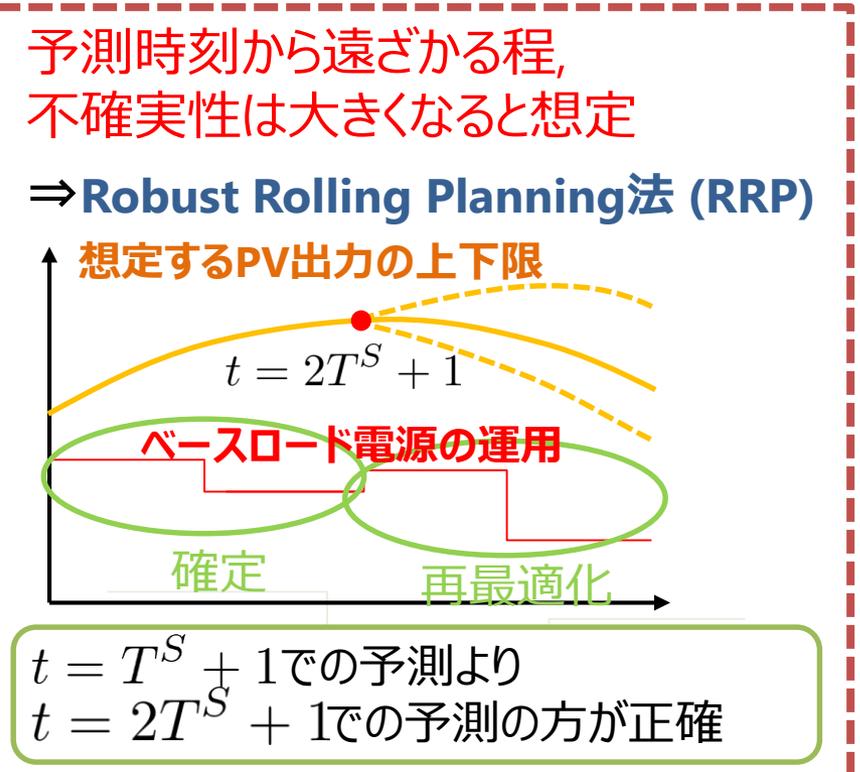
# 慶大 大森SGの代表的な研究成果(1/3)

エネルギーシステムのコストを最小にするようなPVとESSの導入量を決定する問題に対し、PV出力の不確実性の考慮したRRP法を提案

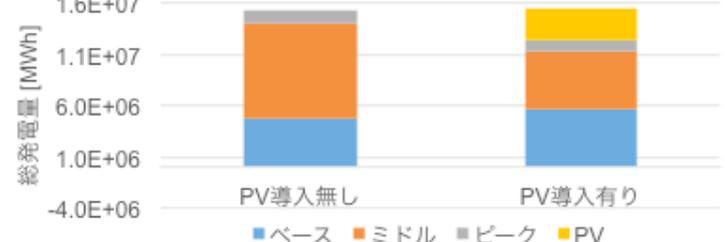


PV出力は天候・気温により変動  
 → PV出力の不確実性の考慮するため、**ロバスト最適化**の適用

総需要に対する目標供給量の割合 (Penetration rate) に対するPV・ESSの最適導入量



PV導入無とPenetration rate=20% (PV導入有)で各電源の総発電量を比較

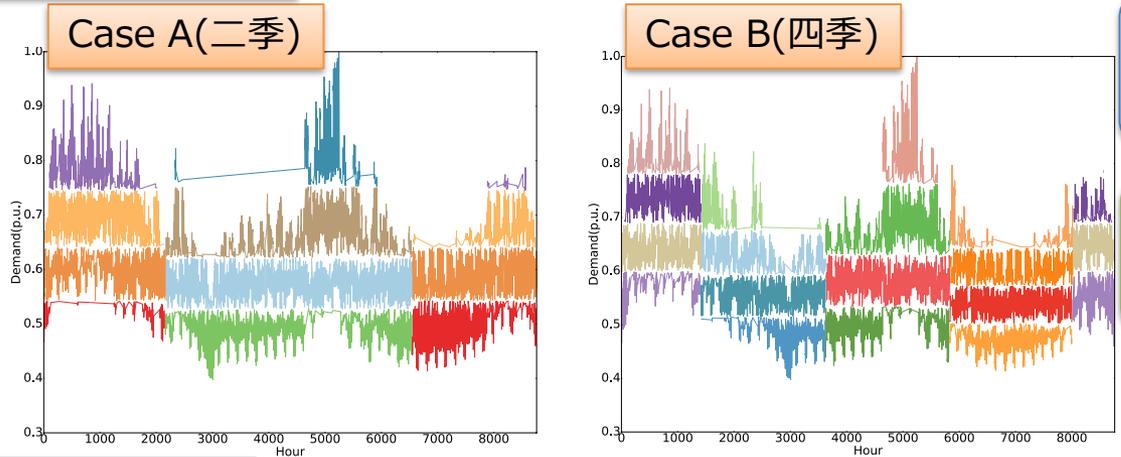


松永, 小西, 高橋, 武田, "ベースロード電源の負荷追従運転を考慮した再生可能エネルギーのロバスト設備投資 計画問題", 第58回自動制御連合講演会, 2015/11/14.

# 慶大 大森SGの代表的な研究成果(2/3)

- 分散型再生可能エネルギー電源の投資者に対する長期的な意思決定を支援する方法を開発した。

## 需要帯の分割

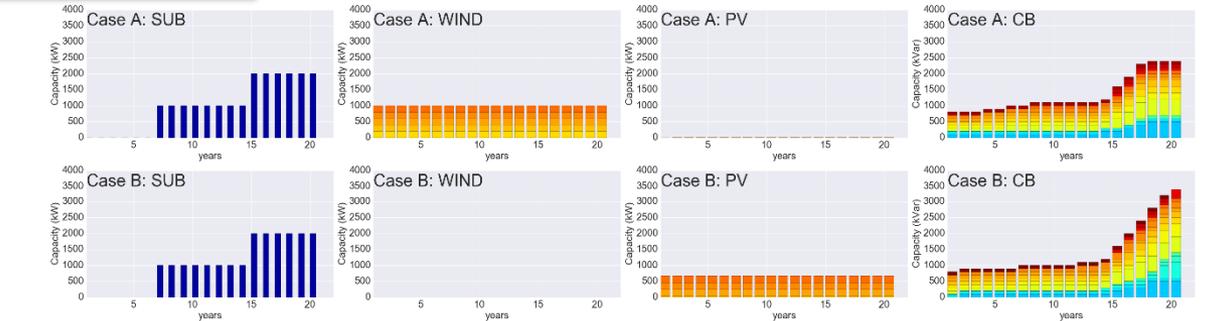


地域の季節性を考慮したシナリオ生成法の提案

意思決定者のニーズに合わせて様々な状況を想定したモデル化

- キャパシタバンク導入, 逆潮流制限, CO2排出費用等を新たに考慮

## 累積導入量 左から変電所, 風力発電, 太陽光発電, キャパシタバンク



## 総システム費用

Cases	A	B
運用維持費用(€)	29,570,183	29,247,547
投資費用(€)	2,394,870	2,013,361
補助金(€)	245,162	99,584
<b>総システム費用(€)</b>	<b>31,719,891</b>	<b>31,161,324</b>

長期的な分散型電源最適配置の意思決定を様々な状況下で支援できる汎用的フレームワークを開発・公開

<http://github.com/ikki407/DGOPT>

I Tanaka; H Ohmori, "Method Evaluation for Short-Term Wind Speed Prediction Considering Multi Region in Japan", Journal of Robotics and Mechatronics, Rb28-5-7843, Vol.28, No.5, October 20, 2016.

