

最適化ワークショップ  
整数計画法の発展と応用  
九州大学 伊都キャンパス  
2013/05/23

# スマートシティへの展開に向けた ピーク電力削減技術

岩根 秀直 ((株) 富士通研究所)

- 富士通の取り組み
- ピーク電力削減のための  
ノートPCバッテリー制御
  - 電力需要曲線予測
  - 充放電制御計画立案

# 富士通の取り組み

<http://jp.fujitsu.com/journal/category/hcis/>  
[http://jp.fujitsu.com/journal/solutions/2011/hcis\\_04-2.html](http://jp.fujitsu.com/journal/solutions/2011/hcis_04-2.html)

## ヒューマンセントリック・インテリジェントソサエティの実現

業務効率

健康

食

安心

安全

エネルギー

環境



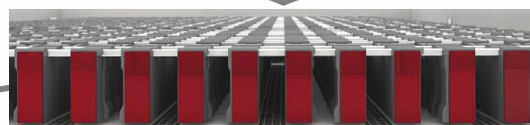
実世界



価値ある  
しくみ提供

人、様々なデバイスからの情報  
(センサー、携帯、機器)

状況に応じた  
サービス提供



クラウドでの融合

人間を中心とした ICT を通じて、実世界に繋がる新たな価値を創出

# 東日本大震災の影響

## ■ 電力供給不足

### ■ 輪番停電を経験



<http://www.tepco.co.jp/tepconews/pressroom/110311/index-j.html>

### ■ 電気事業法第27条による使用制限発動

- ・大口需要家にピーク電力の15%削減要請

## ■ 電力供給源の見直し

### ■ 原発の減少(ベース電力減少)

### ■ 火力の増加(CO<sub>2</sub>増加)

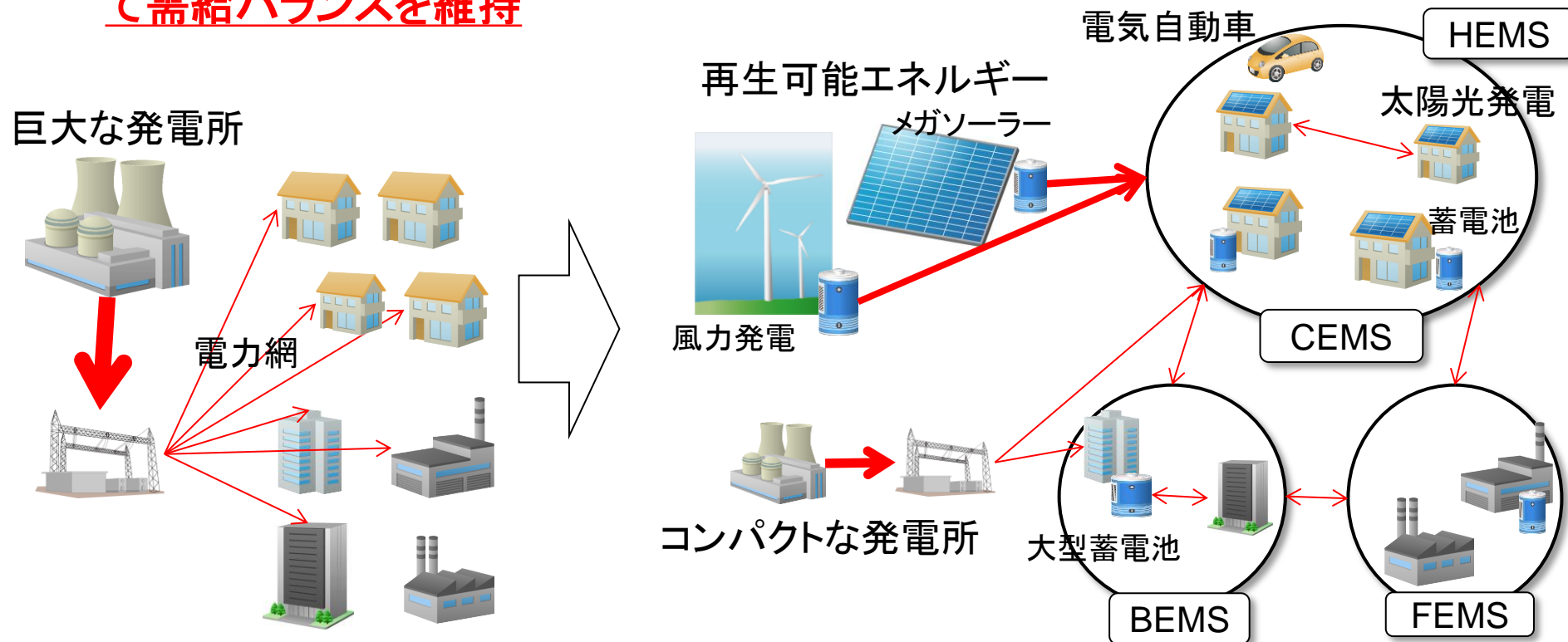
### ■ 再生可能エネルギー増加(不安定)



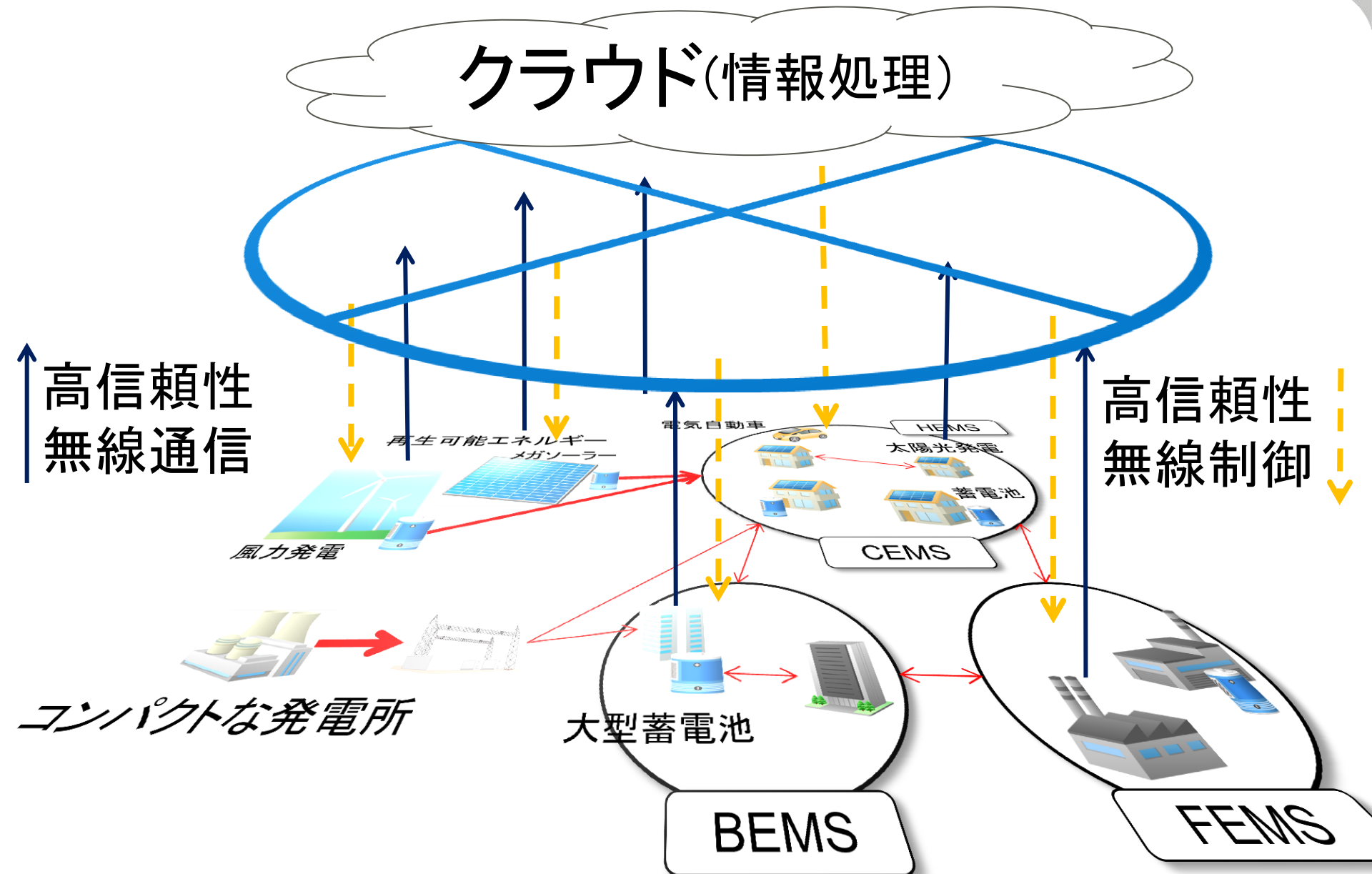
<http://www.asahi.com/special/10005/TKY201103170561.html>

# 今後のエネルギー管理システムの変化

- 電力自由化が進み、電力を自由に売買  
⇒ 同じ目的や利益を共有するコミュニティ単位でエネルギーを管理
- エネルギー管理システム(EMS)
  - 従来の集中型: 巨大な発電所の供給量を調整して、需給バランスを維持
  - 分散型へ: コミュニティ単位でエネルギーを管理しつつ コミュニティ間で協調して需給バランスを維持



# 今後のエネルギー管理システムの変化



# ピーク電力削減のための ノートPC/バッテリー制御

株式会社富士通研究所

ソフトウェアシステム研究所

ヒューマンセントリック研究所

ITシステム研究所

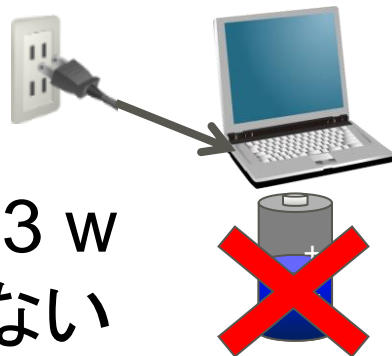
<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2011/12/14-2.html>



