



# 分散協調型マルチエージェントシステム

- Distributed Cooperative Control for Multi-Agent Systems -

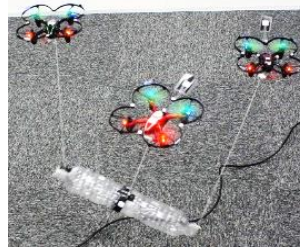
## Multi-Agent Systems

ネットワーク接続された複数機エージェントが情報交換を通し、協調的にタスクを行うシステム

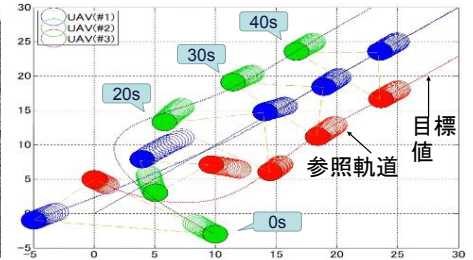
- 優れた効率性 - 短時間等, 作業効率の向上
- 優れた耐故障性 - タスク遂行力の向上

### 応用例

- フォーメーション制御への応用
- 動物の群れ行動の再現
- 環境認識問題への応用



マルチUAV (無人航空機) システムによる協調搬送

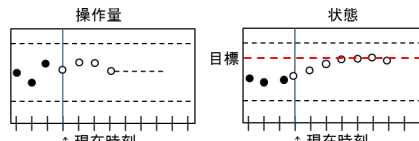
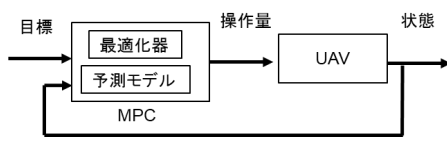


マルチUAVシステム の分散MPCフォーメーション

## Distributed MPC(Model Predictive Control ) Formation

分散MPCを用いたUAV群のフォーメーション制御

- 未来の状態を予測しながら最適化問題を計算しフィードバック



- $\tilde{M}_i$  : 制御入力
- $J_i$  : 評価関数
- $r_i$  : 状態
- $r_{ref_i}$  : 参照状態
- $N_p$  : 予測ホライズン
- $N_c$  : 制御ホライズン

制御入力  $\tilde{M}_i$  を最適化

$$\min_{\tilde{M}_i} J_i = \frac{1}{2} \left[ \underbrace{\hat{r}_i(k + N_p)^T P_i \hat{r}_i(k + N_p)}_{\text{Terminal Cost Func.}} + \sum_{j=1}^{N_p-1} \underbrace{\hat{r}_i(k + j)^T Q_i \hat{r}_i(k + j)}_{\text{State Cost Func.}} + \sum_{j=0}^{N_c-1} \underbrace{\tilde{M}_i^T(k + j) R_i \tilde{M}_i(k + j)}_{\text{Input Penalty}} \right]$$

$P_i, Q_i, R_i$ : 重み行列

状態の目標偏差

$$\hat{r}_i(j) = r_i(j) - r_{ref_i}(j)$$

## Distributed Event-Triggered Formation

フォーメーション制御入力の更新頻度を減らす

- 安定性を保証しながらエージェントの計算・通信負荷を低減

エージェントモデル

$$x_i(k+1) = Ax_i(k) + Bu_i(k), \quad i \in \mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$$

他エージェント情報を用いた制御入力

$$\begin{cases} u_i(k) = -K \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (\hat{x}_i(\tau_l) - \hat{x}_j(\tau_l)), & k \in \{\tau_l, \tau_l + 1, \dots, \tau_{l+1} - 1\} \\ \hat{x}_i(k) = x_i(k) - d_i \end{cases}$$

制御入力更新条件

$$\begin{cases} V(k) = (x(k) - (x_{N+1} + d))^T (I_N \otimes P) (x(k) - (x_{N+1} + d)) \\ \tau_{l+1} = \min\{t : V(t+1) \geq V(\tau_l), t > \tau_l\} \end{cases}$$

