

太陽光発電の予測不確実性を加味した 階層型需給バランス制御

東京工業大学 井村 順一

<http://www.cyb.mei.titech.ac.jp/crest/index.html>

CREST研究領域（平成24年度発足）

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
総括 藤田政之（東工大）

共同研究者

東工大

植田譲，石崎孝幸，小池雅和，定本知徳，武藤生磨，吉野孝平，田川芳洋

首都大学東京

児島晃，藤江一希，梅田勝矢

京都高度研究所

鄭心知

産総研

大関崇，村田晃伸，益田泰輔，Joao Fonseca，大竹秀明，下瀬健一

気象庁

山田芳則，松林健吾

研究協力者

小林広武（電中研）

Karl H. Johansson (Royal Institute of Technology)

Nacim Ramdani (Univ. of Orleans),

Antoine Girard (Université Joseph Fourier)

アウトライン

1. 時空間分解能需給バランスニング

- コンセプトの提案

2. PV/需要予測不確実さと階層型最適化

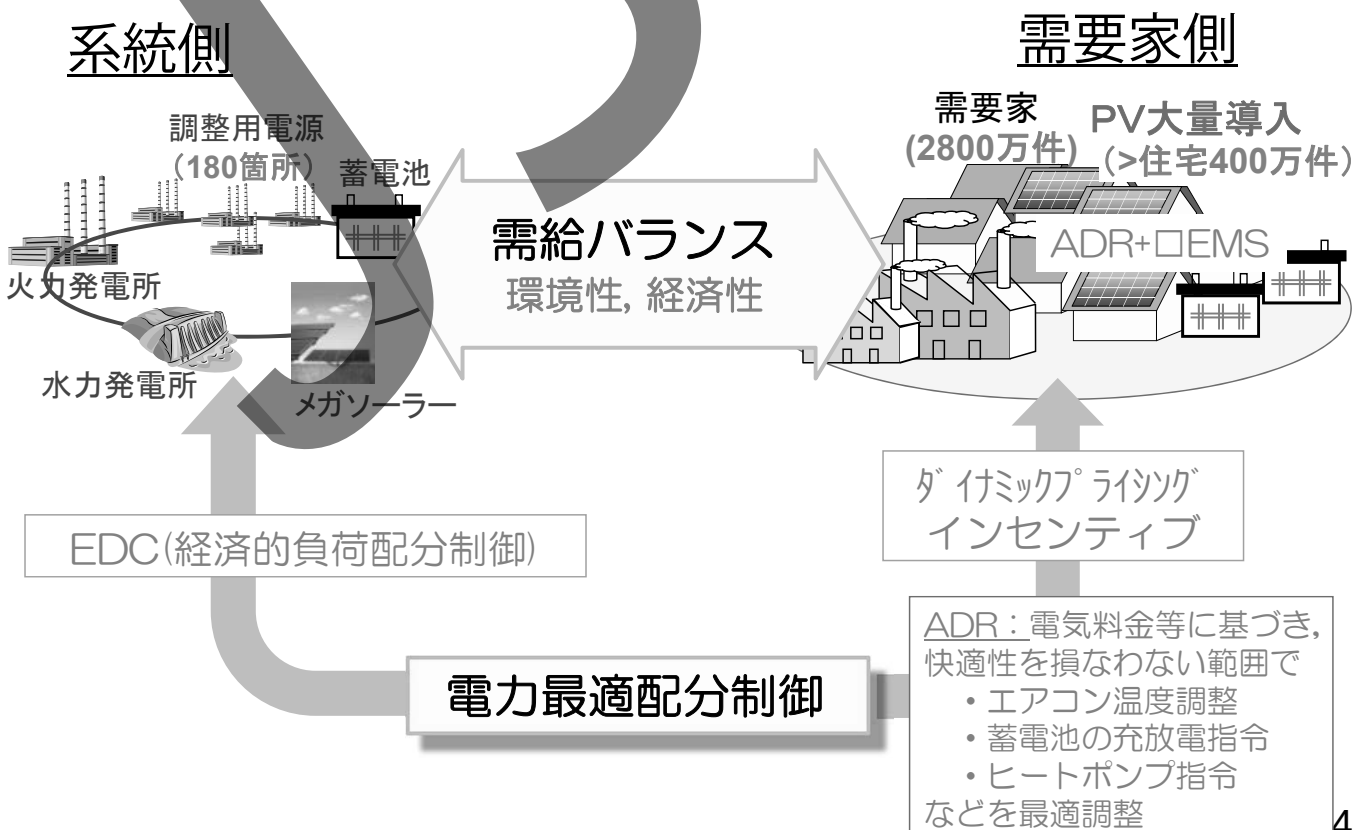
- 確率的な予測不確実さを含む最適制御問題の定式化と解法

3. 区間予測に基づく最適化

- 確定的な予測不確実さを含む最適制御問題の定式化と解法

3

需給バランス制御

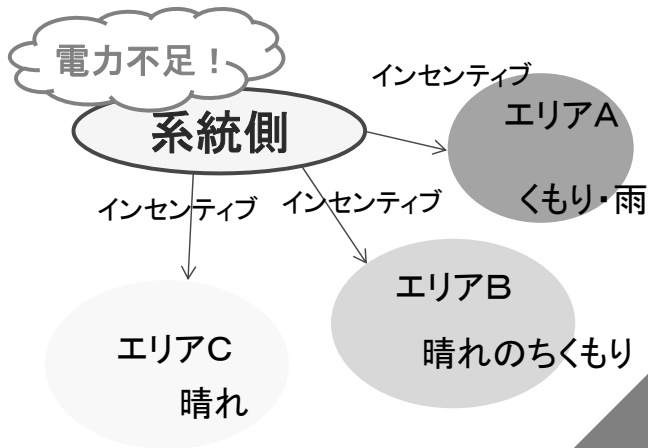


4

調和型インセンティブへ

系統ベースインセンティブ（標準型）

- ・系統（or コミュニティ）全体での需給バランスを見てインセンティブをダイナミックに決める



・系統ベース:

→全エリアに一律にインセンティブ

・調和型ベース:

→エリアCのむだな消費を抑え、
エリアA, Bに回すべき

→エリアCのみ消費抑制or売電
インセンティブ

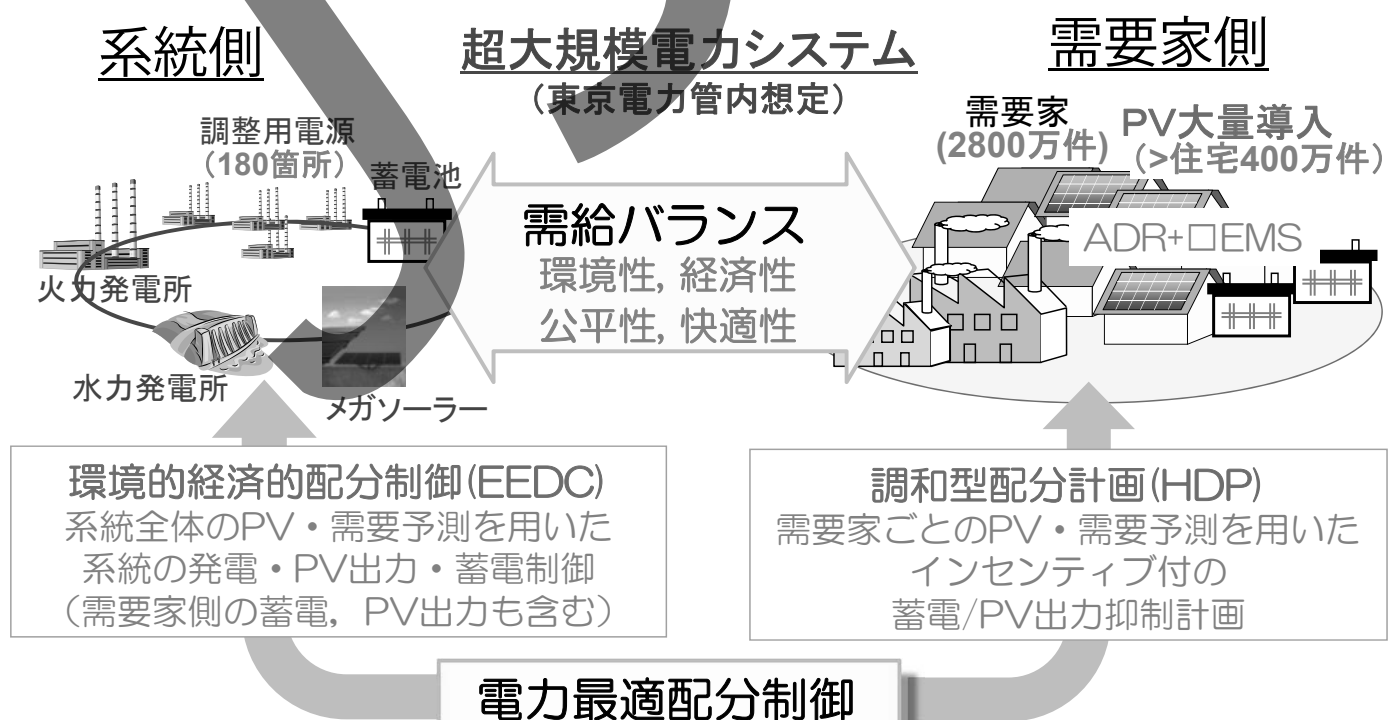
調和型ベースインセンティブ（提案）

- ・系統全体での需給バランス、個々の需要家の状況を見て需要家ごとのPV出力抑制・蓄電計画、それに基づいたインセンティブをダイナミックに決める

5

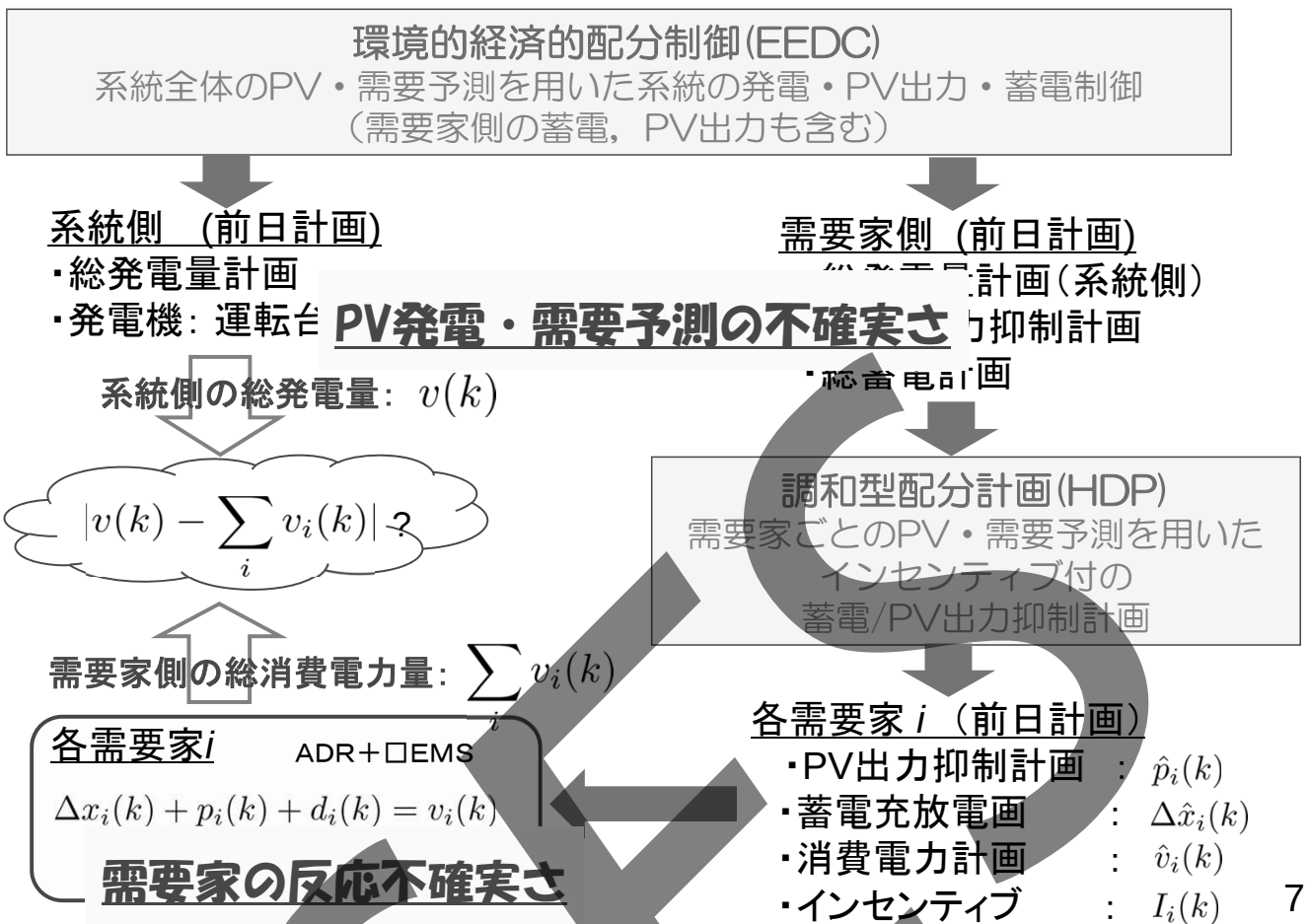
需要家側も配慮した需給バランスの実現

電力系統全体の最適な電力配分に基づく需給バランス制御