- 総使用電力量の削減からピーク電力の削減へ
  - 蓄電池を用いたピーク電力削減
- ノートPCのバッテリーを蓄電池として利用
  - ネットワークから操作できる蓄電池
  - 新たな投資が不要
  - 例：バッテリーの容量 65 Wh
    - 1000 台で 65 kWh
      - 25～50 万円 / kWh
    - 最大10kW 程度のピーク電力削減を実現可能

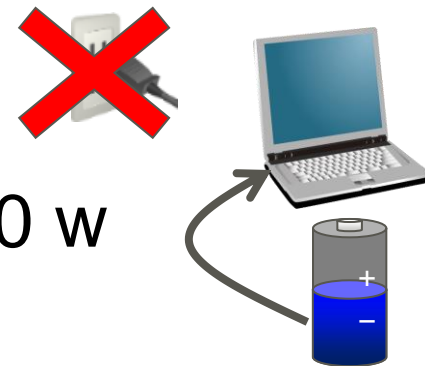
# バッテリーの電源モード

## ■ Ac



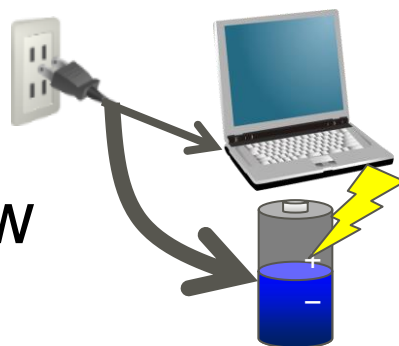
使用電力: 13 w  
残量: 変化しない

## ■ Battery

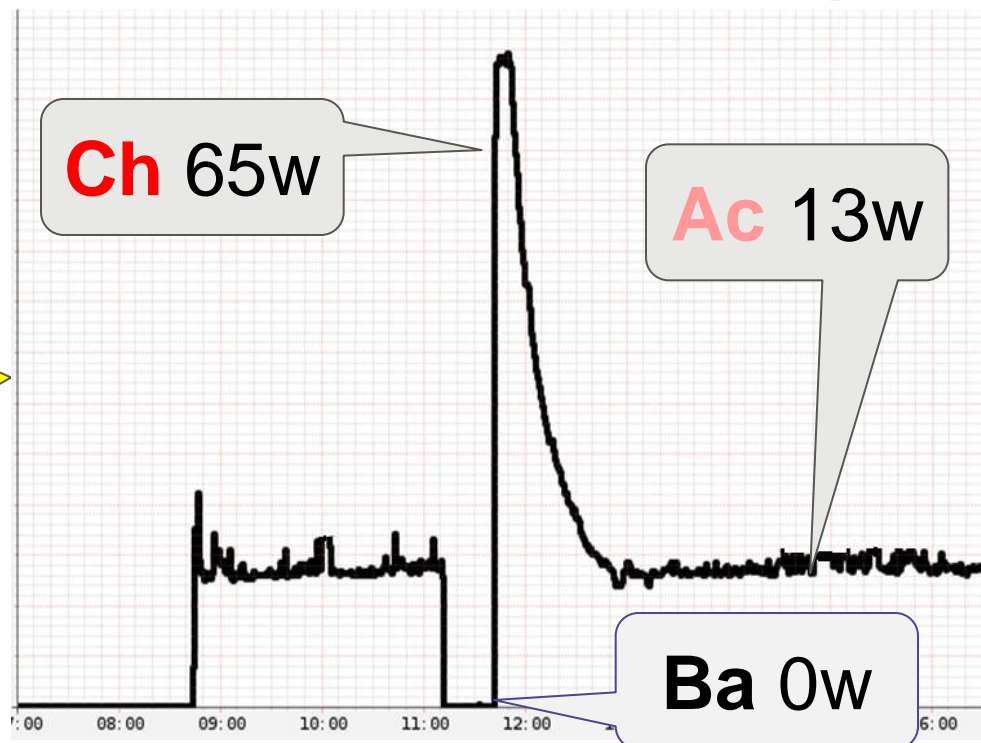


使用電力: 0 w  
残量: 減

## ■ Charge



使用電力: 65w  
残量: 増



# 個人レベルでのピークシフト

## ■ ピークシフト設定ユーティリティ(富士通製PC)

■ ピークシフトの有効時間帯を設定

■ 各社から同様の製品

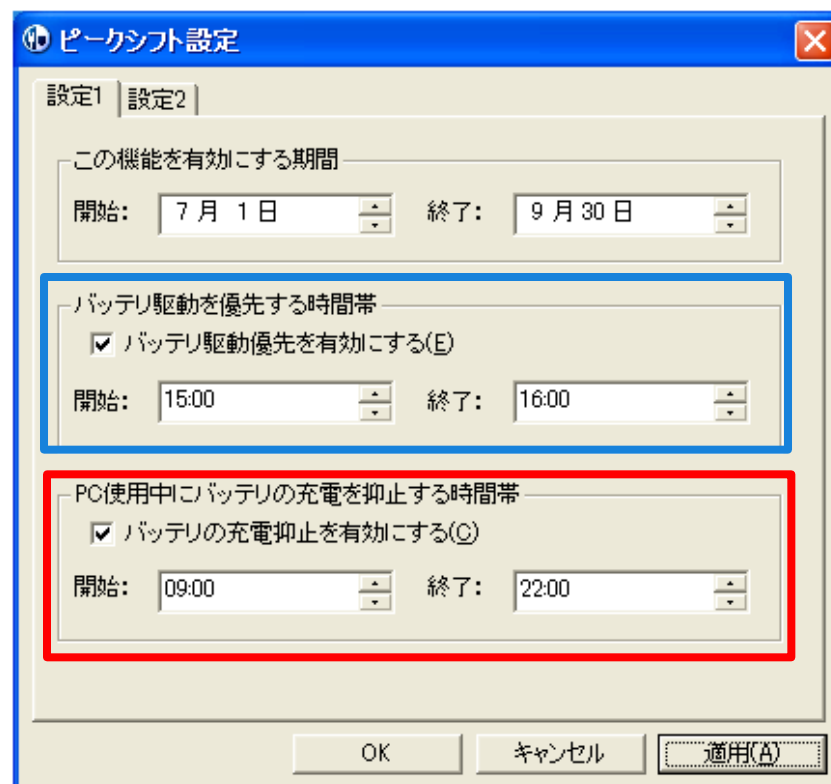
## ■ 設定可能な項目

■ バッテリ駆動時間帯(= Ba)

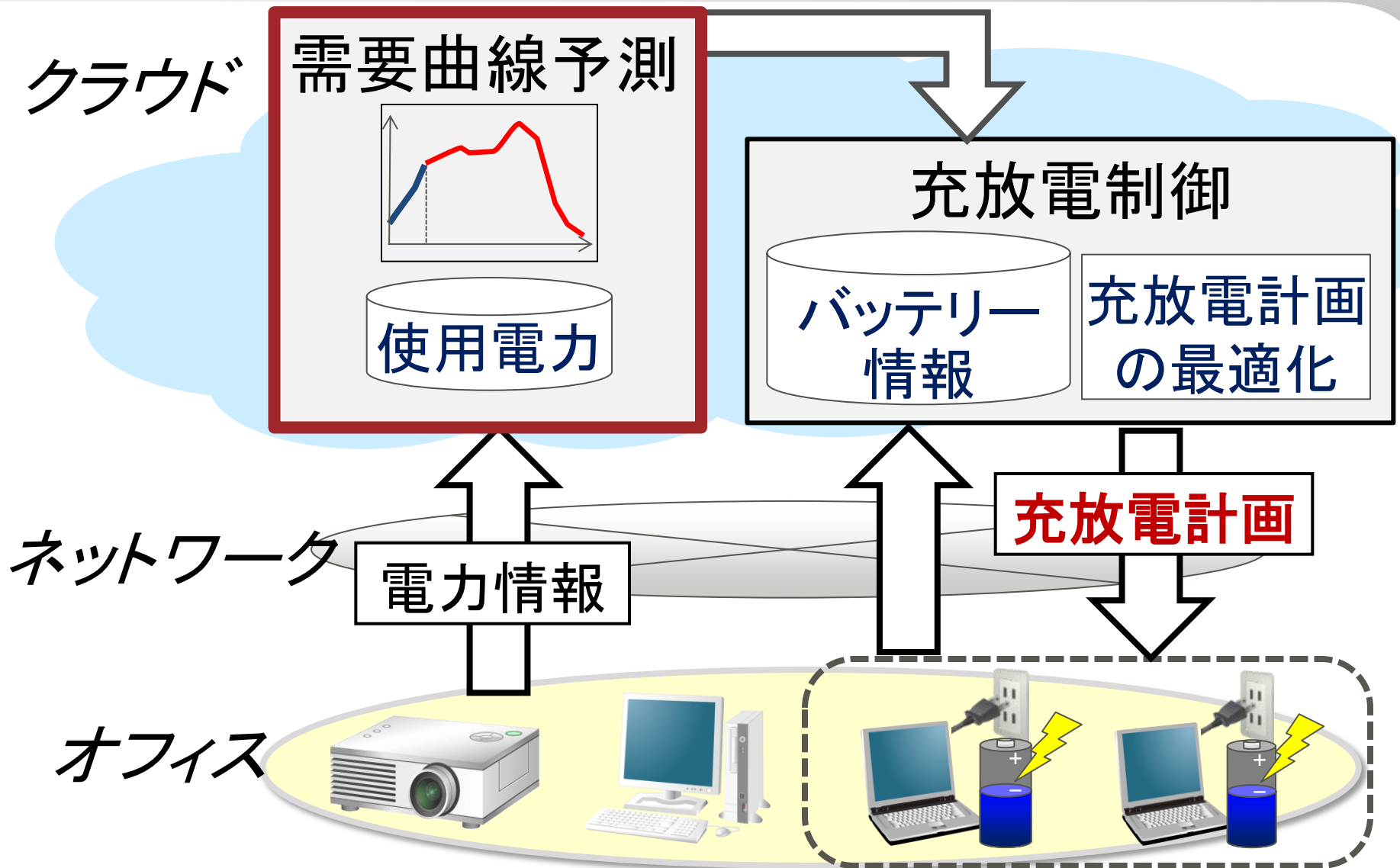
- 残量低下時は、Ac で動作

■ 充電抑止時間帯(≠ Ch)