$\mathcal{N}$ : エージェント群

$N$ : エージェント数

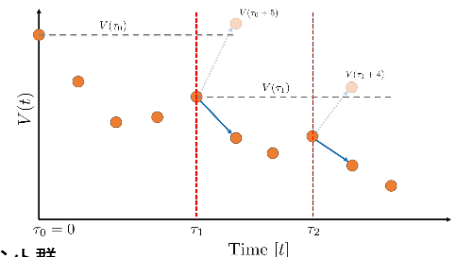
$K$ : 制御ゲイン

$\mathcal{N}_i$ : 隣接エージェント集合

$\tau_l$ : 番目の制御入力更新時刻

$d_i$ : 目標偏差

$x_{N+1}$ : リーダーの状態



研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 小谷 健人 / 学部生 秋山 正道

お問合せ先

Email: namerikawa@sd.keio.ac.jp TEL: 045-566-1731

URL : http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/



# CPHSにおけるサイバーセキュリティ

-Cyber Security for Cyber-Physical-Human Systems-

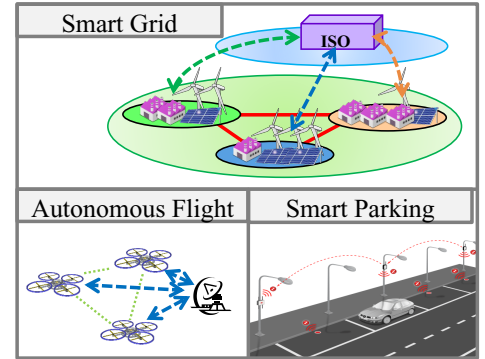
## サイバーフィジカルヒューマンシステム (CPHS)

■ 現実世界に点在する「もの」がIoTの技術革新により「システム化」

▶ ICT・IoT技術を最大限活用し、サイバー空間と実空間との融合

■ CPHSに対するサイバー攻撃 → **実システムの破壊**に繋がる恐れ

▶ CPHSにおけるサイバー攻撃に対する頑健性の確立



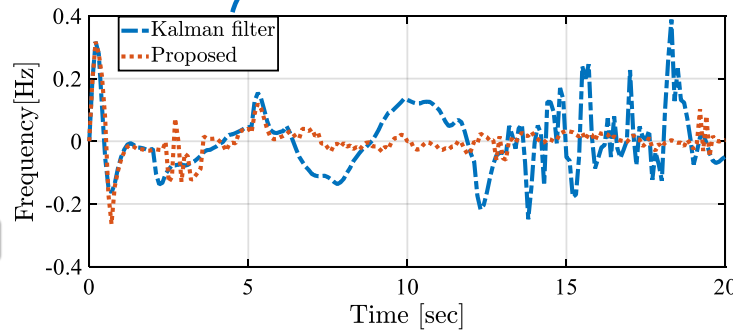
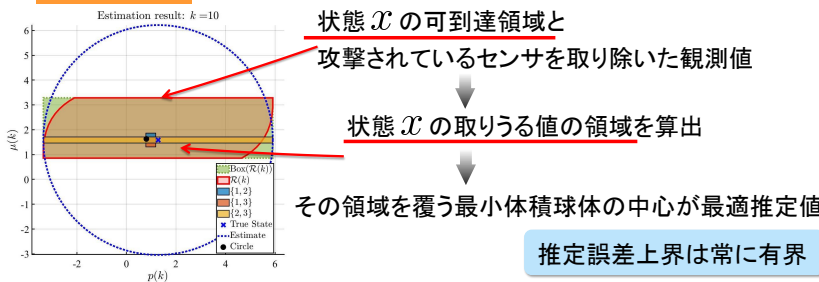
Examples of Cyber-Physical-Human Systems