I Tanaka; H Yuge; H Ohmori, "Formulation and Evaluation of Long-Term Allocation Problem for Renewable Distributed Generations", IET Renewable Power Generation, DOI:10.1049/iet-rpg.2017.0068, Print ISSN:1752-1416, Online ISSN:1752-1424, June 26<sup>th</sup>, 2017.

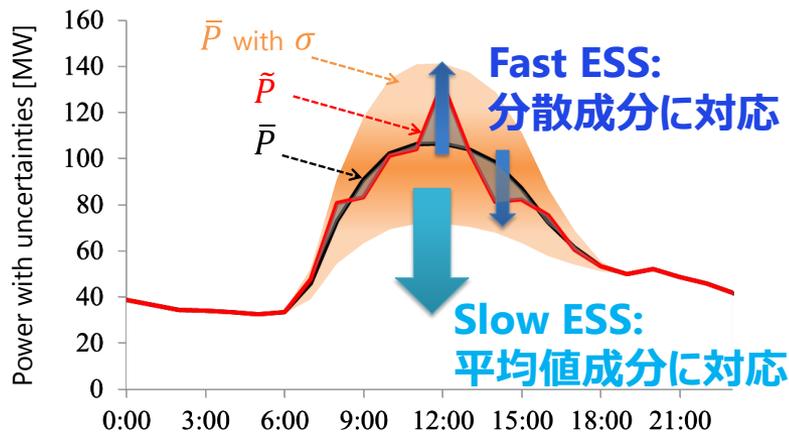


# 慶大 大森SGの代表的な研究成果(3/3)

- DR導入による系統安定化効果と不確実性増大の双方に着目し、  
系統安定化費用 (ESS (蓄電池)導入費) を最小化できる  
DR最適導入率の決定手法を提案した

## ■ 大森SGでの取り組み

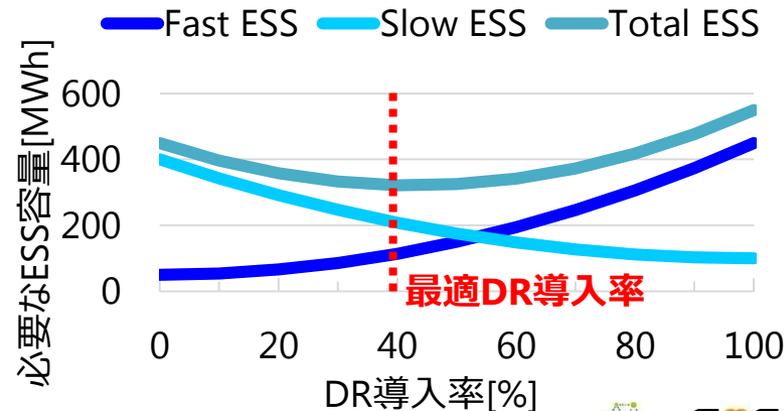
- 送電系統での不確実性を考慮した  
供給不足・過剰対策のための  
ESS (蓄電池) 導入量の決定手法
- 不足・過剰を確率的に評価
  - 確率的評価手法の適用
  - 平均値・分散による影響の定式化  
→ **Slow/Fast ESS**の提案



応用

## ■ DR導入率とESS導入量の関係

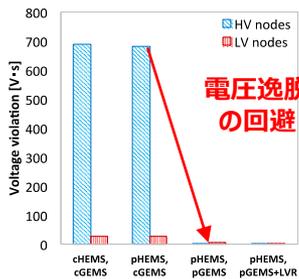
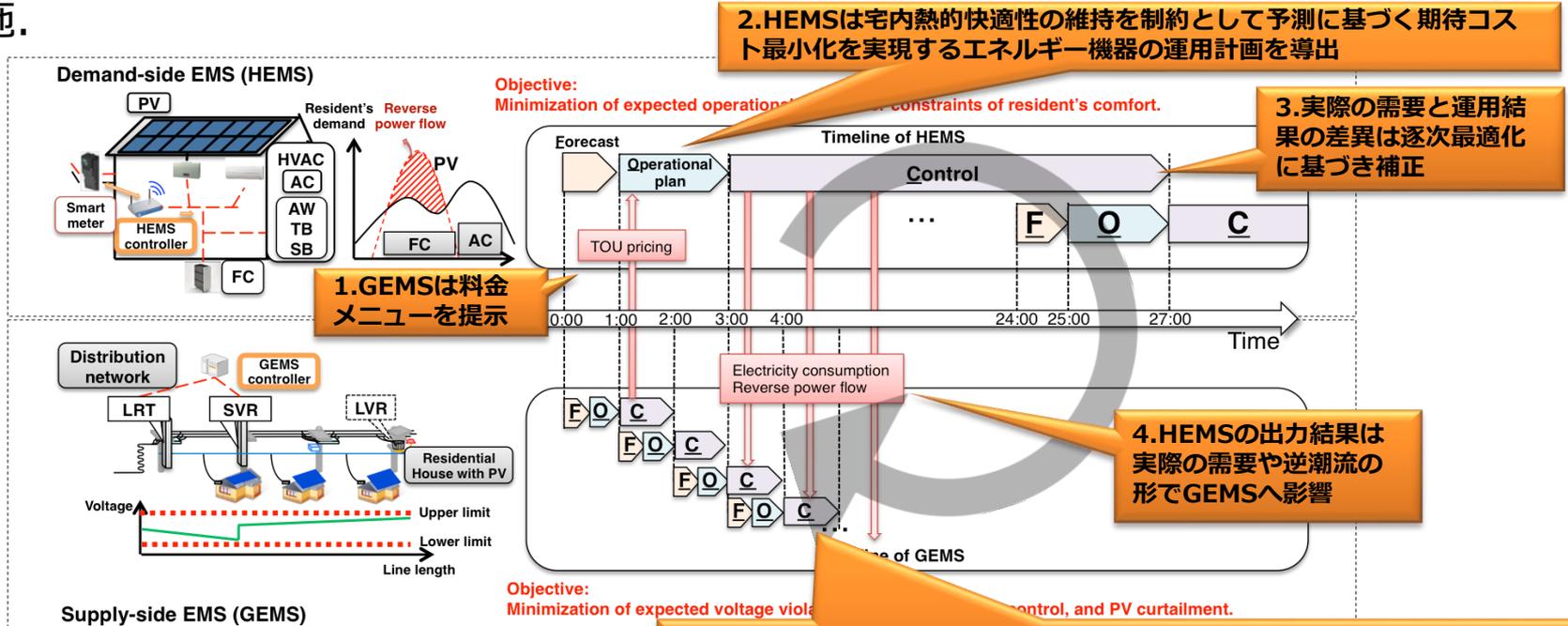
- DRを導入することで  
供給不足(下げDR)・過剰(上げDR)が減少  
... **必要なSlow ESSは減少**
  - ただしDR導入に伴い  
系統内の不確実性が増大  
... **必要なFast ESSが増加**
- このトレードオフを踏まえて  
最適なDR導入率を決定



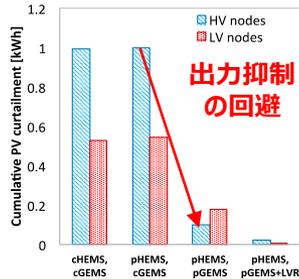
- R. Konishi and M. Takahashi, "Optimal facility allocation and determination of demand response participation rate considering uncertainties in power systems," Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Vol. 30, No.1, pp.10-19, 2017.