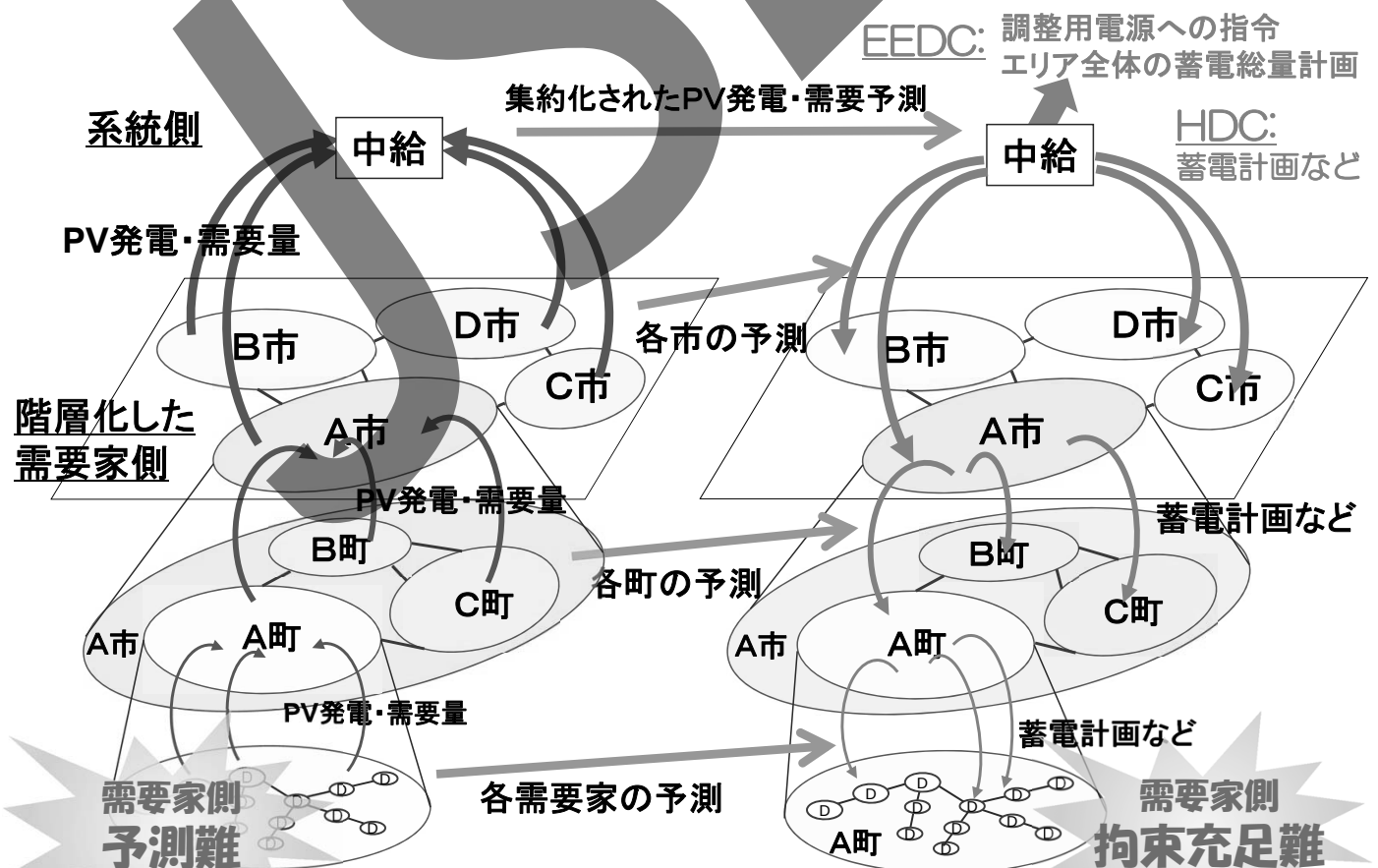


6

提案する需給バランス制御の枠組み



不確実なPV予測を含む階層型最適化

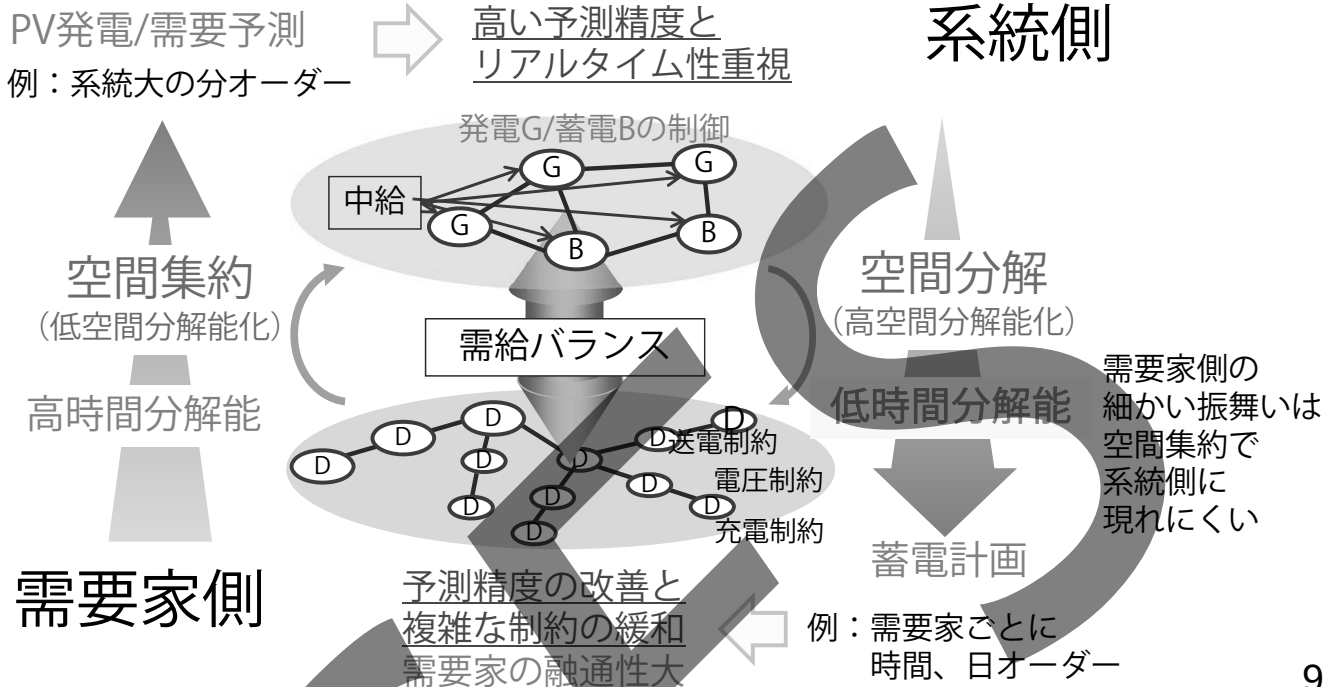


提案するアプローチ

- ・計画の時空間分解能は？
- ・予測の時空間分解能は？

時間分解能需給バランス(系統側)から

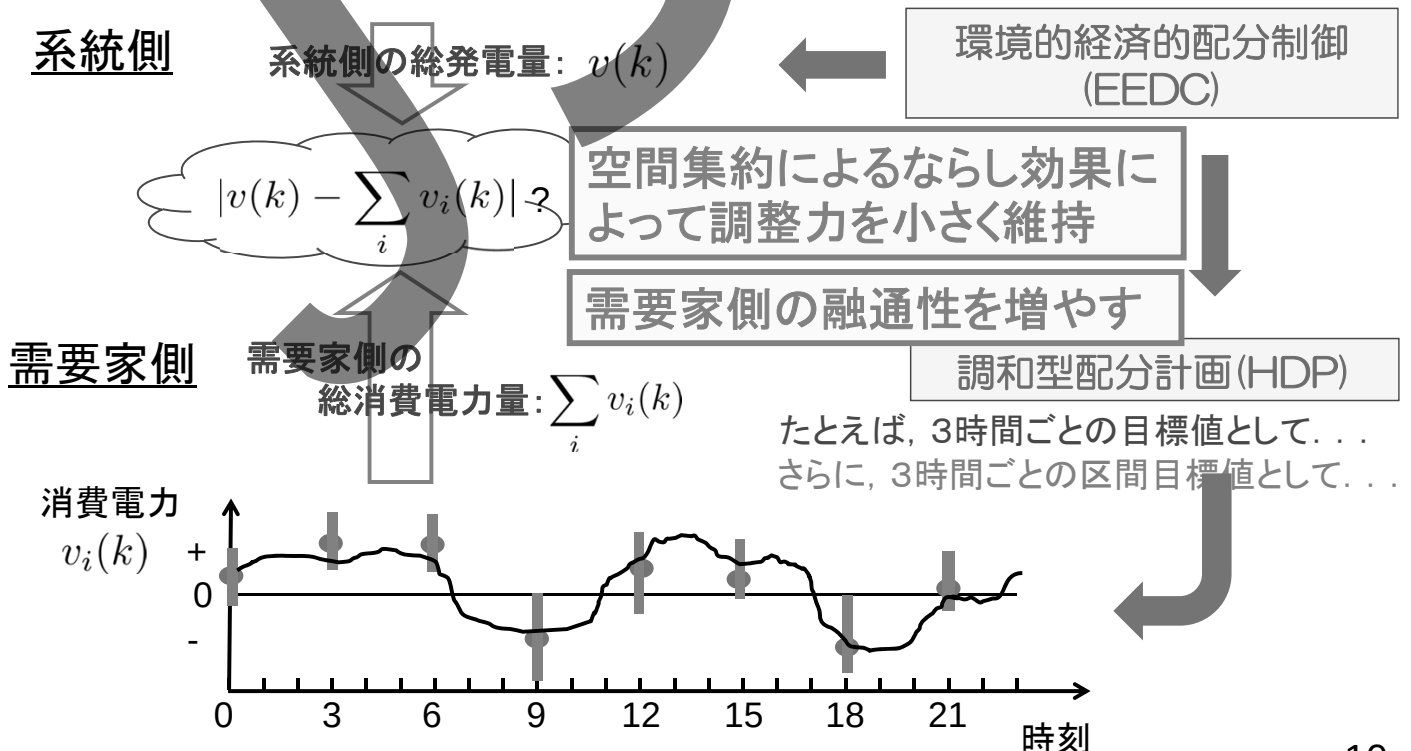
時空間分解能需給バランスへ



9

低時間分解能計画のイメージ

時間空間分解能需給バランス(系統側+需要家側)