## 観測値攻撃にレジリエントな電力システムの構築

**目的** 観測値への攻撃存在下においても**周波数を安定に保つ**

**アプローチ** 攻撃存在下においては**状態可到達領域に基づいた推定器へ切り替える**

攻撃存在下においても周波数を安定に保っている



## 分散オブザーバセキュア状態推定問題

■ 大規模システムは複数のローカルシステムから構成 → 本質的には**分散システム**

■ 各オブザーバは**局所観測値**のみ観測可能 → 他のオブザーバと**通信**することで**システム全体の状態**を推定

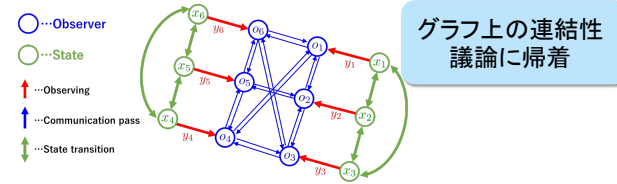
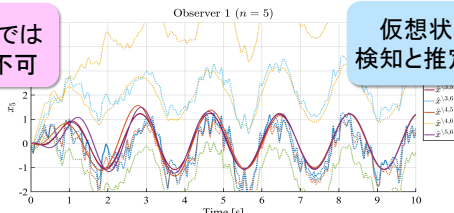
■ 攻撃が存在する環境における**状態推定問題**

**アプローチ** → **仮想状態 (Virtual-State)** + **グラフィカル分散オブザーバ**

- あるオブザーバ  $e$  を除外した上での**状態推定値**  $\hat{x}^e$
- 各分散オブザーバ上に**複数の仮想状態**を生成
- 仮想状態を比較することで**被攻撃オブザーバの特定**と**状態真値の推定**

- **オブザーバ通信構造と可観測性**をグラフで一括表現
- 分散オブザーバ問題を**グラフ連結性**に落とし込むことが可能
- **状態行列と出力行列**によって状態パスと観測パスが決定

通常推定値では検知・推定不可  
仮想状態により検知と推定を可能に



Graphical Distributed Observer

仮想状態  $\hat{x}^{2,5}, \hat{x}^{3,5}, \hat{x}^{4,5}, \hat{x}^{5,6}$  が一致 → **被攻撃オブザーバの特定 (攻撃検知) とセキュア状態推定**を達成