# 早大 林SGの代表的な研究成果(1/2)

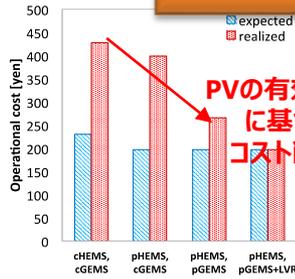
- PVが大量導入された状況下においてH/GEMSによる予測・運用・制御一貫型のエネルギー管理の枠組みの提案と、相互作用を考慮したシミュレーションに基づく評価の実施。



(a) Cumulative voltage violation



(b) PV curtailment

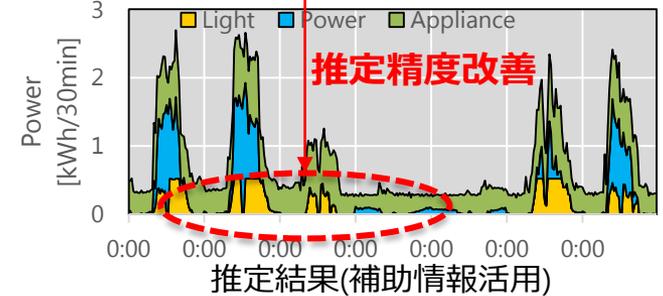
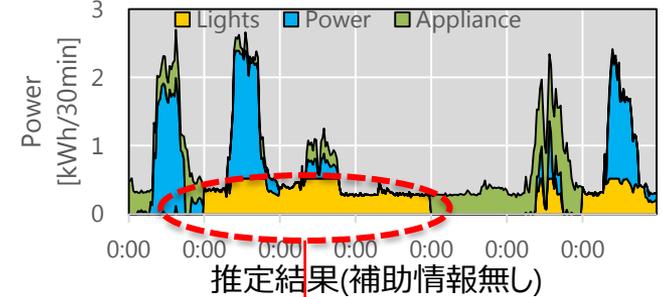
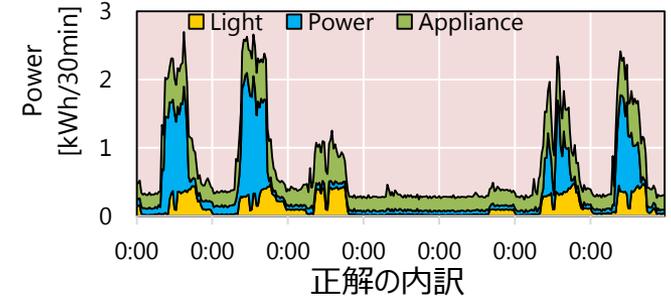
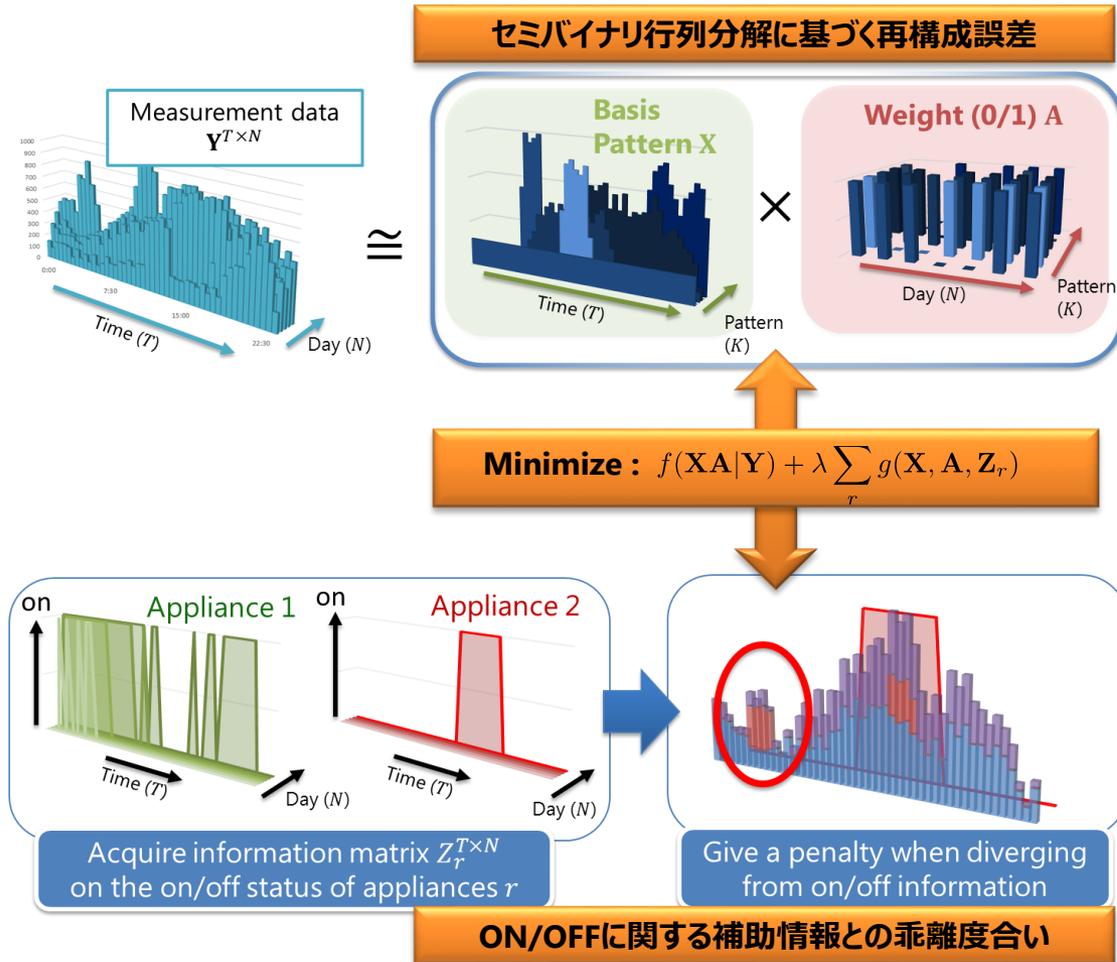