- Ac で動作し、充電は抑止



# システム構成



# 電力需要予測

■ 高橋悟、山根昇平、吉田由起子、園田俊浩、  
湯上伸弘、竹林知善

■ 見える化の効果

■ 電力需要曲線の予測

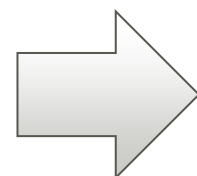
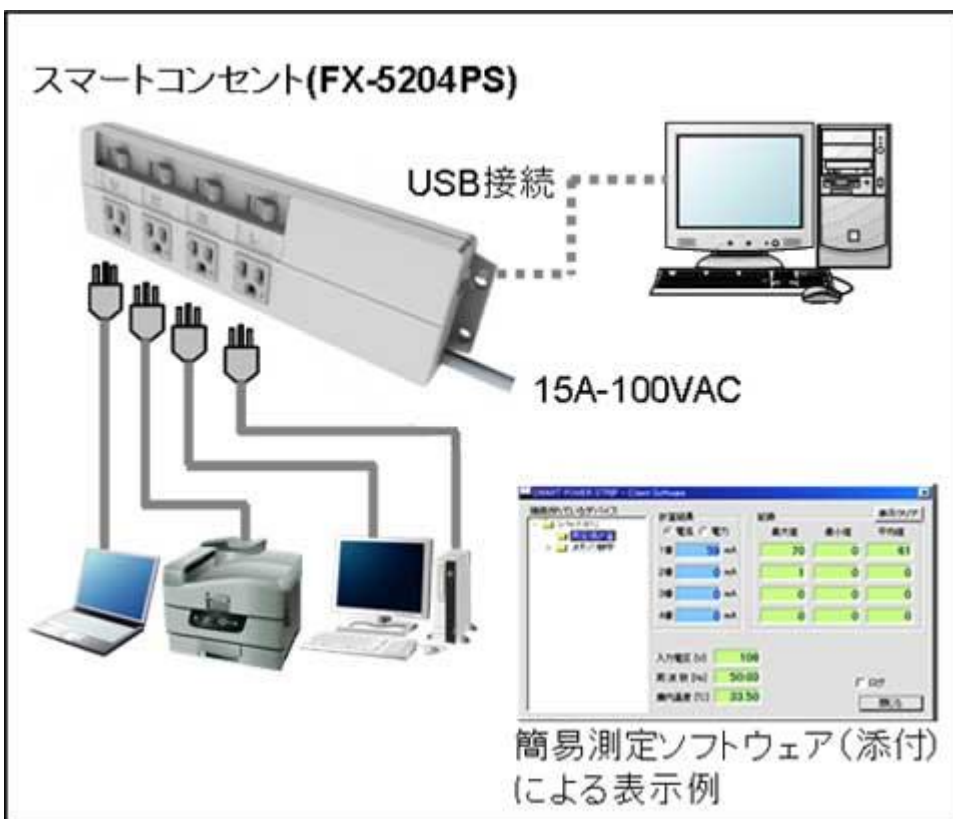
■ 実証実験結果

第12回 計測自動制御学会 制御部門大会 (2012)  
「スマートシティのエネルギー管理における  
需要予測技術」

# 電力需要予測の必要性

■ 見える化だけでも、節電効果

■ スマート電源コンセント



ユーザビュー

ユーザ毎の  
使用電力の見える化

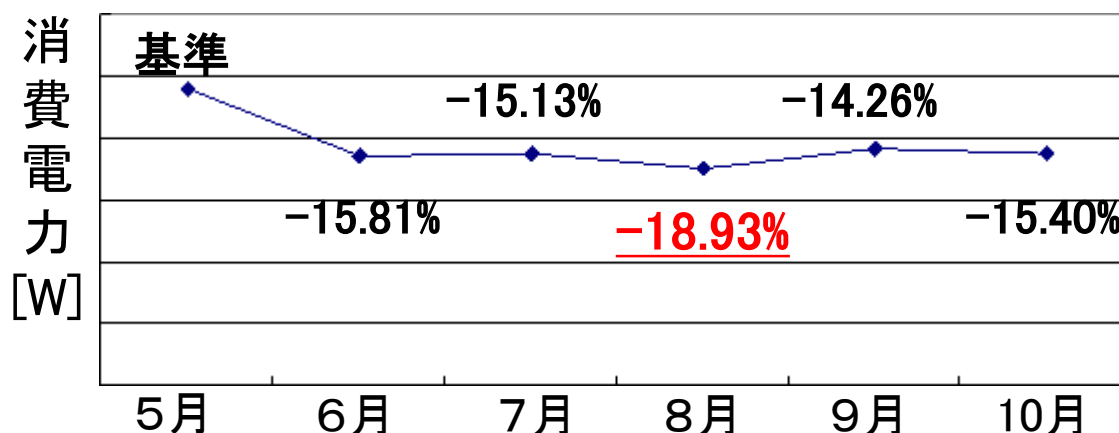
# 見える化による効果

## ■ 月別の一日当たりの消費電力量の比較

■ 2010/06/01 にユーザビューを公開

■ 消費電力量を平均 15% 削減(最大 18.93%)

- リバウンドなし (震災前の実験)
- 自主的に省エネを意識した行動(LCDの電源断等)に



# ピークシフトのための予測

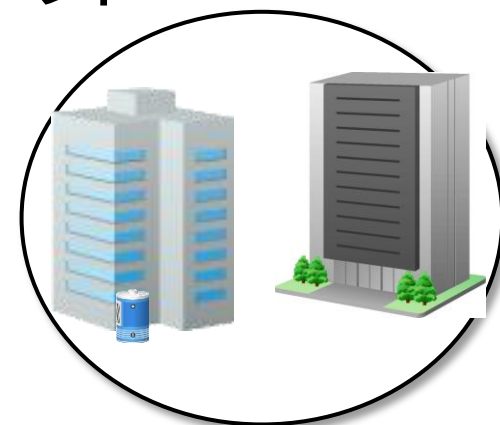
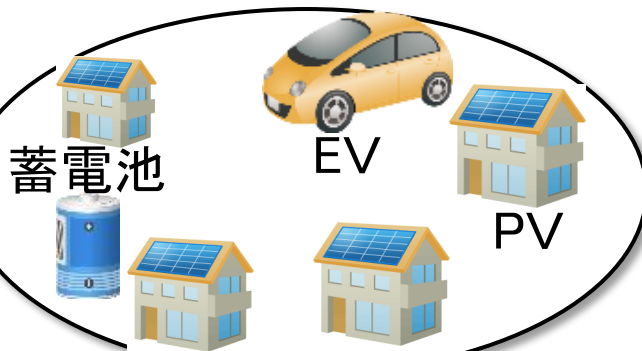
## ■ 震災前