研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 佐藤 正太郎 / 学部生 宮崎 寛之

お問合せ先

E-mail : namerikawa@sd.keio.ac.jp TEL : 045-566-1731

URL : http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/





# スマート交通システム

## -Smart Transport System-

### 交通渋滞

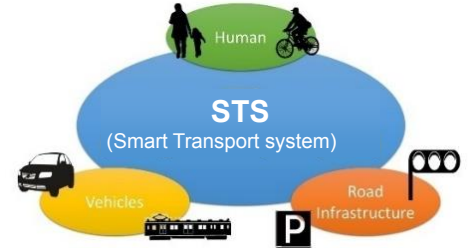
- ・ 経済損失
- ・ 環境汚染
- ・ 交通事故要因



### ITS

人・乗り物・自動車間で  
情報交換して渋滞抑制

ソフト面からの交通渋滞抑制施策



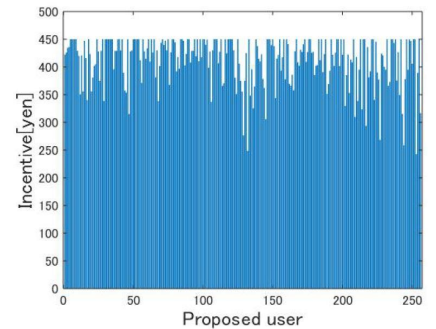
### カーシェアリング



- ユーザーがいつどこからどこへ行きたいという交通需要を制御
- インセンティブによるシステムの稼働率の向上

### メカニズムデザイン

- ユーザーの虚偽申告を防ぐ
- 駐車場の車両台数の偏りを防ぐための適切なインセンティブ設計

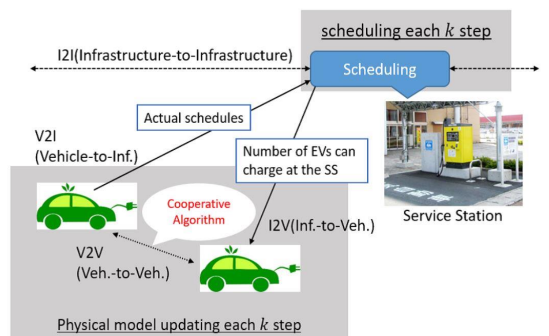


ユーザーに好ましいインセンティブ設計

### 電気自動車の充電スケジューリング

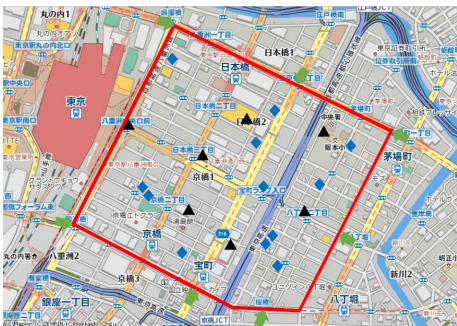
- 誰がいつどのくらい充電するかを計画するアルゴリズムの開発
- 各電気自動車は利己的な行動をする(現実的なシチュエーション)
- 充電ステーションの利益を考慮する

マッチング理論/ゲーム理論を用いた  
アルゴリズムの提案



### スマートパーキングシステム

空きの駐車場の探索に伴う車両の速度の低下による交通渋滞

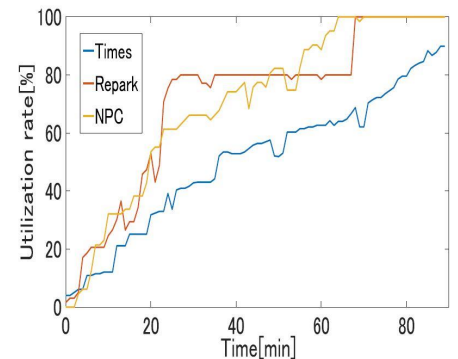


### スマートパーキングシステム

- ドライバーに適切な駐車場を割り当て、駐車場の探索時間を短縮
- ドライバーと駐車場管理者の要望を考慮して駐車場割当てを決定

### マッチング理論

- それぞれの独立した意思決定を反映したマッチングを構成



適切な駐車場割り当てを実現

研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 佐々木 駿, 中里 拓哉 / 学部生 河野 明莉

お問合せ先

E-mail : [namerikawa@sd.keio.ac.jp](mailto:namerikawa@sd.keio.ac.jp) TEL : 045-566-1731

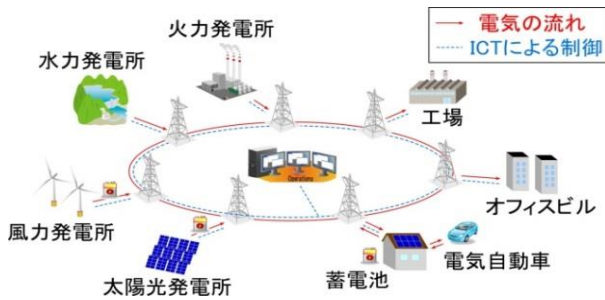
URL : <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>



# エネルギーネットワークの制御

- Control in Energy Network -

## 電力システムの周波数制御



再生可能エネルギー電源の導入拡大  
問題点: 天候状況による発電量の変動

需給バランスの維持が困難 = 周波数変動

周波数制御の必要性

周波数変動を検知し、発電機と蓄電池に出力指令値変更

$$x_i(t+1) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + F_i w_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{ij} x_j(t)$$

複数のエリアの周波数を分散的に制御する

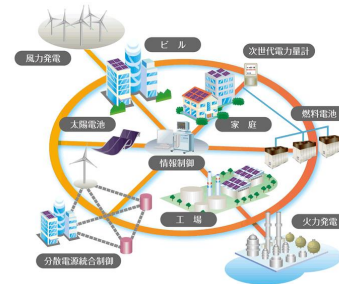
- 周波数変動の抑制
- モデル予測制御によって入力と状態の制約を陽に扱う
- 計算負荷の考慮