(c) Operational cost

• 配電系統上の電圧品質を担保しつつ需要家太陽光発電出力を最大限に受け入れ、かつ需要家にとってのメリットも担保するための分散EMSの方法論を開発

# 早大 林SGの代表的な研究成果(2/2)

- オフィスビルにおける30分値の電力消費量計測データに基づく用途別内訳の推定手法の開発

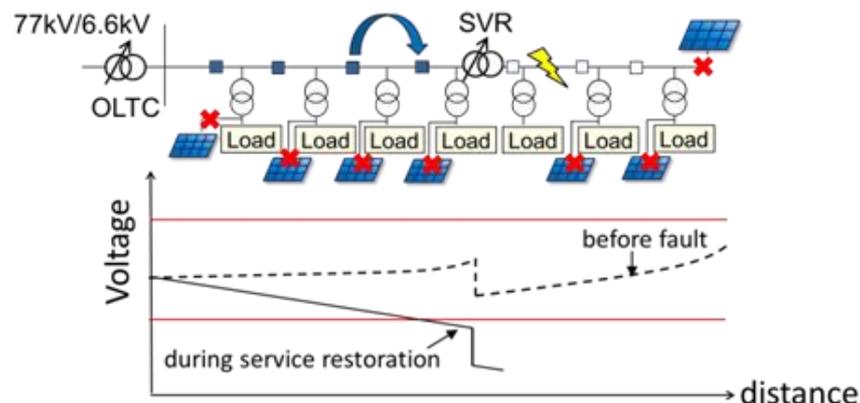
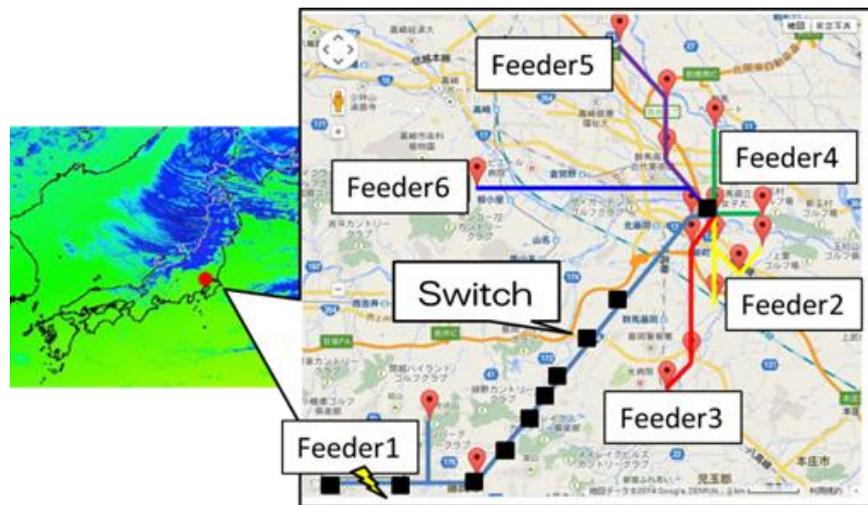


- 日常のビル管理の過程で入手可能な空調・照明制御履歴等の補助情報の活用により内訳の推定精度の向上を実現

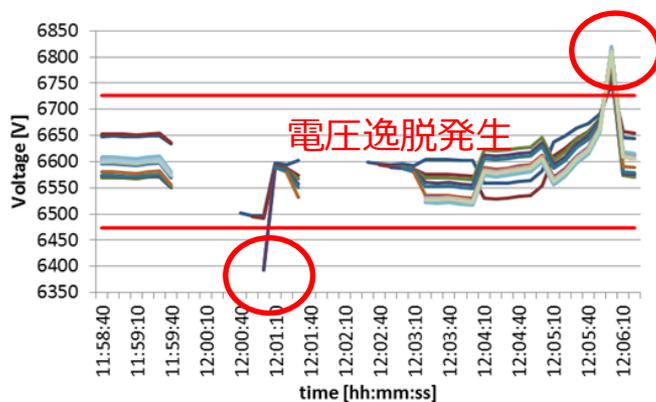
• A. Miyasawa et al., "Energy Disaggregation Based on Semi-supervised Matrix Factorization using Feedback Information from Customers", Proc. ISGT Europe 2017, September, 2017.

# 千葉大 入江SG - 早大 林SG の代表的な研究成果(1/2)

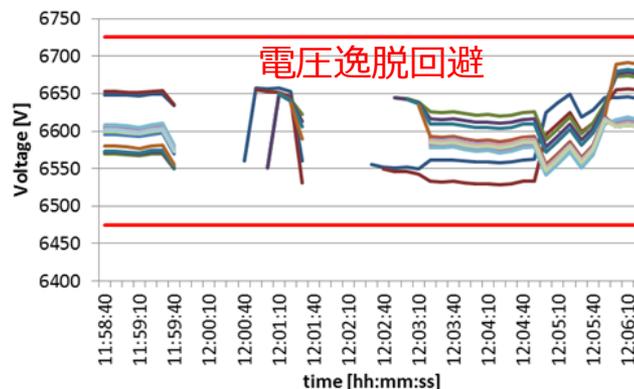
- 配電事故時のPV解列に伴う電圧分布変動を衛星日射量情報から推定し電圧逸脱を回避する配電自動化手法を構築。



事故復旧中の電圧分布変化



現行の配電自動化（電圧推移）

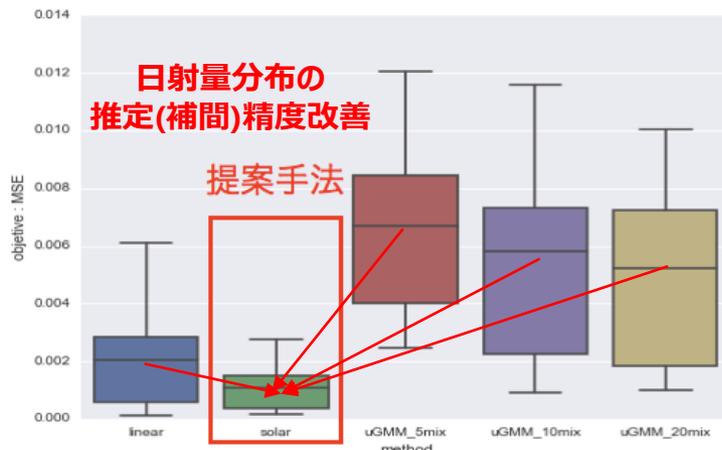
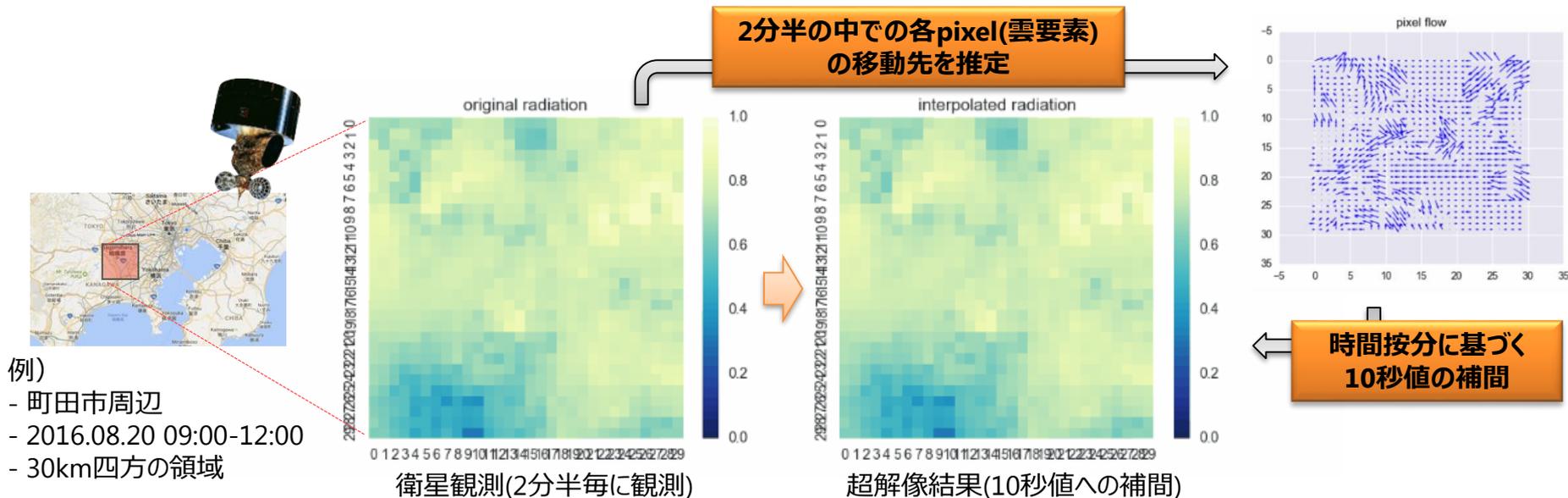