- 総消費電力を予測し、電力会社が**供給量**を調整
- 供給予備力確保のために**ピーク電力予測**が重要

## ■ 今後：スマートシティ

- コミュニティ単位で**電力需要曲線**を予測
- 予測に基づき蓄電池を用いてピークシフト

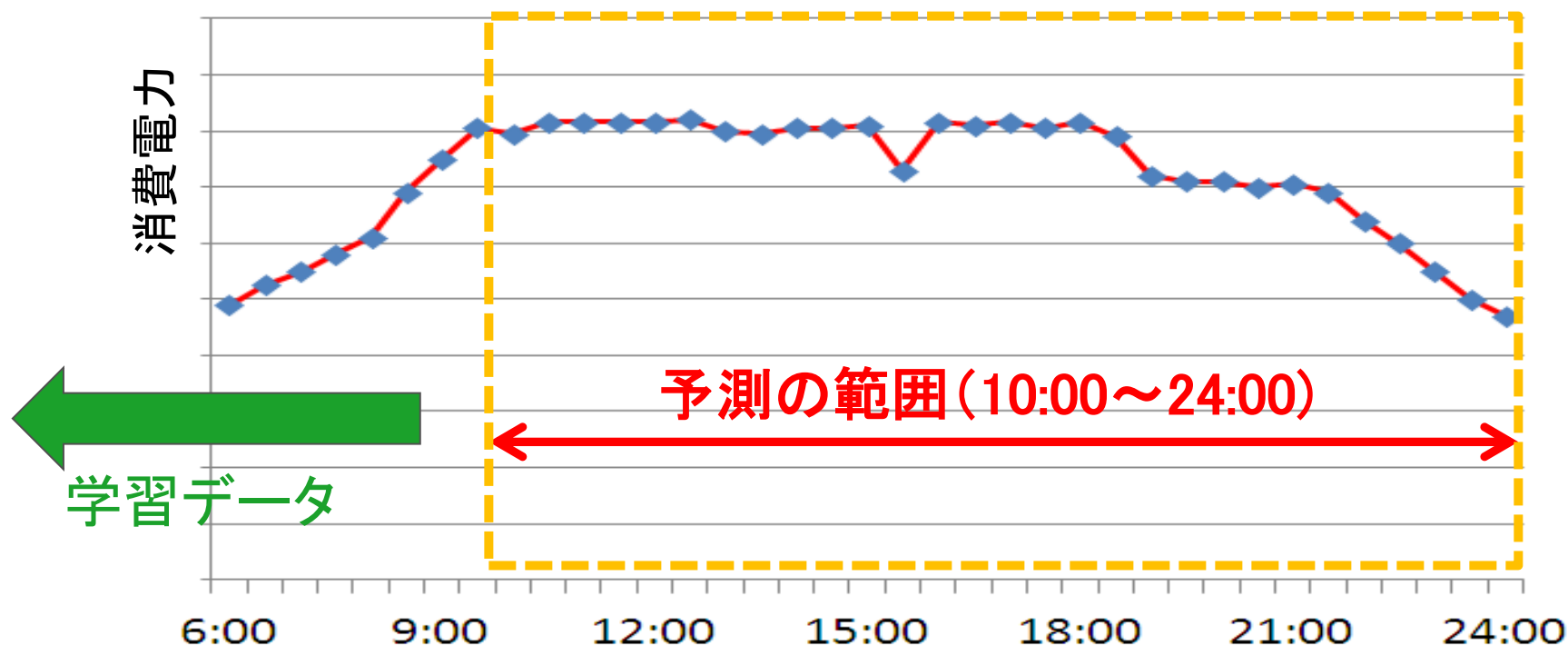
コミュニティ





# 需要曲線予測の条件

- 対象：事業所（＝コミュニティ）
- 期間：対象日の 10:00-24:00
- 学習データ：対象日の 9:00 までのデータ



# 需要曲線予測の課題

## ■ 事業所規模での予測

■ 規模が小さい

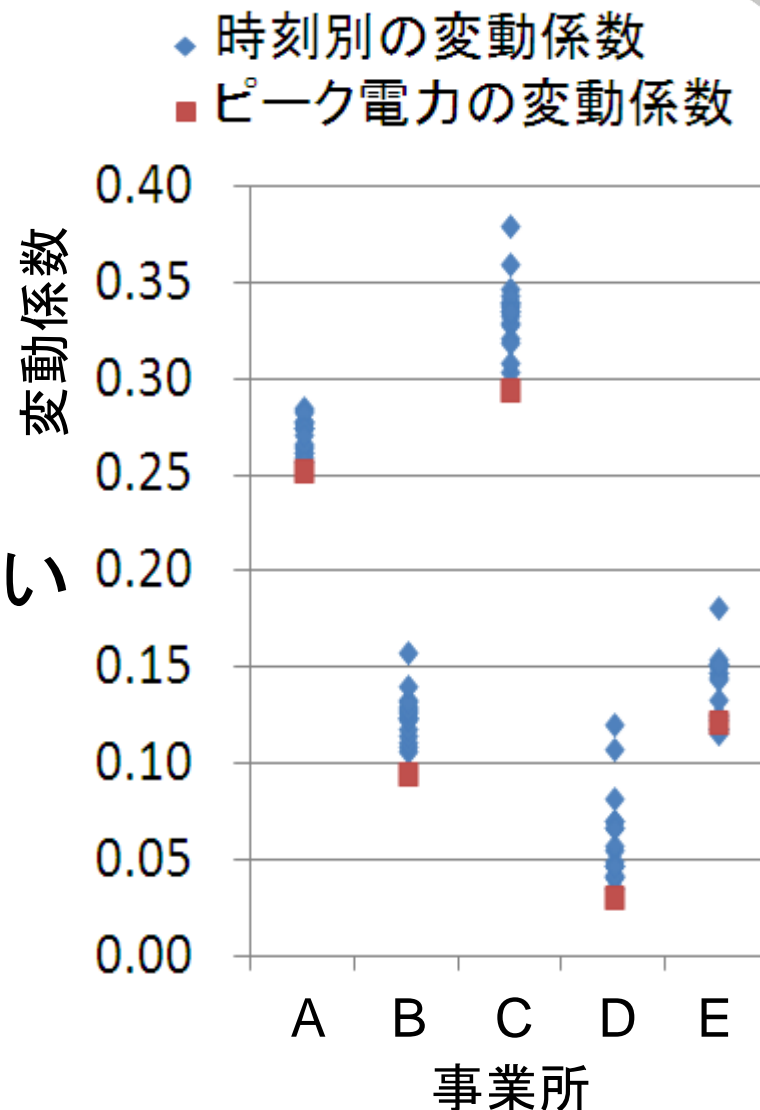
## ■ 需要曲線予測は困難

■ ピーク値に比べ、変動が大きい

■ 変動係数 = 標準偏差 / 平均

## ■ 少ない学習データ

■ 1か月程度の電力データ

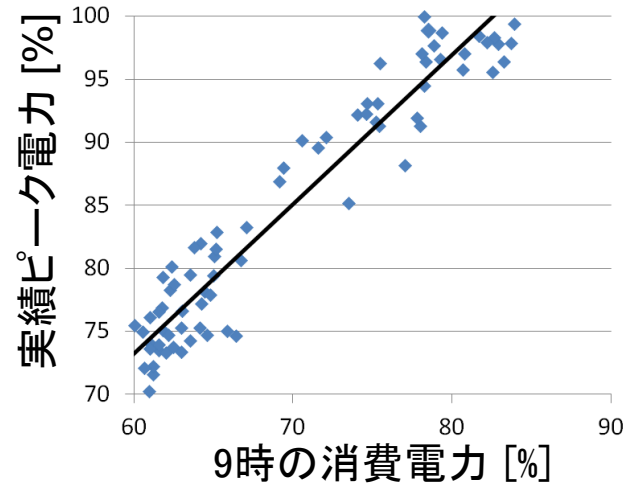


# 提案手法

## ■ 2段階で予測

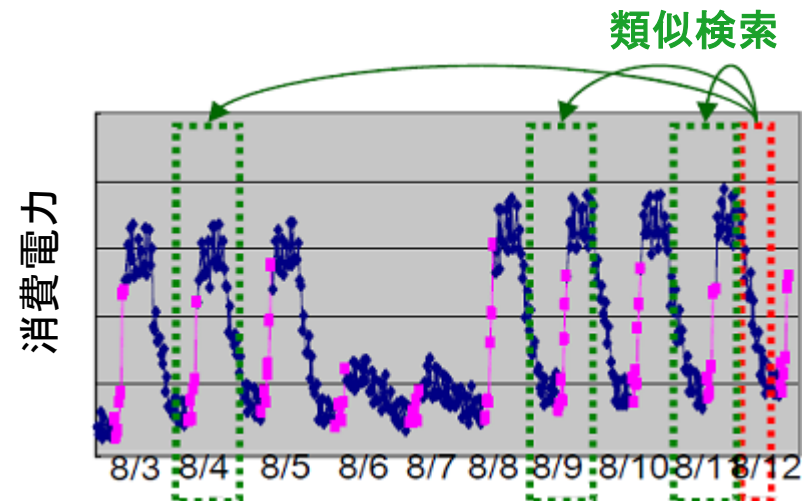
### ■ ピーク電力予測

- 変動係数が小さい
- 重回帰を用いて予測



### ■ 需要曲線予測

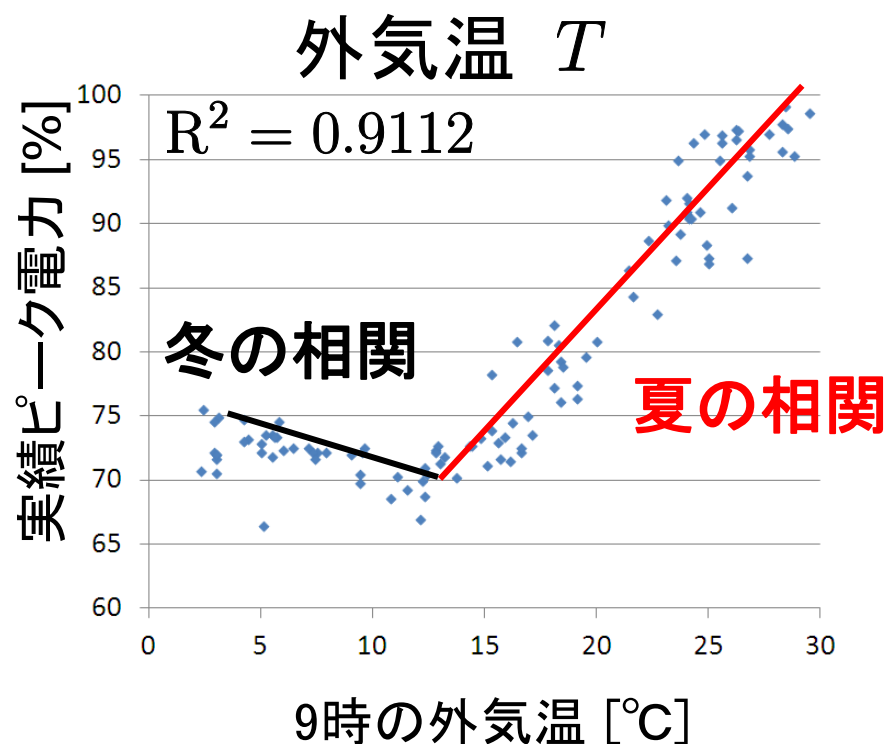
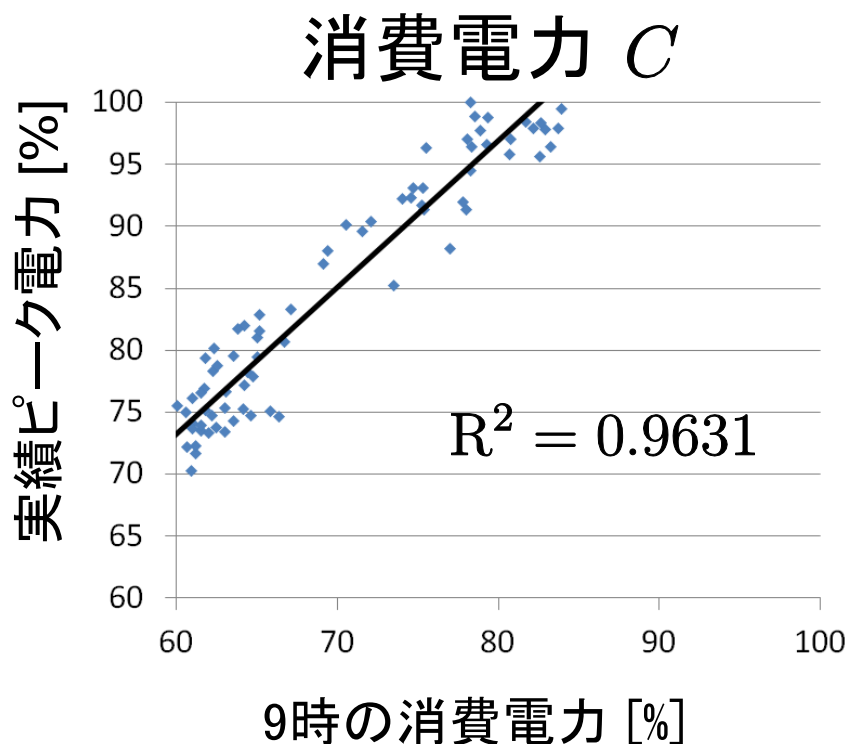
- 類似パターンを抽出
- 正規化合成による予測
- ピーク電力予測値で補正