## 分散型電源の発電量最適化

従来: 電力会社による集中制御  
問題点: 長距離走電による電力損失、電力システムの耐久性

従来システム+マイクログリッドから成るスマートグリッドが注目

複数の意思決定者



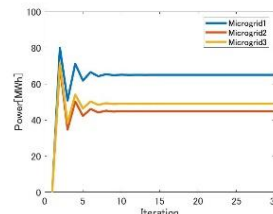
本研究

- 各マイクログリッドが発電量を分散的に更新  
→ 収束した値を最適発電量とする

ナッシュ均衡点

ゲーム理論を用いて  
非協力的に決定

シミュレーション結果



各マイクログリッドが  
ナッシュ均衡点と  
なる発電量を決定

研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 水野 敬介 / 学部生 藤江 祐哉

お問合せ先

E-mail : [namerikawa@sd.keio.ac.jp](mailto:namerikawa@sd.keio.ac.jp) TEL : 045-566-1731  
URL : <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>



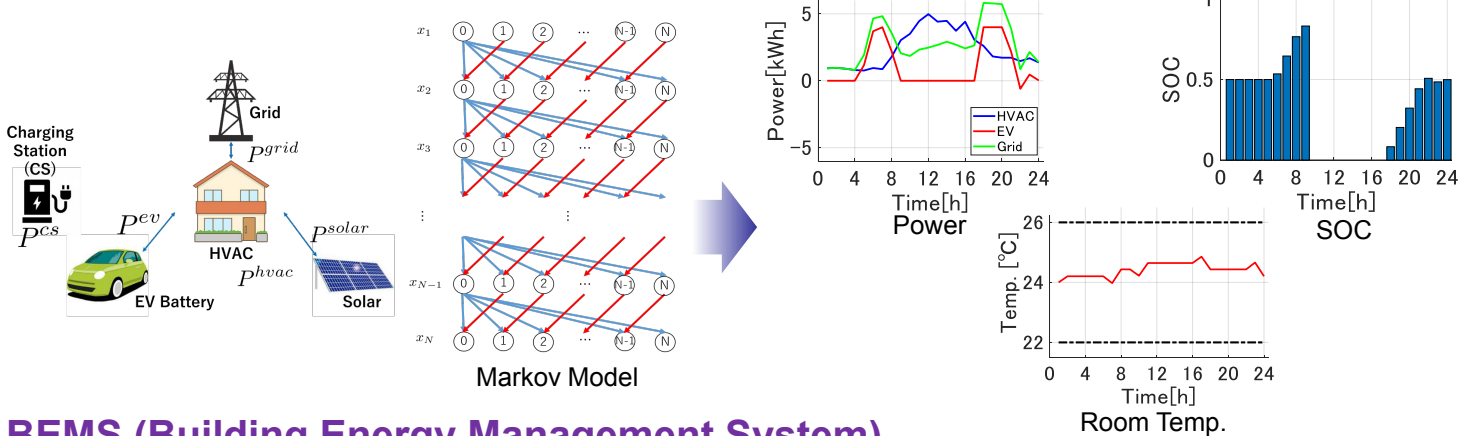
# エネルギーマネジメントシステム

- Energy Management System -

## HEMS (Home Energy Management System) 空調管理 + バッテリマネジメント

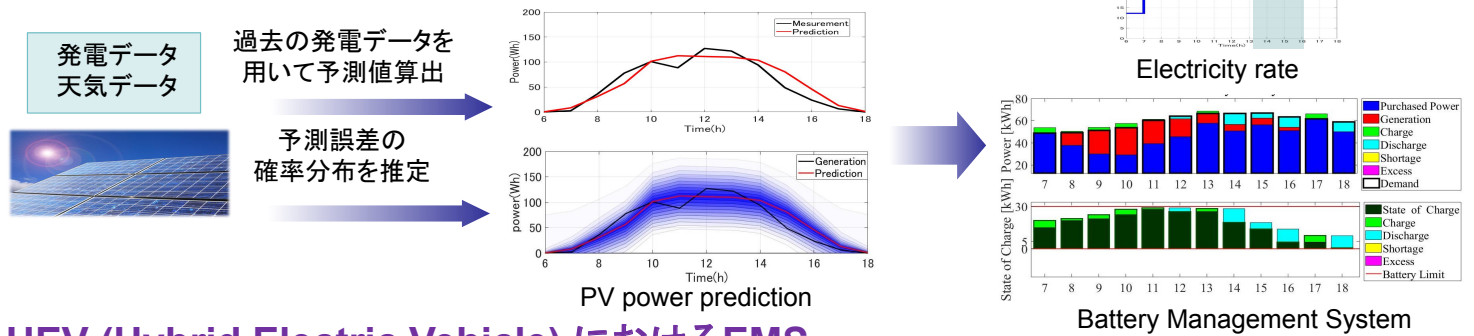
- EV (電気自動車)のバッテリーの充放電にはある程度の時間が必要
- 家庭のエネルギーマネジメントを最適に行うためにEVのバッテリーを蓄電池として活用