提案する配電自動化（電圧推移）

- 衛星日射量を利用した電圧制御手法を開発し、これにより従来の事故復旧過程で電圧逸脱するようなケースにおいて、逸脱回避となることを検証

# 千葉大 入江SG - 早大 林SG の代表的な研究成果(2/2)

- PVが分散導入された配電系統における高時間分解能(10秒程度)の電力潮流シミュレーション実施を目的として、2分半毎に獲得できる衛星観測日射量推移の時間的超解像手法を検討。



推定(補間)誤差の評価

- 本手法により再現される日射量推移の面的プロファイルを利用することで、都市規模の配電系統において発生しうるPV発電量の面的短時間推移の影響(局所的な電圧変動など)を議論することが可能に

# 阪大 下田SGの代表的な研究成果(1/2)

## 国勢調査・地理情報に基づく地域エネルギー需要推計

- 丁目単位でのエネルギー需要推計
- 多様な地域の考慮、将来需要や調整力の想定が可能に

### ①地域の地理・配電情報

### ②住宅・世帯・ひと・機器・設備

### ③エネルギー需要・調整力



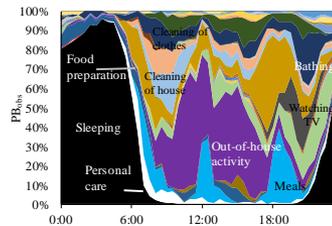
住宅形式



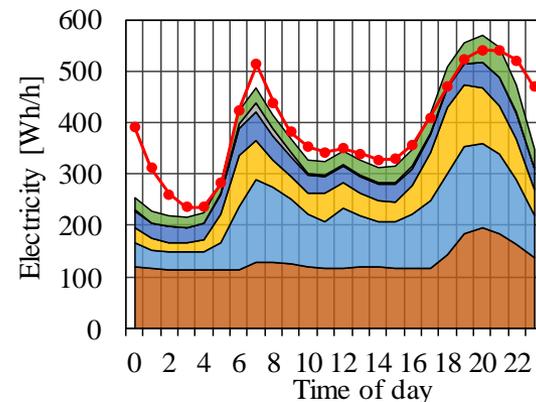
熱負荷・  
光環境特性

時間・機器の使い方

世帯属性

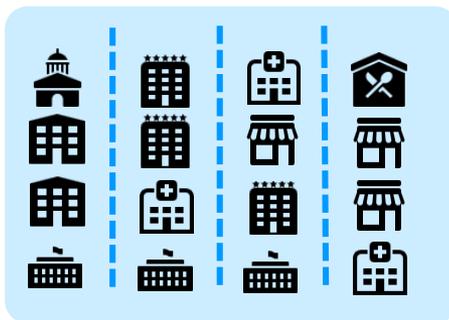
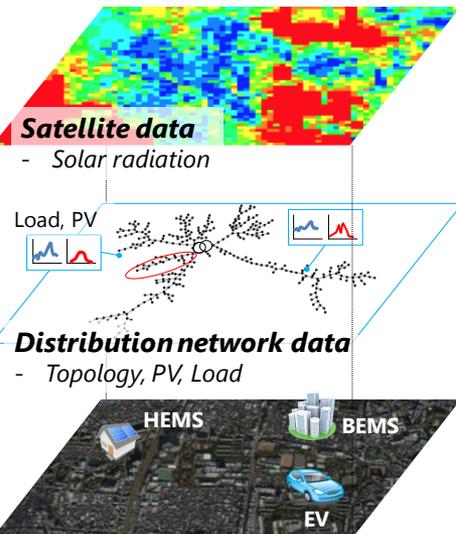


シミュレーション推計

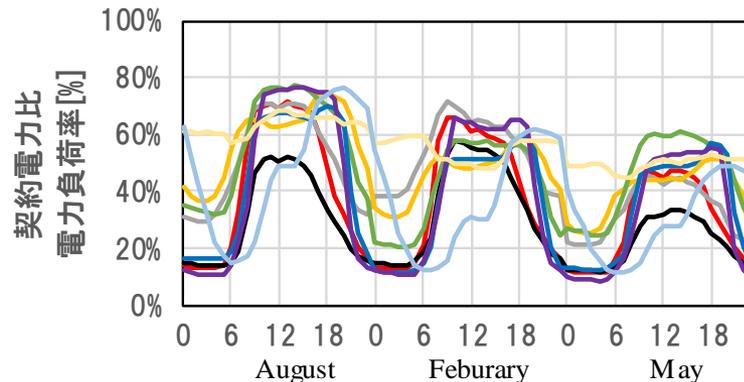


### ②地域の業務施設

### ③エネルギー需要



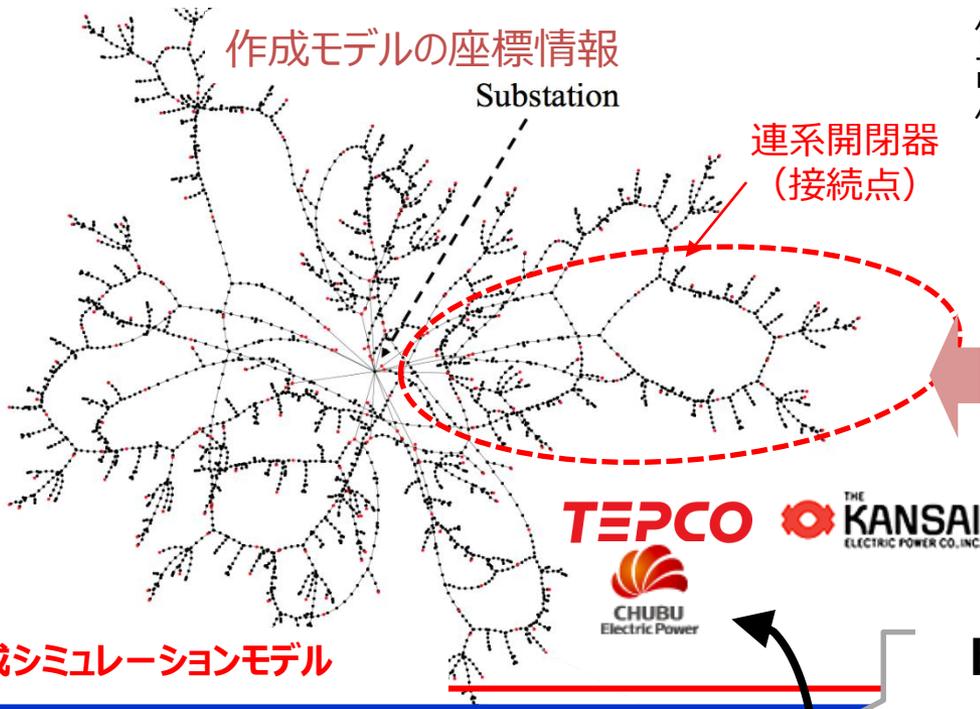
業態別BEMSデータベース (SII)



# 阪大 下田SG - 早大 林SG の代表的な研究成果(2/2)

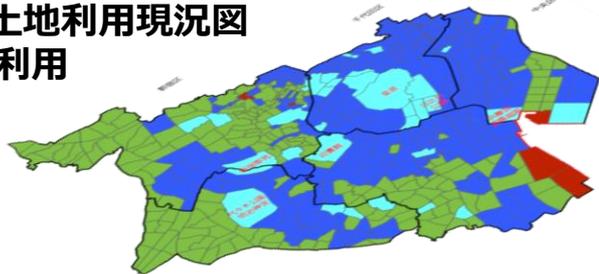
Open CREST EMS modelの拡張・大規模化 (評価基盤PFの構築)