10

1. 時空間分解能需給バランスの提案
2. PV/需要予測不確実さと階層型最適化
定本, 武藤, 石崎, 植田 (東工大)
大関, 村田, 益田 (産総研)
3. 区間予測に基づく最適化

11

空間集約・時間集約の定式化

具体例：3つの蓄電池がある場合

蓄電池の時間発展

$$G: x(t+1) = x(t) - d(t) + v(t) \\ t = 0, 1, \dots, T-1$$

$x(t)$: 蓄電量[kWh]

$$x := [x_1, x_2, x_3]^T$$

$d(t)$: 需要(PV発電含)[kW]

$v(t)$: 発電量(消費量)[kW]

空間集約の例：3つの蓄電池を1つとして扱う

$$\hat{x}(t) := x_1(t) + x_2(t) + x_3(t)$$

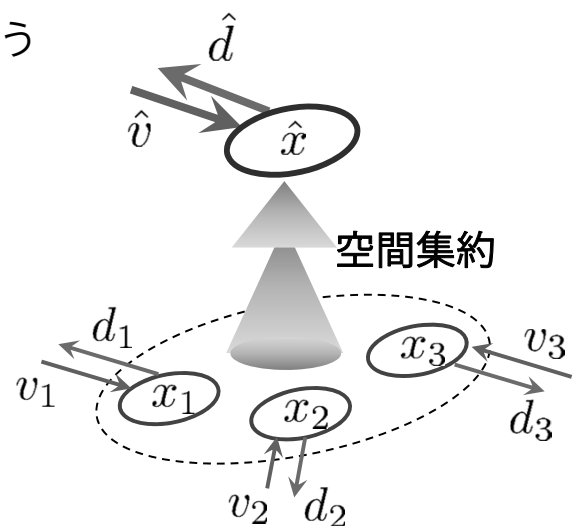
$$\hat{x}(0) := x_1(0) + x_2(0) + x_3(0)$$

$$\hat{d}(t) := d_1(t) + d_2(t) + d_3(t)$$

$$\hat{v}(t) := v_1(t) + v_2(t) + v_3(t)$$

空間集約した蓄電池の時間発展

$$\hat{G}: \hat{x}(t+1) = \hat{x}(t) - \hat{d}(t) + \hat{v}(t)$$



12

空間集約・時間集約の定式化

具体例：3時間を1単位時間とする場合

蓄電池の時間発展

$$G: x(t+1) = x(t) - d(t) + v(t) \\ t = 0, 1, \dots, T-1$$

時間集約の例：3時間を1単位時間として扱う

$$\hat{x}(k) := x(3k) \quad k = 1, 2, \dots, K-1$$

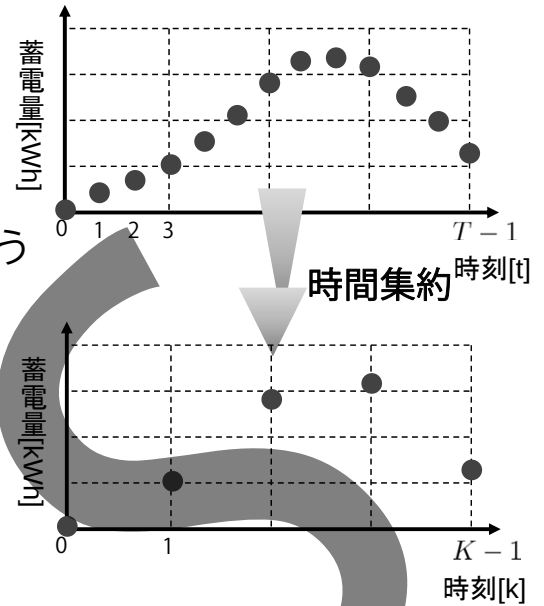
$$\hat{x}(0) := x(0)$$

$$\hat{d}(k) := d(3k-2) + d(3k-1) + d(3k)$$

$$\hat{v}(k) := v(3k-2) + v(3k-1) + v(3k)$$

時間集約した蓄電池の時間発展

$$\hat{G}: \hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) - \hat{d}(k) + \hat{v}(k)$$



13

空間集約・時間集約の定式化

蓄電池の時間発展 (PV/需要は正規分布に従う確率変数と仮定)

$$G: \begin{cases} x(t+1) = x(t) - d(t) + v(t) \\ d \sim \mathcal{N}(d_m, \Sigma) \end{cases}, t = 0, 1, \dots, T-1$$

n : 蓄電池数 T : 全時間長 $x(t), v(t), d(t) \in \mathbb{R}^n$

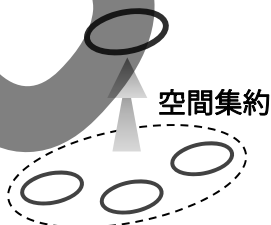
$d := [d(0)^\top, d(1)^\top, \dots, d(T-1)^\top]^\top \in \mathbb{R}^{nT}$