# ピーク電力の予測モデル

## ■ 重回帰モデル ( $a_i$ : 偏回帰係数)

■ ピーク電力  $P = a_0 + a_1C + a_2T$



# 需要曲線の予測モデル

## ■ 過去の類似する需要パターンを抽出

■ 最高気温の類似

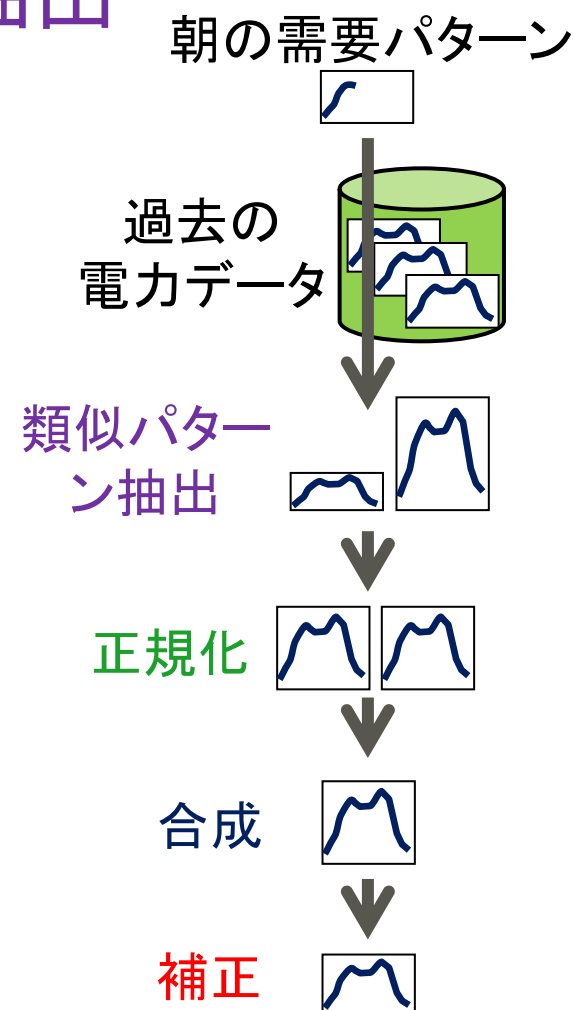
■ 朝の実測値との類似

1. 需要曲線をクラスタリング
2. 朝の実測値で近いデータを抽出

## ■ 正規化合成

1. 抽出したパターンを正規化
2. 平均値をとり合成

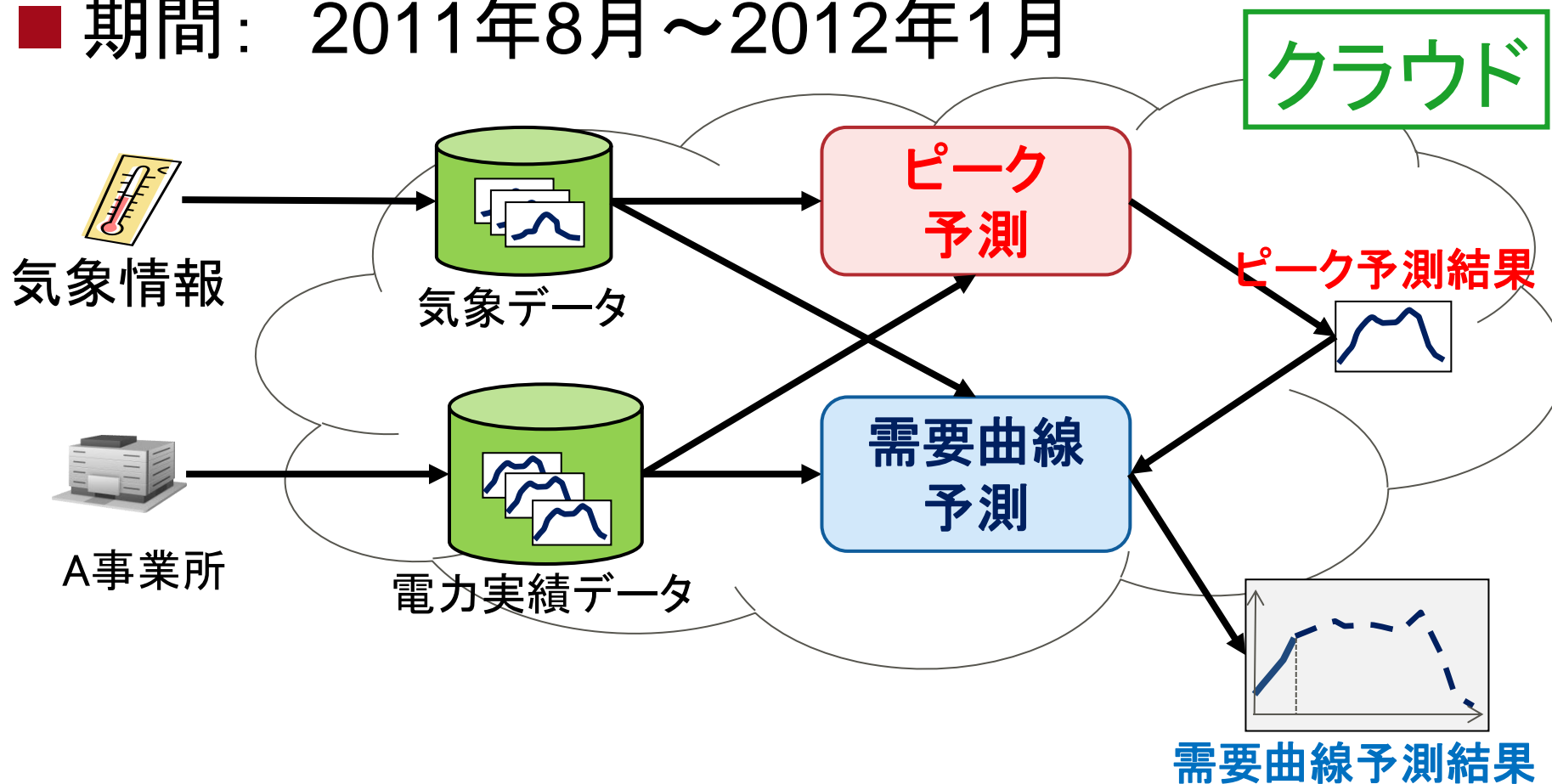
## ■ ピーク予測値に合わせて補正



# 実証実験

■ 対象： 東日本の35事業所

■ 期間： 2011年8月～2012年1月



- 事業所(コミュニティ)単位の電力需要曲線予測
  - **ピーク予測**: 外気温と消費電力の重回帰
  - **需要曲線予測**: 類似需要パターンの正規化合成
- 社内 35 事業所に対する実証実験
  - **ピーク予測** : 3/4以上が 4.0%以下の誤差率
  - **需要曲線予測**: 3/4以上が10.4%以下のMAPE
  - ピーク電力が1mW以下の場合予測誤差にばらつき
- 課題
  - イレギュラーイベントへの対応