## c. 設備構成・座標情報の決定



作成シミュレーションモデル

※東京都土地利用現況図のデータを利用



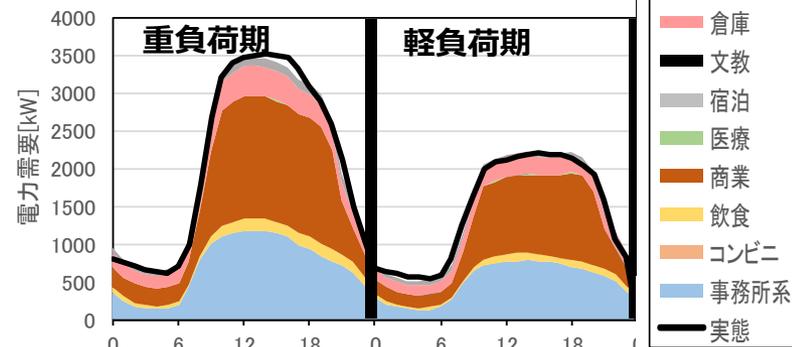
模擬対象都市 (多摩地区)

## a. 配電線の需要家の想定

使用データベース :

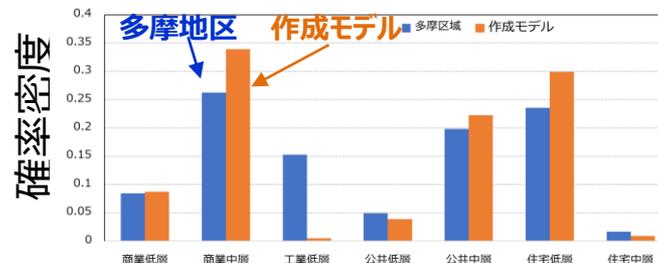
高圧需要家 : **ビル5727件**@全国 (SII)

低圧需要家 : **戸建住宅533件**@群馬県 (NEDO)



1 配電線の需要家の電力プロフィール

## b. 代表都市を構成する配電線の選定

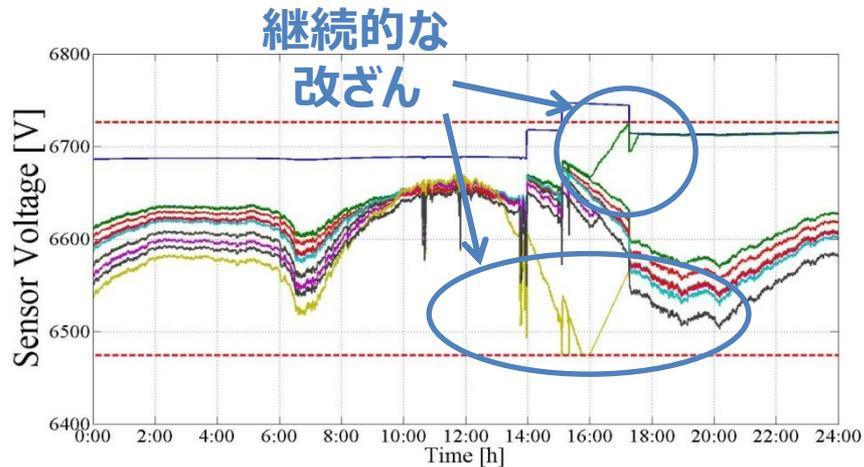


模擬対象地域と作成モデルの建物用途比率

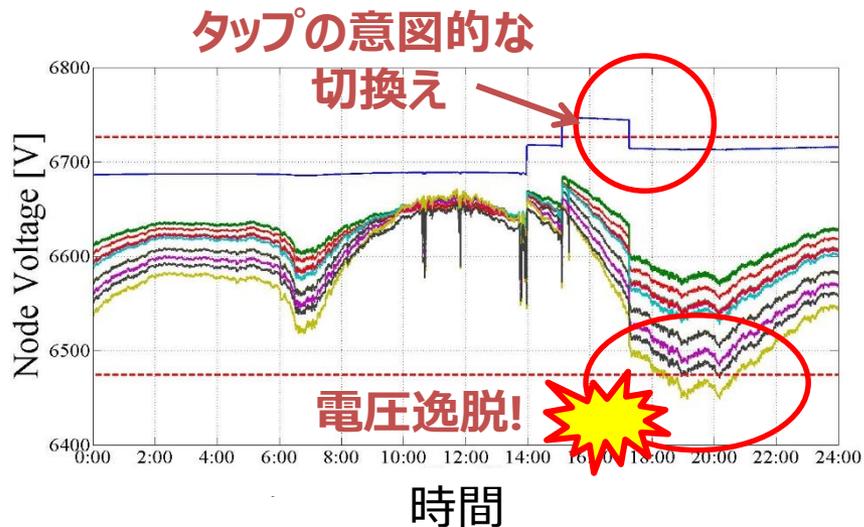
# 東工大 石井SG - 早大 林SG の代表的な研究成果

- 電力システムに対するサイバーセキュリティ手法の開発
- 配電システムの電圧制御に対するデータ改ざん攻撃の検知手法を提案

各ノードでの  
電圧のセンサ値



各ノードでの  
実際の電圧値

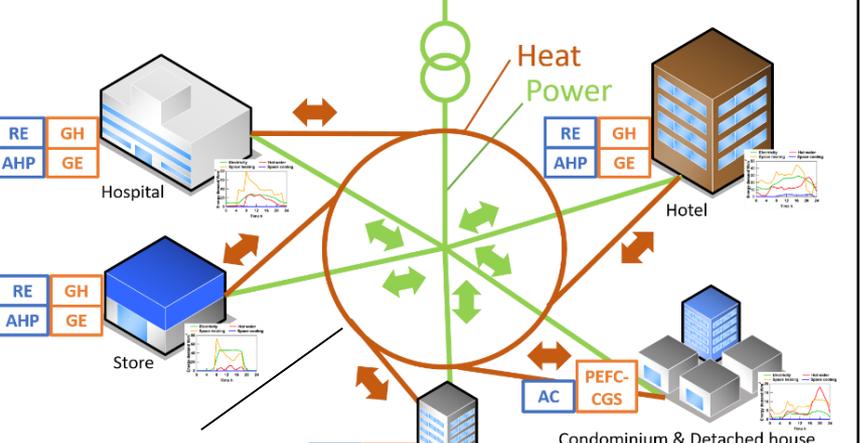


- 再生可能エネルギーの導入に伴い、通信を介した電圧制御の高度化が必要。
- 本研究では、センサデータを改ざんする攻撃に対する脆弱性を指摘
- さらに異常信号に注目し、攻撃を検知する手法を提案