空間集約

$$\hat{x}(0) = \mathbf{1}_n^\top x(0)$$

$$\hat{d} = (I_T \otimes \mathbf{1}_n^\top) d$$

$$\hat{v} = (I_T \otimes \mathbf{1}_n^\top) v$$



時間集約

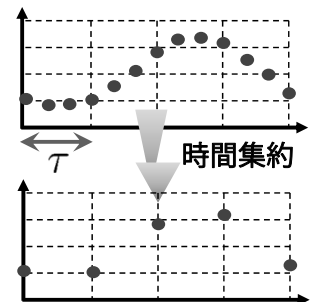
$$\hat{x}(0) = x(0)$$

$$\hat{d} = (I_K \otimes (\mathbf{1}_\tau^\top \otimes I_n)) d$$

$$\hat{v} = (I_K \otimes (\mathbf{1}_\tau^\top \otimes I_n)) v$$

τ : 1 単位時間長

K : 集約した全時間長



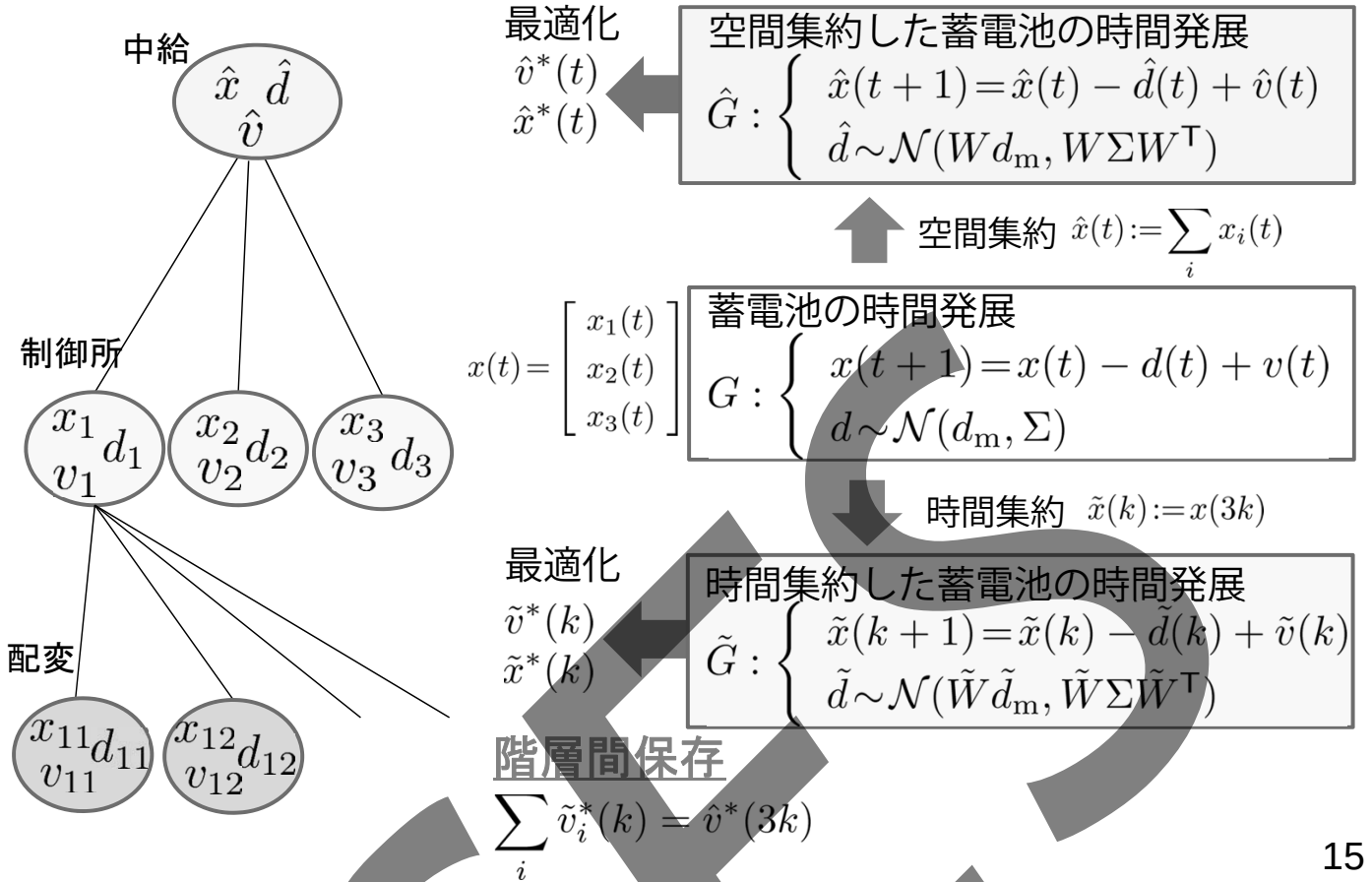
集約した蓄電池の時間発展

$$\hat{G}: \begin{cases} \hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) - \hat{d}(k) + \hat{v}(k) \\ \hat{d} \sim \mathcal{N}(W d_m, W \Sigma W^\top) \end{cases}, k = 0, 1, \dots, K-1$$

空間集約: $W := I_T \otimes \mathbf{1}_n^\top \quad t = k$

時間集約: $W := I_K \otimes (\mathbf{1}_\tau^\top \otimes I_n) \quad 14$

階層型最適化



15

階層型最適化

電力配分問題

Given : $x(0), d_m, \Sigma, W$ および評価関数の設計パラメータ

$$J(\hat{x}, \hat{v}, \hat{d}) := \mathbb{E} \left[\underbrace{\|\Delta \hat{x}\|_Q^2 + p^T \Delta \hat{x}}_{\text{蓄電池の劣化に起因する費用}} + \underbrace{\|\hat{v}\|_R^2 + q^T \hat{v}}_{\text{燃料費}} + \underbrace{\|\hat{x}(K) - \hat{x}(0)\|_S^2}_{\text{終端拘束}} \right]$$

蓄電池の劣化に起因する費用

燃料費

終端拘束

$$\Delta \hat{x}(k) := \hat{x}(k+1) - \hat{x}(k)$$

$$\min_{\hat{v}} J(\hat{x}, \hat{v}, \hat{d})$$

$$\text{s.t. } \hat{G} : \begin{cases} \hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) - \hat{d}(k) + \hat{v}(k) \\ \hat{d} \sim \mathcal{N}(W d_m, W \Sigma W^T) \end{cases} \quad k = 0, 1, \dots, K-1$$

$$(I_K \otimes \mathbf{1}_n^T) \hat{v} = (I_K \otimes \mathbf{1}_\tau^T) \hat{v}_0^* \quad (\text{階層間保存})$$

+蓄電量制約, 充放電制約, 発電制約

16

階層型最適化

拘束条件

$k = 0, \dots, K - 1$ に対して

$$\textcircled{1} \quad \Pr \left(\hat{x}(k) \geq \hat{x}^{(\min)} \right) \geq 1 - \epsilon$$

時刻 k で蓄電量 $\hat{x}(k)$ が下限値 $\hat{x}^{(\min)}$ を超えない確率が $1 - \epsilon$ 以上

蓄電量の
上下限

$$\textcircled{2} \quad \Pr \left(\hat{x}(k) \leq \hat{x}^{(\max)} \right) \geq 1 - \epsilon$$

$$\textcircled{3} \quad \Pr \left(\Delta \hat{x}(k) \geq \Delta \hat{x}^{(\min)} \right) \geq 1 - \epsilon$$

$$\textcircled{4} \quad \Pr \left(\Delta \hat{x}(k) \leq \Delta \hat{x}^{(\max)} \right) \geq 1 - \epsilon$$

蓄電速度の
上下限

$$\textcircled{5} \quad \hat{v}(k) \geq \hat{v}_{\min}$$

$$\textcircled{6} \quad \hat{v}(k) \leq \hat{v}_{\max}$$

発電量の
上下限

※ 機会制約 (Chance Constraint) 付き確率的最適化

階層型最適化：まとめ

1. PV・需要予測がつぎの関係を満たせば階層上下間の評価値が保存される

上の階層の最適化問題 $\hat{d} \sim \mathcal{N}(W d_m, W \Sigma W^T)$

下の階層の最適化問題 $d \sim \mathcal{N}(d_m, \Sigma)$

➡ 局所予測値と大局予測値は平均と分散で階層保存であればよい

2. 機会制約付き確率的最適化問題は 2 次計画問題に帰着可

確率拘束 ➡ $A \hat{v} \leq b_{W \Sigma W^T, \epsilon}$

3. 分散が小さいほど拘束条件は緩和される
 ϵ が小さいほど拘束条件は厳しくなる

数値シミュレーションによる検討

$$J(\hat{x}, \hat{v}, \hat{d}) := \mathbb{E} [\|\Delta \hat{x}\|_Q^2 + p^\top \Delta \hat{x} + \|\hat{v}\|_R^2 + q^\top \hat{v} + \|\hat{x}(K) - \hat{x}(0)\|_S^2]$$

需要家数	40万世帯(発電・充電設備は10万世帯)
総蓄電池容量	50万kWh(10万世帯×5kWh)
充放電量の上下限值	±10万kW(充電能力1kWh/h)
発電量(調整用)の上下限值	1~30万kW
発電量(ベース)	20万kW