EVの利用予測を導入した  
HEMS手法の提案



## BEMS (Building Energy Management System)

- 過去のデータから1日先の太陽光発電量を予測
- バッテリーを活用してピークカットを達成することで、電力料金を削減



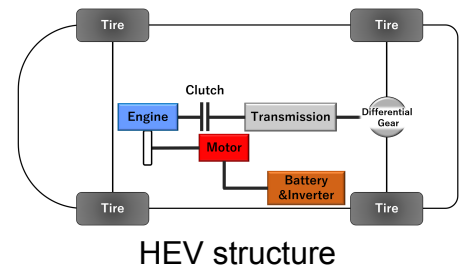
## HEV (Hybrid Electric Vehicle) におけるEMS

HEV : モーターとエンジンの二つの動力を備えた自動車

- パワートレインが複雑である
- バッテリー容量に制限がある

パワートレインを適切に制御する必要性

バッテリーからの電力を最大限活用して  
燃費・排ガス量の改善を目指す



研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 小方 裕貴, 山内 賢 / 学部生 佐藤 友里奈

お問合せ先

E-mail : [namerikawa@sd.keio.ac.jp](mailto:namerikawa@sd.keio.ac.jp) TEL : 045-566-1731  
URL : <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>

Keio University

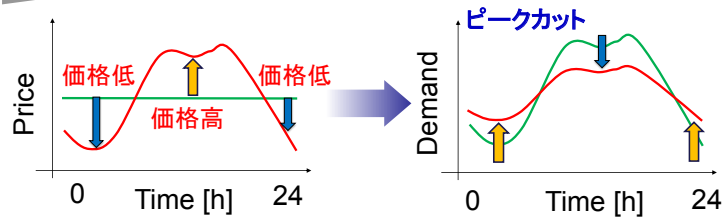




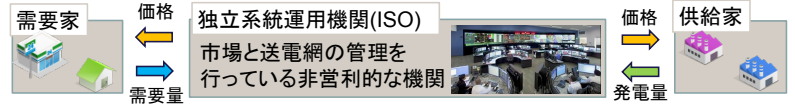
# 電力網のダイナミックプライシング

## -Dynamic Pricing for Power Network-

### ダイナミックプライシング

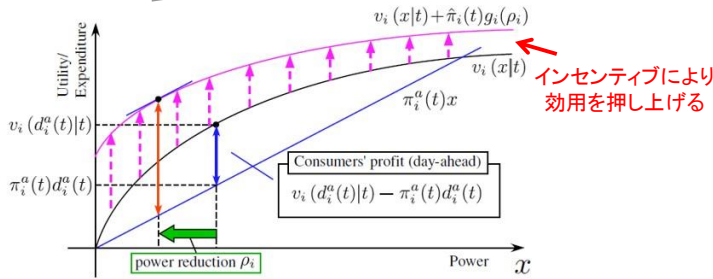


### 3つの参加者(プレーヤー)



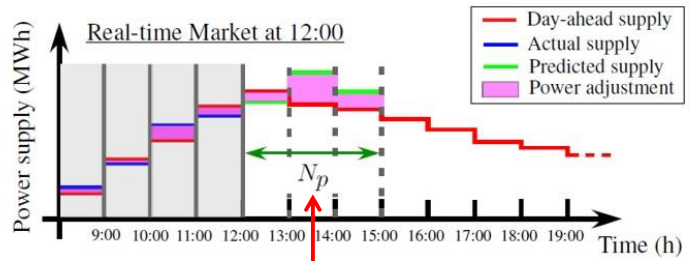
- ・利己的に行動する需要家と供給家が参加する電力市場
- ・電力料金を時間帯毎に変化させて需給量を調整