# ノートPC/バッテリー充放電計画立案

■ 岩根秀直、穴井宏和、篠原昌子、村上雅彦

■ 問題の定式化

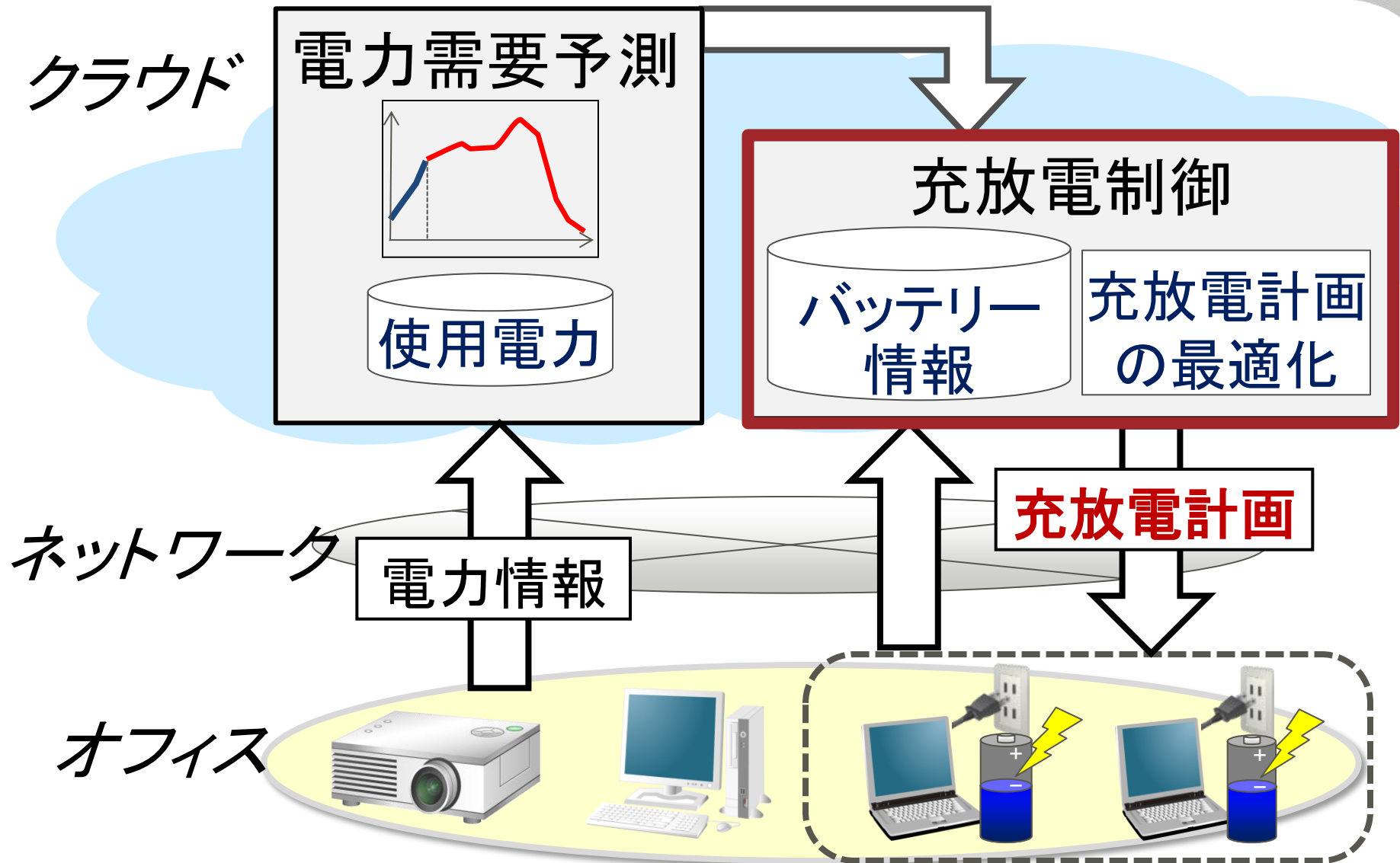
■ 近似解法

■ 実験結果

計測自動制御学会 論文集 Vol. 49, No. 2, 1/9 (2013)  
「ピーク電力削減のためのノートPCのバッテリー制御」



# システム構成



# リチウムイオンの性質

- 過充電・過放電により劣化する
  - 過充電: 100%付近での充電
  - 過放電: 0%付近での放電
- メモリー効果がない
  - 蓄電池を放電しきらない状態での再充電の繰り返しにより、見かけ上、使用可能な容量が減少する現象
- サイクル劣化
  - 充放電を繰り返すことにより容量が劣化

# 充放電計画の最適化

## ■ 変数

- 時刻  $k$  から  $k + 1$  での PC  $i$  の電源モード  $u_i[k]$
- 時刻  $k$  での PC  $i$  の充電残量  $x_i[k]$

## ■ 目的関数

- ピーク電力値
- 最終時刻の充電量：夜間電力が期待できない場合
- 使用電力量：不要な充放電を抑止

## ■ 制約条件：リチウムイオン電池の劣化防止

- 過充電、過放電の回避（例：20%～80%）
- ユーザの希望（出張など）

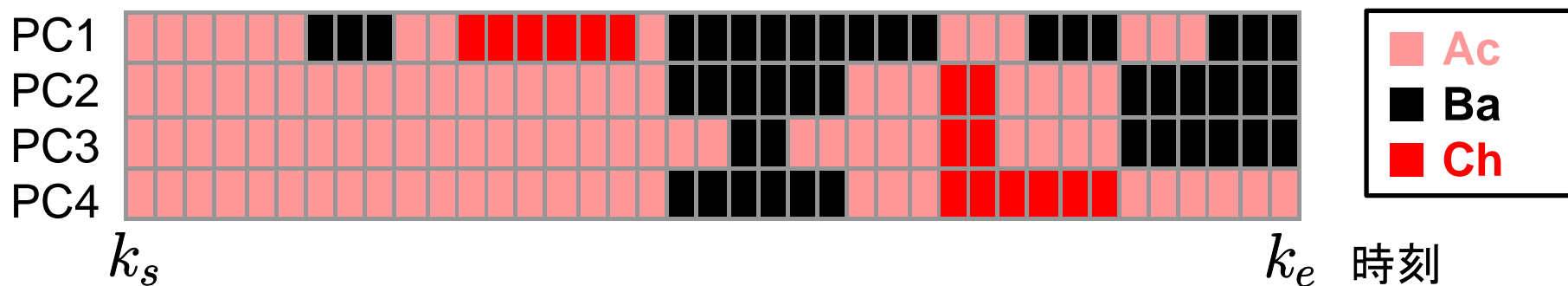
# 充放電計画の最適化

## ■ 30分毎に再計算(モデル予測制御に近い形式)

- モデル誤差への対応
- ネットワーク内外への移動に対応
- 予測も当日の実測値を用いて再計算
- 与えられた計算時間は1分

## ■ 9:00-20:00 の制御

- 時間が経過する毎に予測区間が減少



# 定式化(多目的最適化)

Minimize	$(P, -\sum_{i \in \mathcal{M}} c_i x_i[k_e], \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{k \in \mathcal{K}_o} g_i(x_i[k], u_i[k]))$	$g_i(\cdot)$ : 使用電力
subject to	$P \geq S[k], \forall k \in \mathcal{K}_p,$ $P \geq D[k] + \sum_{i \in \mathcal{M}} (g_i(x_i[k], u_i[k])), \forall k \in \mathcal{K}_o,$	一日の ピーク電力
	$u_i[k_s - 1] = u_{i,k_s}, x_i[k_s] = x_{i,k_s}, \forall i \in \mathcal{M},$	初期値設定
	$x_i[k + 1] = f_i(x_i[k], u_i[k]), \forall i \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}_o,$ $x_i^l \leq x_i[k] \leq x_i^u, \forall i \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}_o,$	状態方程式
	$((u_i[k - 1] \neq \text{CH} \wedge x_i[k - 1] \geq x_i^u - 10)$ $\rightarrow u_i[k] \neq \text{CH}), \forall k \in \mathcal{K}_o, \forall i \in \mathcal{M}.$	過充電対策

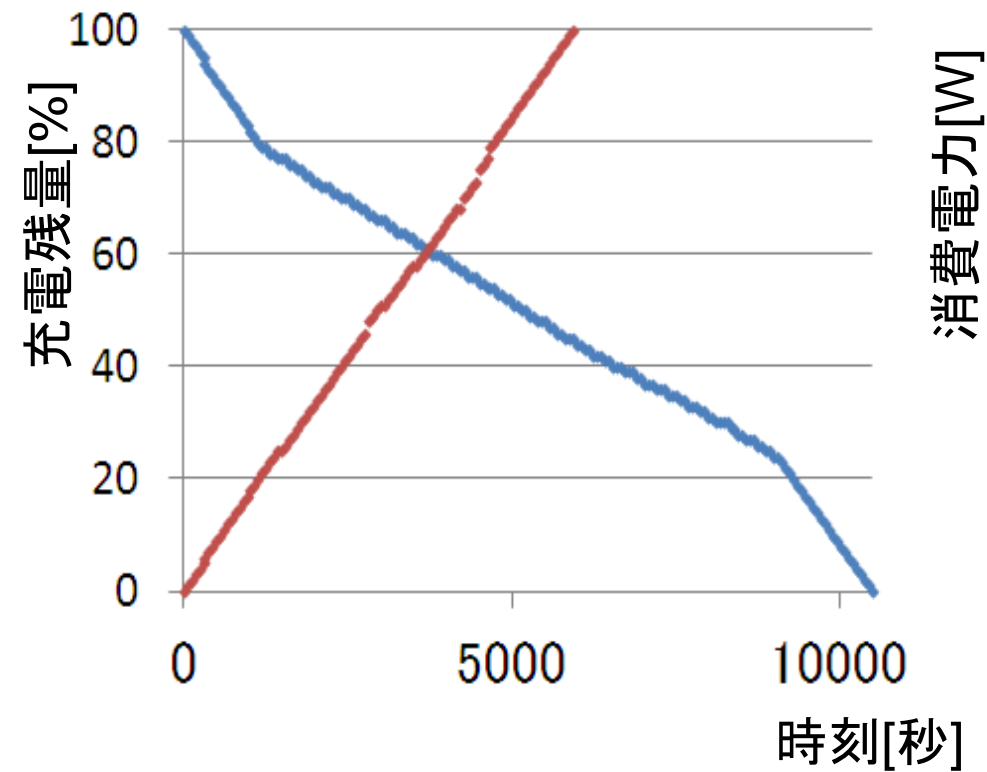
$\mathcal{K}_p = \{0, 1, \dots, k_s\}$ : 最適化前の時刻  
 $\mathcal{K}_o = \{k_s, \dots, k_e\}$ : 最適化対象の時刻

$S[k]$ : 電力実測値     $D[k]$ : 電力予測値  
 $\mathcal{M}$ : ノートPC     $x_i[k]$ : 残量  
 $P$ : ピーク電力     $u_i[k]$ : 電源モード