$$Q = 1.80 \times 10^{-8} \text{ [JPY/W}^2\text{h]}$$

$$p = -2.17 \times 10^{-1} \text{ [JPY/Wh]}$$

$$R = 1.05 \times 10^{-12} \text{ [JPY/W}^2\text{h]}$$

$$q = 4.60 \times 10^{-3} \text{ [JPY/Wh]}$$

$$S = 0.01 \quad K = 144$$

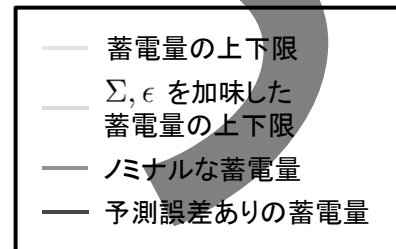
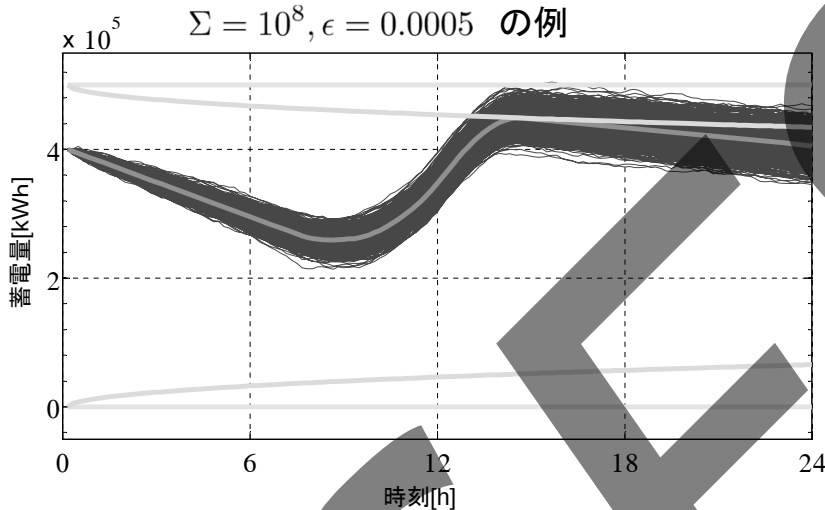
(サンプリング周期:10分)

$$\hat{v}_{\min} = 1 \times 10^7 \text{ [W]}$$

$$\hat{v}_{\max} = 3 \times 10^8 \text{ [W]}$$

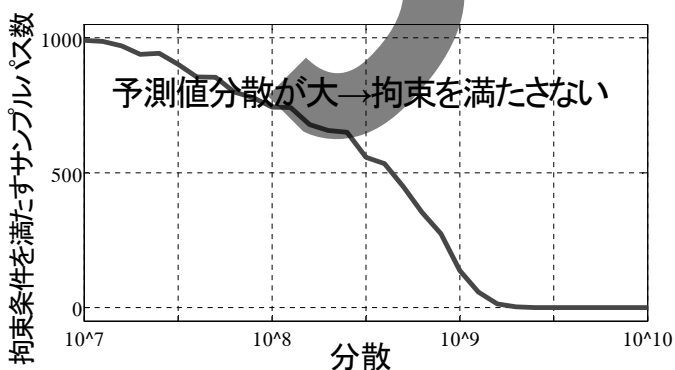
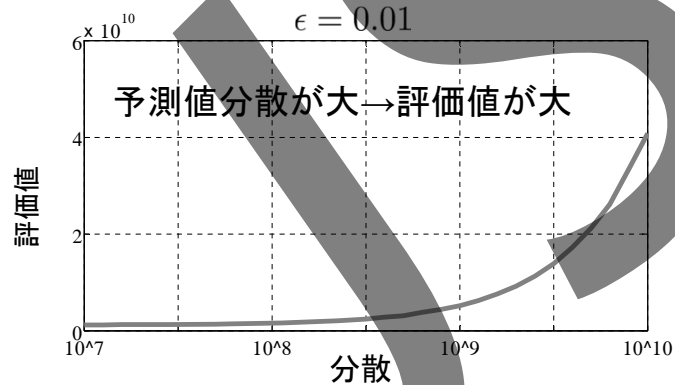
$$\Delta \hat{x}_{\min} = -10 \times 10^7 \text{ [W]}$$

$$\Delta \hat{x}_{\max} = 10 \times 10^7 \text{ [W]}$$

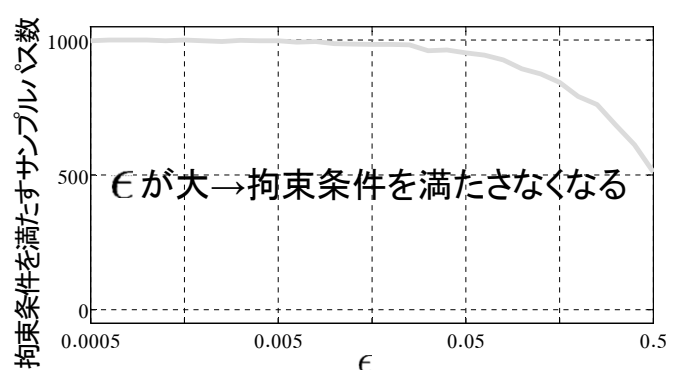
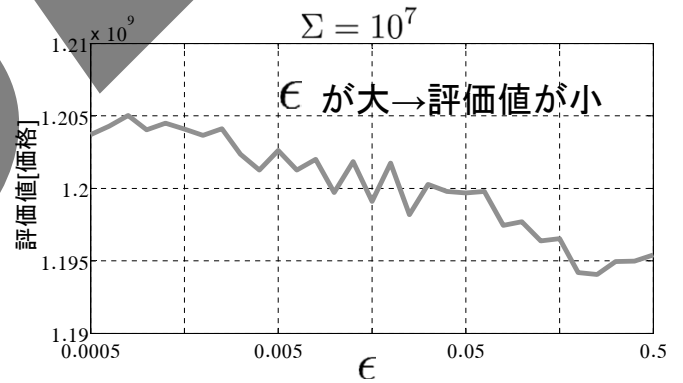


19

数値シミュレーション結果



Σ を 10^7 付近より小さい値に抑えることで、評価値を悪化させずに拘束条件を満たす解を得ることができる



ϵ を大きくすると評価値が小さくなるが、小さくすると拘束条件を満たさなくなる
⇒ 評価値と拘束条件のトレードオフ

20

アウトライン

1. 時空間分解能需給バランスの提案

2. PV/需要予測不確実さと階層型最適化

定本, 武藤, 石崎, 植田 (東工大)
大関, 村田, 益田 (産総研)

3. 区間予測に基づく最適化

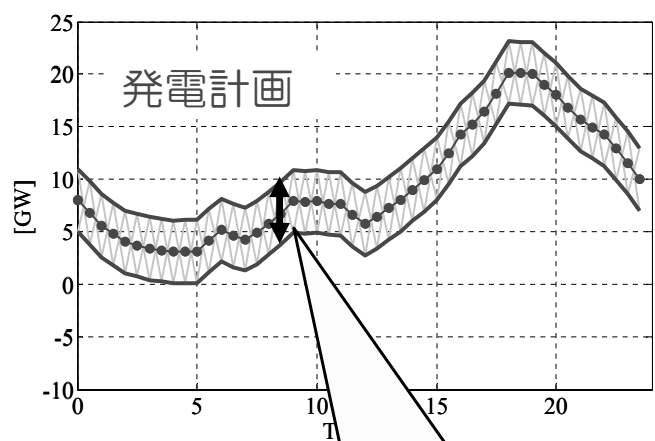
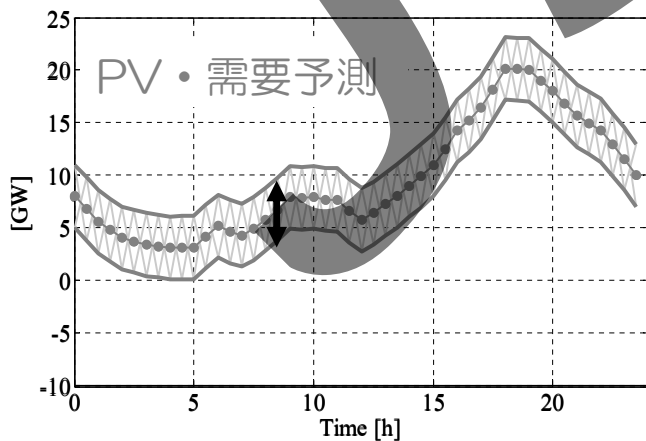
小池, 石崎, 定本 (東工大)
N. Ramdani (Univ. of Orleans)