#### ポイント1 → ネガワット取引に基づく需要調整



インセンティブ付与による需要削減の促進

#### ポイント2 → 発電予測に基づく蓄電池による需給調整



Npステップ先までの発電量予測情報を加味して需給量調整

未来の発電予測情報を考慮した需給調整

### 反復入札による入札価格と電力配分の最適化

#### ISOの解く問題

$$\max_{d,s,\theta} b_d^T d - b_s^T s - \sum_{i=1}^N f_i(\theta_i)$$

総需要家の総支払額 (Consumer's total payment)  
 総供給者の総支払額 (Supplier's total payment)  
 電力潮流に関するペナルティ (Penalty for power flow)

$$s.t. \quad A_s s + B \theta = A_d d, \quad \text{電力網における地域間潮流量を含む電力需給バランス}$$

$$0 \leq d_n, \quad \forall n \in \mathcal{C}, \quad \text{需要量制約}$$

$$0 \leq s_n, \quad \forall n \in \mathcal{G}, \quad \text{供給量制約}$$

$$-\theta_i^{\max} \leq \theta_i \leq \theta_i^{\max}, \quad \forall i \in \mathcal{B}, \quad \text{電圧位相角制約}$$

$$|B_{ij}(\theta_i - \theta_j)| \leq P_{ij}^{\max}, \quad (i, j) \in \mathcal{N}_{ij}, \quad \text{送電電力量制約}$$

#### ゲーム理論に基づく解析

$$\max_{d,s,\theta} \sum_{n=1}^{N_c} U_n(d_n) - \sum_{n=1}^{N_g} C_n(s_n) - \sum_{i=1}^N f_i(\theta_i)$$

社会全体の利益が最大となる解が求まる

$$W_{dn}(b_{dn}, d_n^*(b_{dn}, b_{d(-n)}^*, b_s^*)) \leq W_{dn}(b_{dn}^*, d_n^*(b_{dn}^*, b_s^*)), \quad \forall n \in \mathcal{C}, \quad \text{入札価格がナッシュ均衡点となる}$$

$$W_{sn}(b_{sn}, s_n^*(b_{sn}, b_s^*(-n), b_d^*)) \leq W_{sn}(b_{sn}^*, s_n^*(b_{sn}^*, b_d^*)), \quad \forall n \in \mathcal{G}.$$

$$d_n^* = \arg \max_{0 \leq d_n} W_{dn}(b_{dn}^*, d_n), \quad \forall n \in \mathcal{C}$$

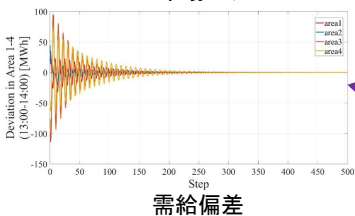
$$s_n^* = \arg \max_{0 \leq s_n} W_{sn}(b_{sn}^*, s_n), \quad \forall n \in \mathcal{G}$$

各個人(需要家/供給者)の利益が最大化

入札と電力配分を反復的に行うことで社会全体の利益が最大となる最適解を分散的に導出

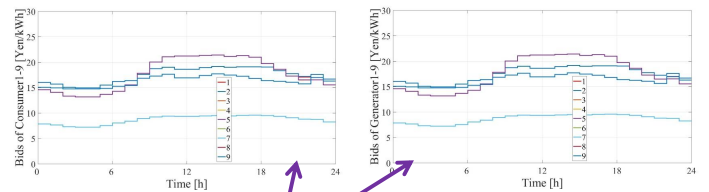


市場モデル



需給一致を達成

需給偏差



需給状況に応じた最適な入札価格を導出

需給偏差

社会全体の利益最大化を分散的に達成

研究者名

システムデザイン工学科 / 総合デザイン工学専攻 教授 滑川 徹

大学院生 加藤 佑介 / 学部生 北村 俊徳

お問合せ先

E-mail : namerikawa@sd.keio.ac.jp TEL : 045-566-1731

URL : http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/