# モデル化

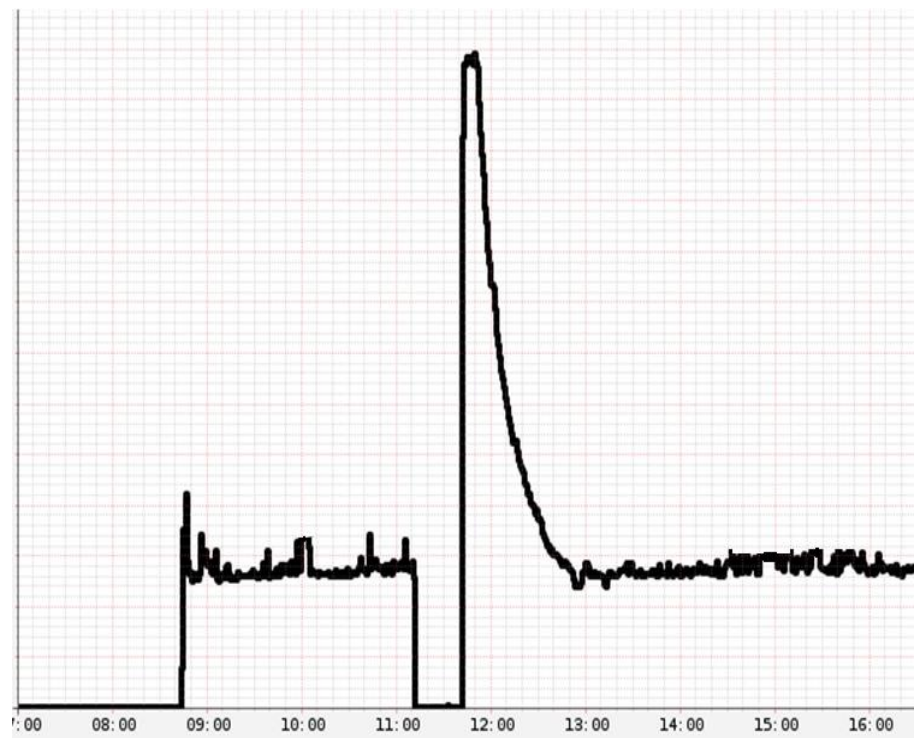
◆ 放電曲線

■ 充電曲線



$f_i$

消費電力[W]



時刻

$g_i$

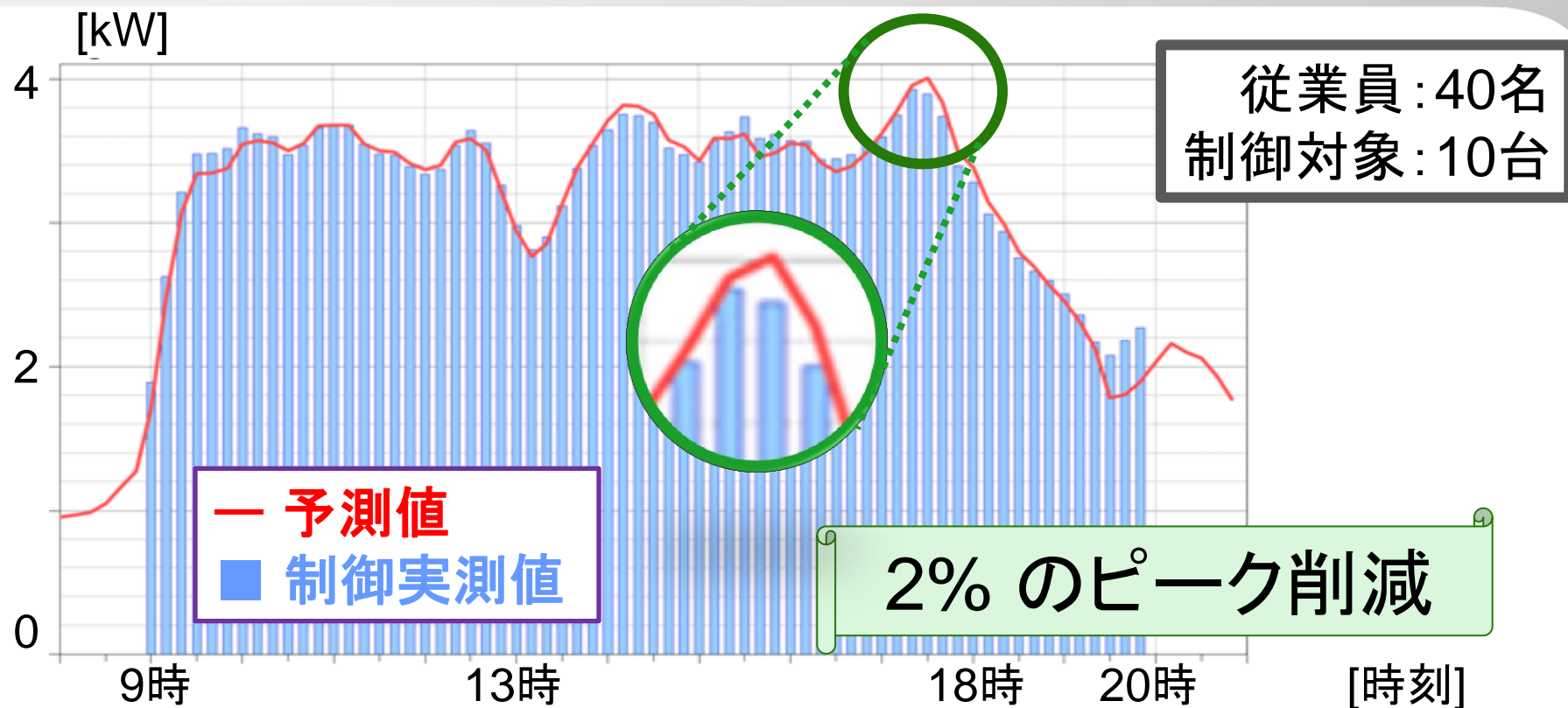
## ■ 汎用MIPソルバでの解法

- 対称性が高い問題であるため解が得られなかった

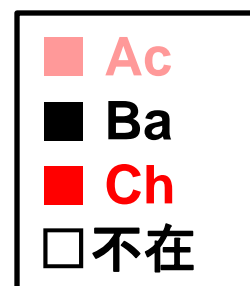
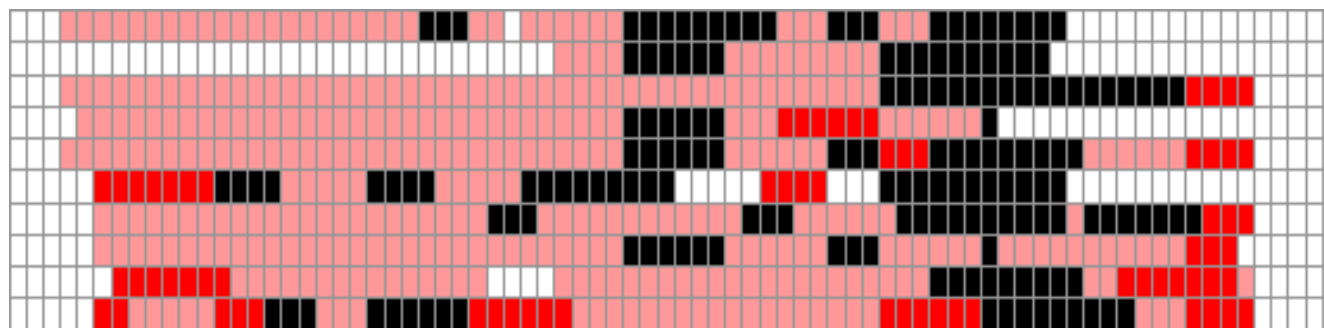
## ■ この問題に対する局所探索法を開発

- 単純に電源モード  $u_i[k]$  を変化させる探索近傍では、実行不可能になることが多く、効率が悪い
- 別の扱いやすい探索空間を用意  
⇒すべての解が実行可能に
  - **Ac** はいつでも実行可能であることを利用
  - 制約を違反した場合には強制的に **Ac** で動作させる
  - 変化が大きくなるための工夫