21

背景

$$d = v$$

需要 発電量



従来の発電計画

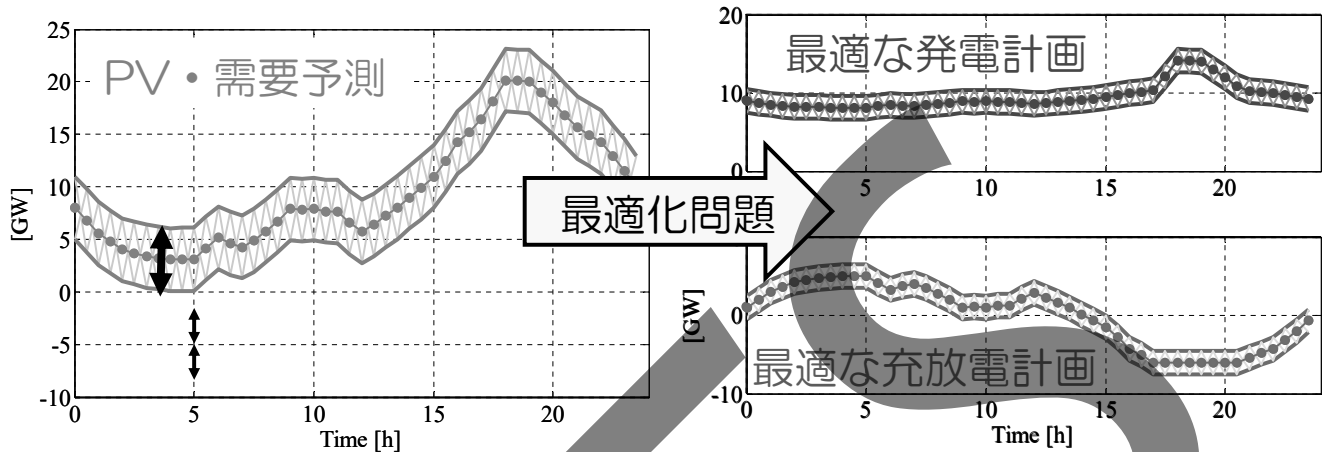
同量の調整代を設定

22

背景

$$d = v - \Delta x$$

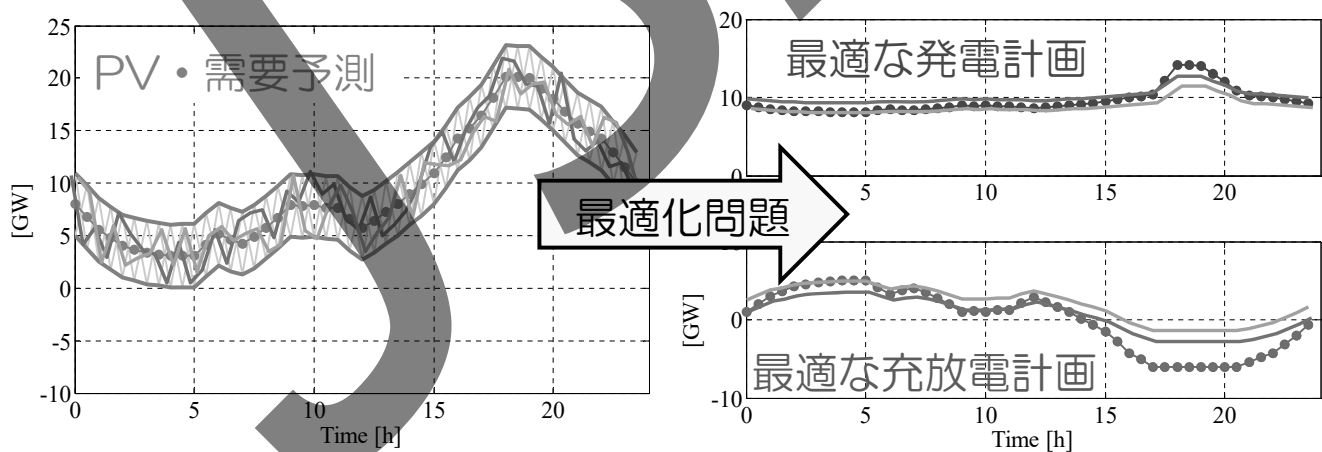
需要(PV含) 発電量 蓄電池充放電量



不確かなPV・需要予測のもとで、発電量と蓄電池充放電量の調整代をそれぞれどのように見積もるべきか？

23

区分予測に基づく電力配分最適化



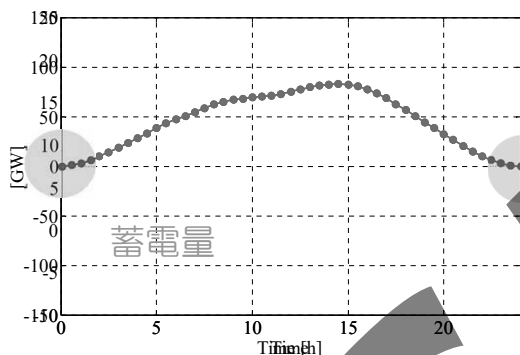
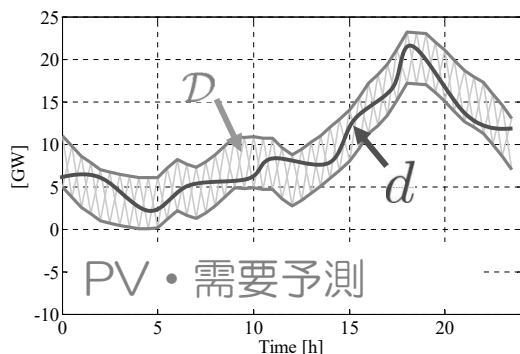
目的

任意のPV・需要予測に対する最適な発電計画を実現できるという意味で適切な調整代を設定する

24

問題設定

需要予測の集合 $\mathcal{D}$ が与えられている。
 このとき、以下の最適化問題の解である発電計画 $v^*(d)$ の
 集合 $\mathcal{V}^* = \{v^*(d) | d \in \mathcal{D}\}$ を求めよ。



最適化問題

$$v^*(d) = \arg \min_v J$$

評価関数

$$J = \sum_{k=1}^T F_1(v(k)) + \sum_{k=1}^T F_2(\Delta x(k))$$

燃料費関数 電池劣化費関数

$$F_1(v(k)) = A_1 + B_1 v(k) + C_1 v(k)^2$$

$$F_2(\Delta x(k)) = A_2 + C_2 \Delta x(k)^2$$

S.t. $x(k+1) = x(k) - d(k) + v(k)$

蓄電量 需要量 発電量

$$\Delta x(k) = x(k+1) - x(k)$$

充放電量

$$\Delta x_{\min} \leq \Delta x(k) \leq \Delta x_{\max}$$

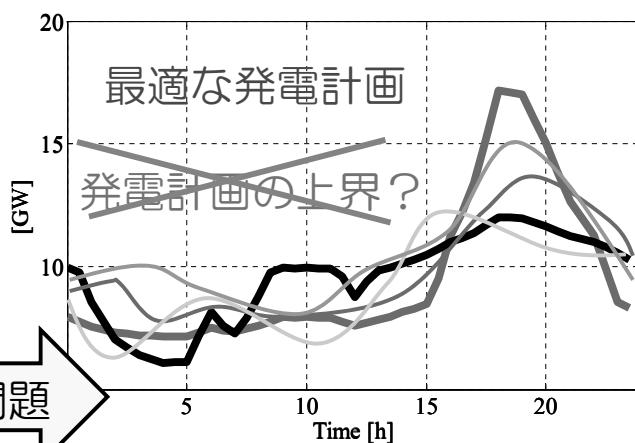
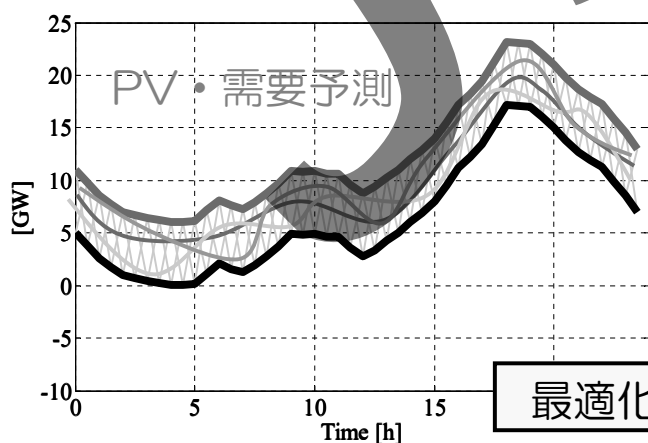
$$x(0) = x(T) \quad v(k) \geq 0$$