# 早大 HEMS-SGの代表的な研究成果(1/2)

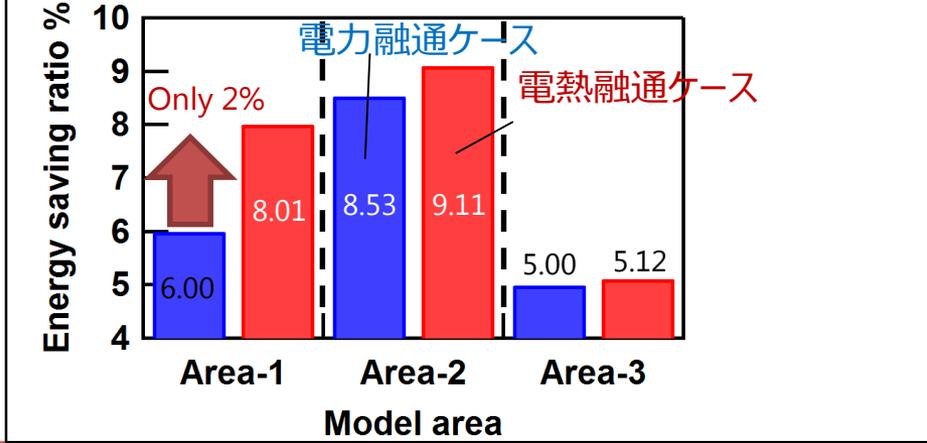
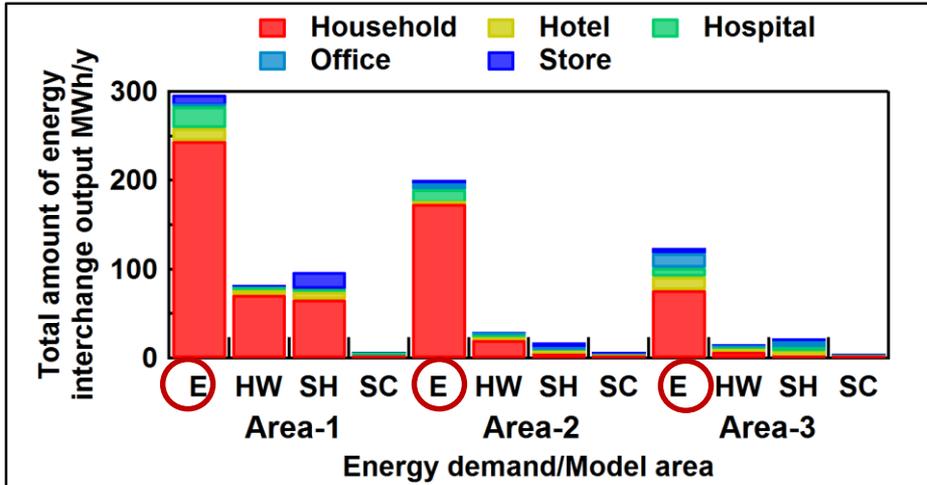
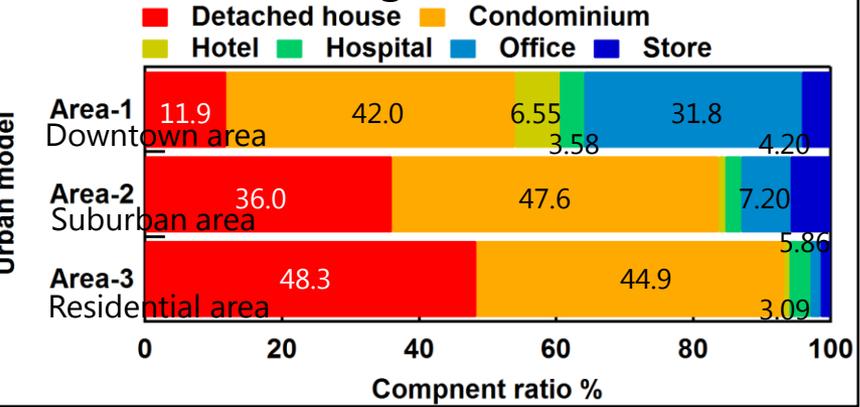
- 分散型CHPが逆潮可, 余剰温水を地域で共有する状況を想定
- 地域での電力・温水融通効果を検証

## Topology of district energy system



Constant loss rate  $\eta_{int}^{loss}$  depending not on amount of heat interchanged

## District case setting



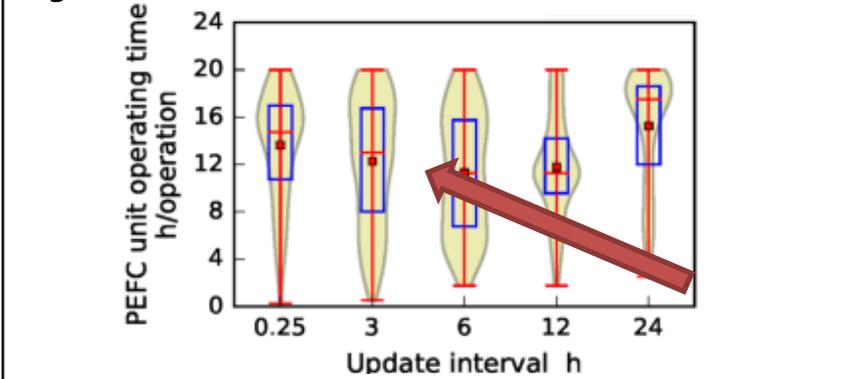
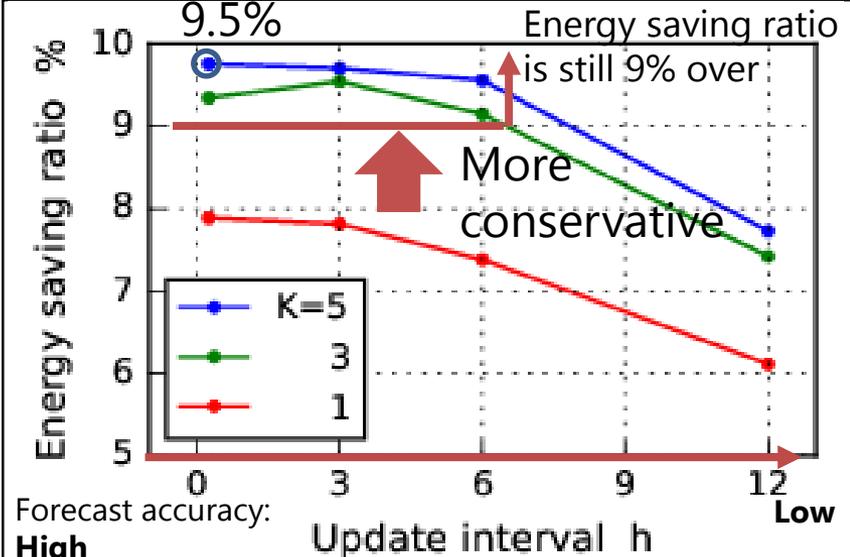
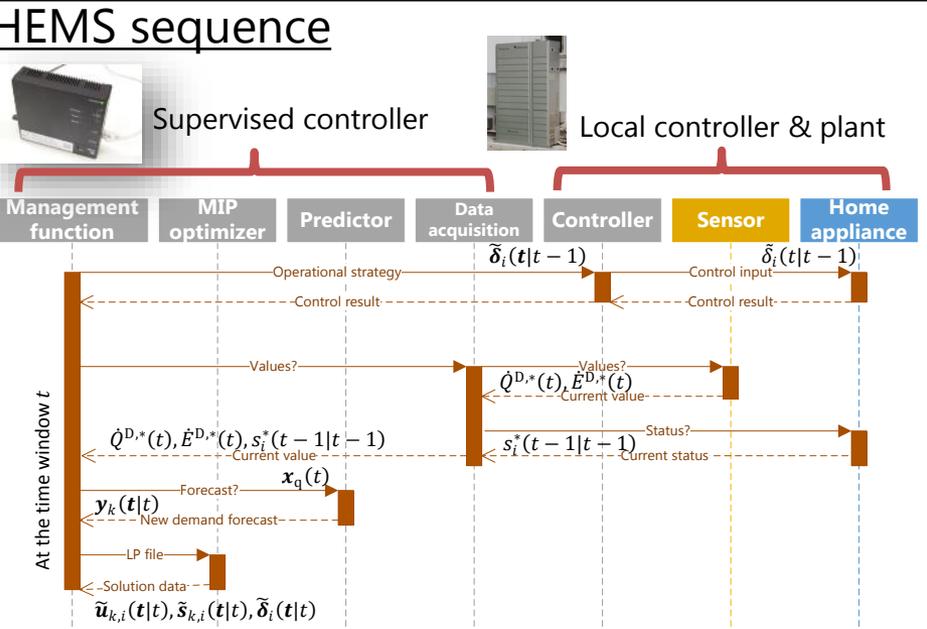
- 電力・温水ともに家庭からの供給が支配的
- 電力融通量 > 温水融通量
- 電力融通効果@Area-2 : 8.5% > 温水融通効果@Area-1 : 2.0%

Harunobu Ikegami, Akira Yoshida, Yoshiharu Amano, *Impact on Energy Saving under Energy Interchanges among Building Concerning Demand Profiles*, Proceedings of ECOS 2017, San Diego, July, 2017.