# 実証実験結果



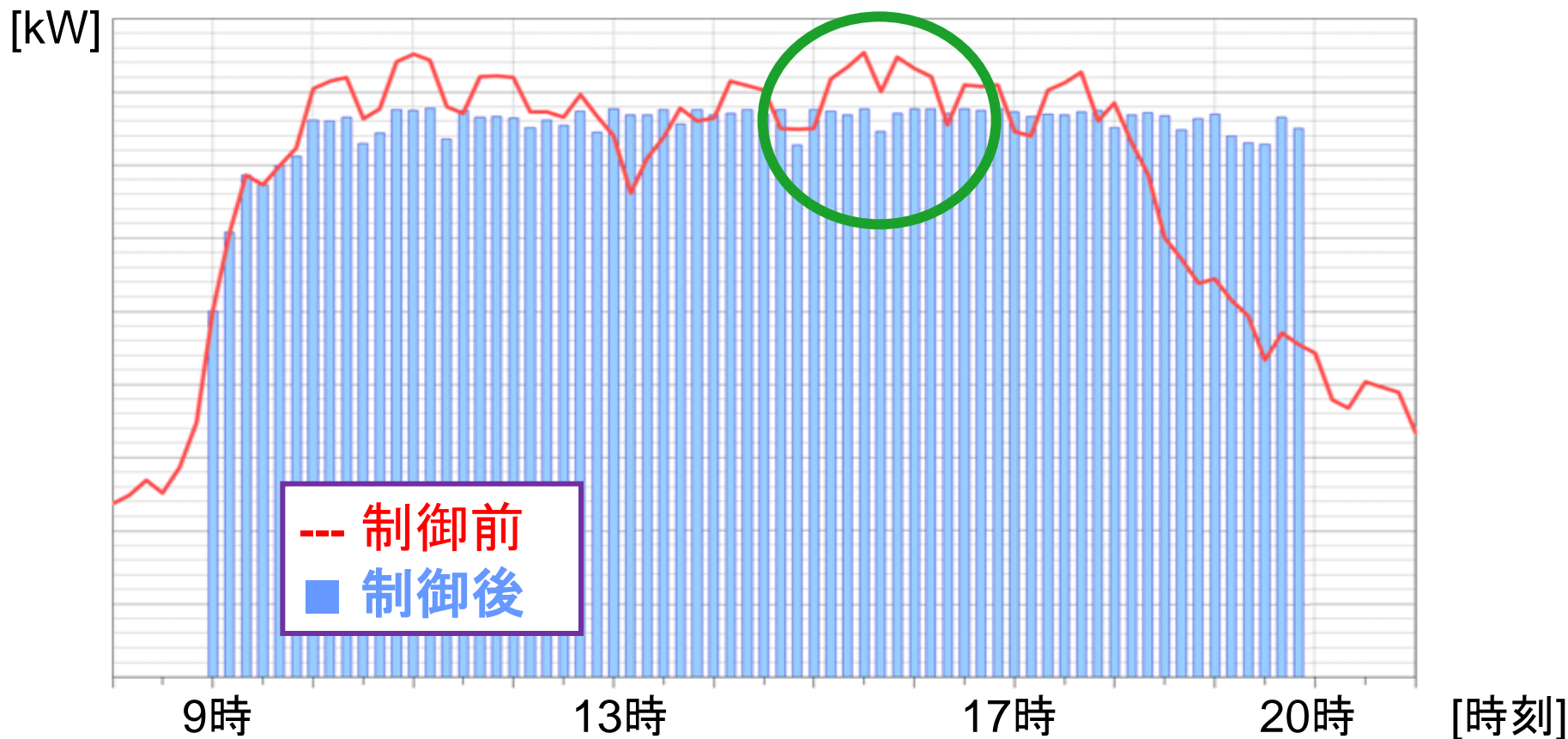
充放電計画





# 1000台でのシミュレーション

- ACコンセント系のピーク電力を約 9.0% 削減
- 空調・照明などを含めると、約 3.0% 削減



## ■ 小規模（オフィスなど）な電力需要予測は困難

- 人が動く。打ち合わせ・出張

- 複合機が動くだけで使用電力が跳ね上がる

⇒「モデル予測制御」による対応

## ■ 経年劣化による充放電モデルの変化

# 充放電モデルが適切でない場合の計画例

## ■ 充電特性

- 約1時間40分でバッテリー0%から100%になると想定したモデル
- 実際は満充電までに2時間必要

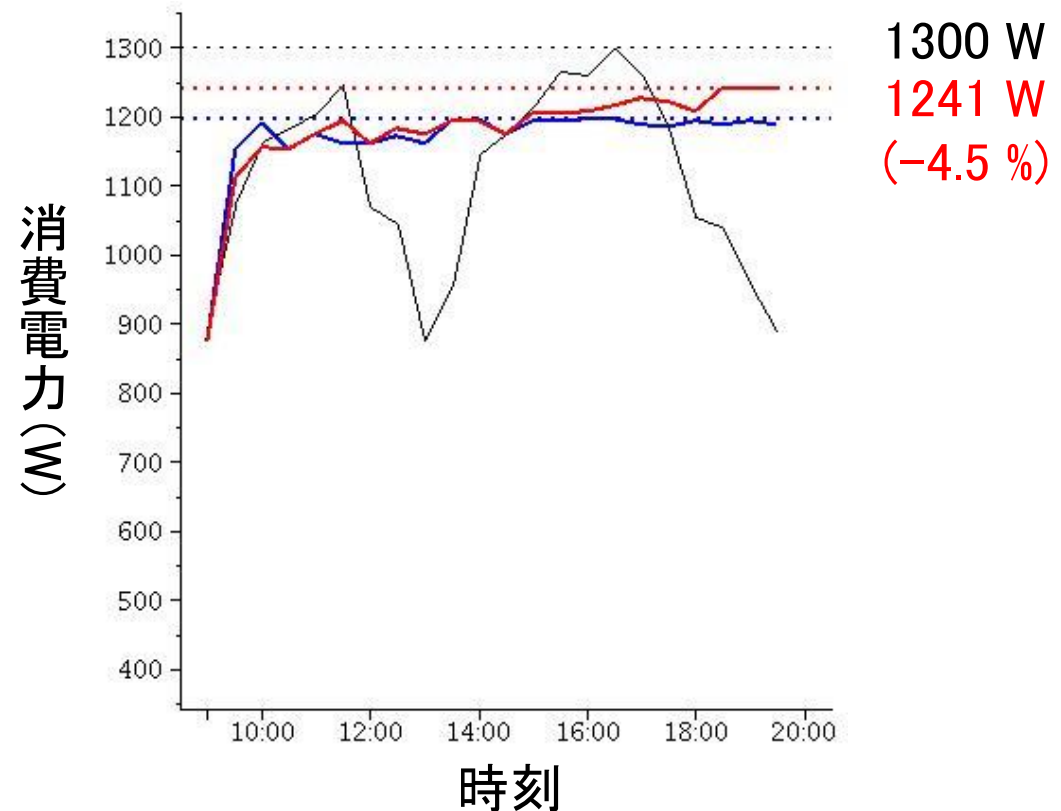
## ■ 放電特性

- 約3時間で100%から0%になると想定したモデル
- 実際は約2時間10分で空に

上記の充放電モデルを用いて  
制御を行った時(赤線)

一日の後半にしわ寄せがくる

オフィスの消費電力推移



# 充放電モデルが適切でない場合の計画例

## ■ 充電特性

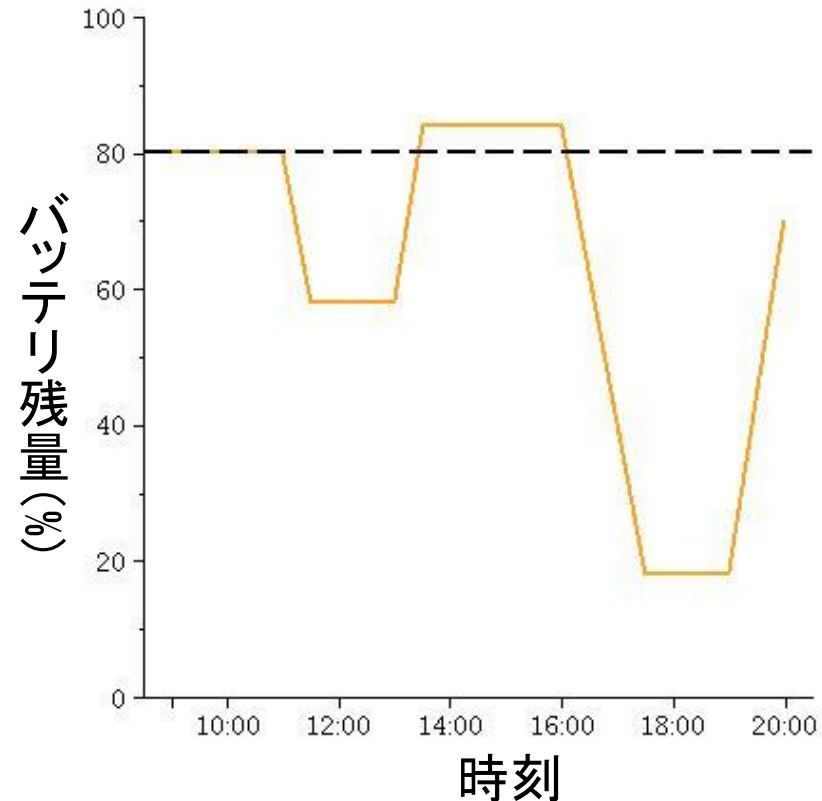
- 約1時間40分でバッテリー0%から100%になると想定したモデル
- 実際は満充電までに2時間必要

## ■ 放電特性

- 約3時間で100%から0%になると想定したモデル
- 実際は約2時間10分で空に

一日の終わり(20:00)にバッテリー残量80%を確保できない

あるPCのバッテリー残量推移

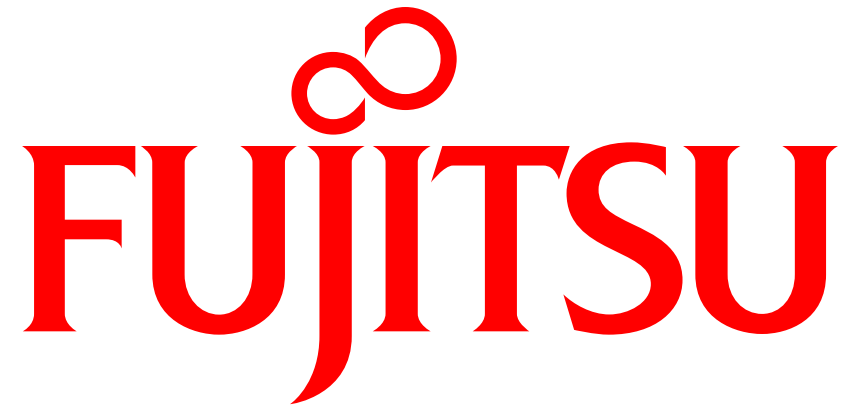


## ■ ノートPCのバッテリーによるピーク電力削減

- ネットワークから制御できる蓄電池の集中制御
- 充放電制御計画立案のための局所探索手法
- システムを作成し、実証実験で効果を確認

## ■ 今後の課題

- 予測誤差・モデル誤差に対応した定式化・最適化の実現
- スマートシティへの展開を目指して研究開発を推進
  - ・ ノートPC以外の蓄電池を含めたピーク電力削減



shaping tomorrow with you