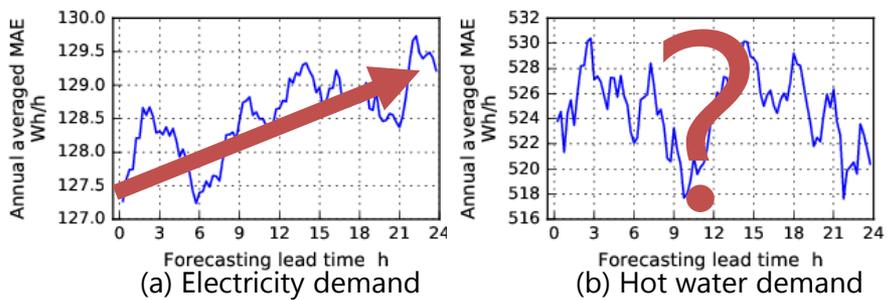


# 早大 HEMS-SGの代表的な研究成果(2/2)

- ホームネットワークを介したHEMSによる家電の監視制御における制御信号発信時間間隔と制御性能の関係性を評価した。



### 予測精度とリードタイムの関係



予測誤差の補償が必要→後退ホライズン制御

- シナリオ本数の多い保守的な運用方策は省エネルギー性高い
- 短周期で運用方策を調整するため、PEFCの運転時間は長期化する → 電熱をPEFCから供給する機会損失を低減する

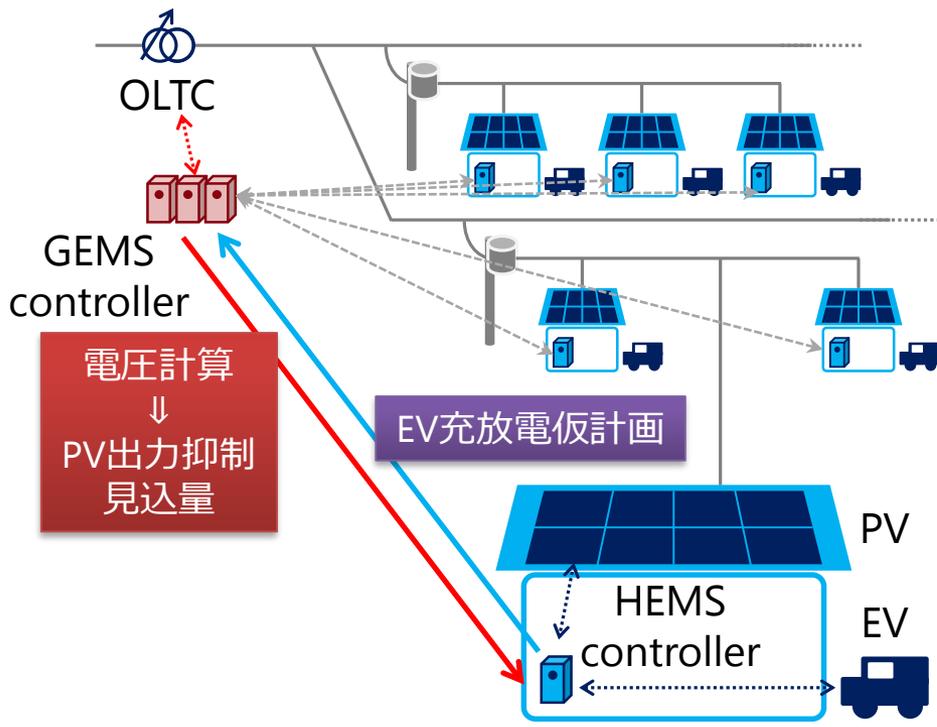


# 名大 稲垣SG - 早大 林SG の代表的な研究成果

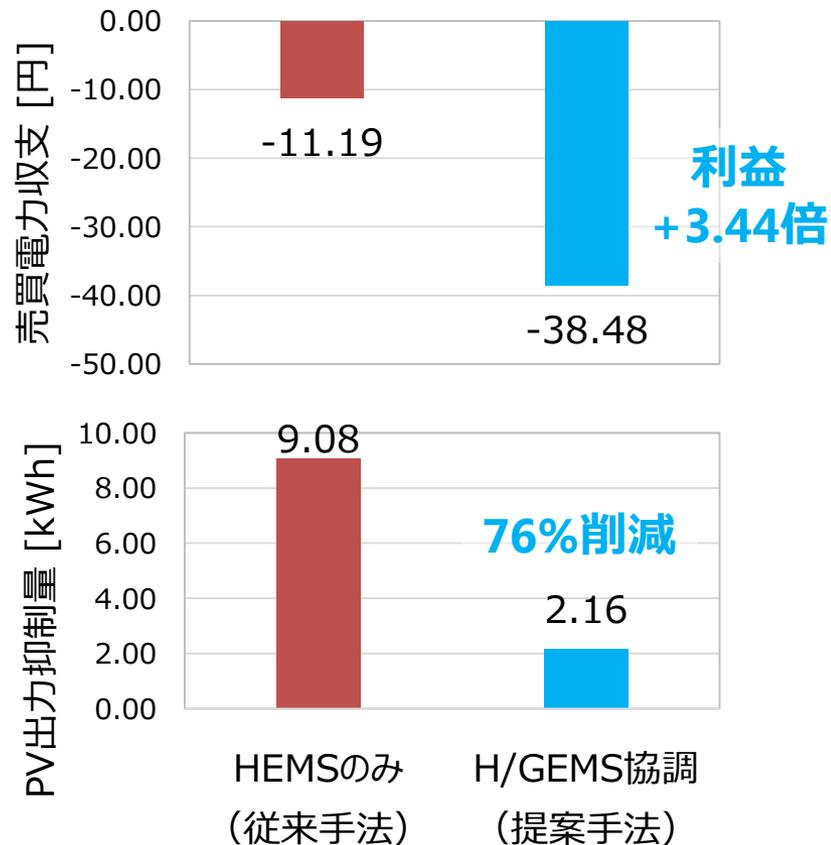
H/GEMS間の情報交換に基づくEVの充放電管理手法の検討

- PV・EV・HEMSの普及が加速する見込み
  - HEMSがEVの充放電を管理することで宅内電力コストを最小化（先行研究多数）
  - 配電系統の電圧制約を考慮したHEMSによるEV充放電管理の検討はされていない

## Grid Energy Management System (GEMS)



## Home Energy Management System (HEMS)



• GEMSとの情報交換に基づいてHEMSがEVの充放電管理を行う手法の提案

**EoF**