25

問題の難しさ

最適な発電計画の集合を厳密に求めるのは難しい

例えば・・・ 最大需要予測と最小需要予測の場合

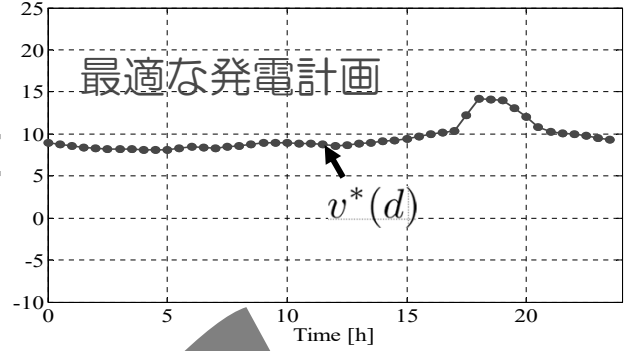
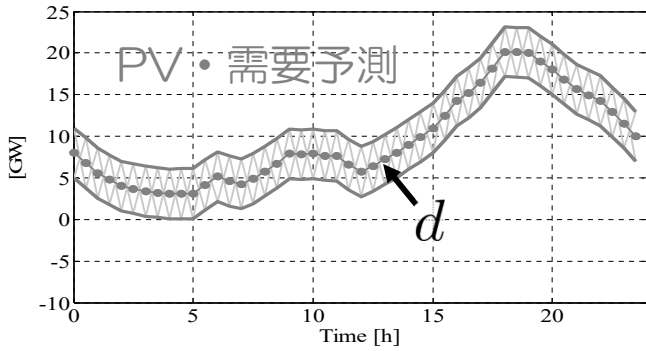


最適化問題

一般に無限回の試行が必要

26

解の単調性について



$$d := \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{48} \end{bmatrix} \quad v^*(d) := \begin{bmatrix} v_1^*(d) \\ v_2^*(d) \\ \vdots \\ v_{48}^*(d) \end{bmatrix}$$

PV・需要予測 最適な発電計画

$$\frac{\partial v^*(d)}{\partial d} := \begin{bmatrix} \frac{\partial v_1^*}{\partial d_1} & \frac{\partial v_1^*}{\partial d_2} & \cdots & \frac{\partial v_1^*}{\partial d_{48}} \\ \frac{\partial v_2^*}{\partial d_1} & \frac{\partial v_2^*}{\partial d_2} & \cdots & \frac{\partial v_2^*}{\partial d_{48}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial v_{48}^*}{\partial d_1} & \frac{\partial v_{48}^*}{\partial d_2} & \cdots & \frac{\partial v_{48}^*}{\partial d_{48}} \end{bmatrix}$$

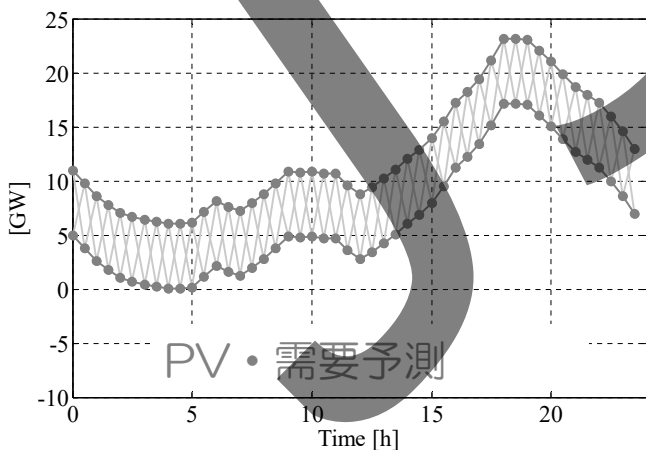
$\frac{\partial v^*}{\partial d}$ の各要素の符号が、与えられたPV/需要予測の集合 D において変化しない

v^* は d に関して単調

27

解の単調性について

例えば・・・



$$\frac{\partial v^*(d)}{\partial d} :=$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial v_1^*}{\partial d_1} & \frac{\partial v_1^*}{\partial d_2} & \cdots & \frac{\partial v_1^*}{\partial d_{48}} \\ \frac{\partial v_2^*}{\partial d_1} & \frac{\partial v_2^*}{\partial d_2} & \cdots & \frac{\partial v_2^*}{\partial d_{48}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial v_{48}^*}{\partial d_1} & \frac{\partial v_{48}^*}{\partial d_2} & \cdots & \frac{\partial v_{48}^*}{\partial d_{48}} \end{bmatrix}$$

$\bar{d}_k$: 時刻 k での最大需要

$\underline{d}_k$: 時刻 k での最小需要

$$v_1^*(\underline{d}_1, \bar{d}_2, \dots, \bar{d}_{48}) \leq v_1^*(d) \leq v_1^*(\bar{d}_1, \underline{d}_2, \dots, \underline{d}_{48})$$

$$v_2^*(\underline{d}_1, \underline{d}_2, \dots, \bar{d}_{48}) \leq v_2^*(d) \leq v_2^*(\bar{d}_1, \bar{d}_2, \dots, \underline{d}_{48})$$

48 × 2 回の試行

有限回の試行で幅を計算できる。

28

2次計画問題に対する解の単調性の特徴づけ

2次計画問題

$$v^* := \arg \min_{v \in \mathbb{R}^n} J(v) \quad \text{s.t.} \quad \begin{cases} A_{\text{in}} v \leq b_{\text{in}} \\ A_{\text{eq}} v = b_{\text{eq}} \end{cases}$$

$$J(v) := \frac{1}{2} v^T Q v - p^T v \quad A_{\text{in}} = \begin{bmatrix} I_n \\ -I_n \end{bmatrix}, \quad b_{\text{in}} = \begin{bmatrix} b^+ \\ -b^- \end{bmatrix}$$

[定理]

不等式拘束および評価関数の1次の項に対して

$$\frac{\partial b^+}{\partial d} = \frac{\partial b^-}{\partial d} = \delta_1 e_{\mathbb{N}[\nu]}^n, \quad \frac{\partial p}{\partial d} = \delta_2 e_{\mathbb{N}[\nu]}^n \quad d \in [d^-, d^+] \subseteq \mathbb{R}^\nu$$

が成り立つものとする。このとき、

$$V(V^T Q V)^{-1} V^T \in \mathcal{Q}_V \quad \text{im}(V) = \ker(A_{\text{eq}}^T), \quad V^T V = I_{n-r}$$

であるならば、 v^* は d に関して単調である。

$$\mathcal{Q}_V := \{M \in \mathcal{M} | M^{-1} \in \mathcal{R}\}$$

29

数値シミュレーションによる検討

最適化問題

$$v^*(d) = \arg \min_v J$$

$$\text{評価関数 } J = \sum_{k=1}^T F_1(v(k)) + \sum_{k=1}^T F_2(\Delta x(k))$$

燃料費関数 電池劣化費関数

$$F_1(v(k)) = B_1 v(k) + C_1 v(k)^2$$

$$F_2(\Delta x(k)) = B_2 \Delta x(k) + C_2 \Delta x(k)^2$$

$$\text{s.t. } x(k+1) = x(k) - d(k) + v(k)$$

蓄電量 需要量 発電量

$$\Delta x(k) := x(k+1) - x(k)$$

充放電量

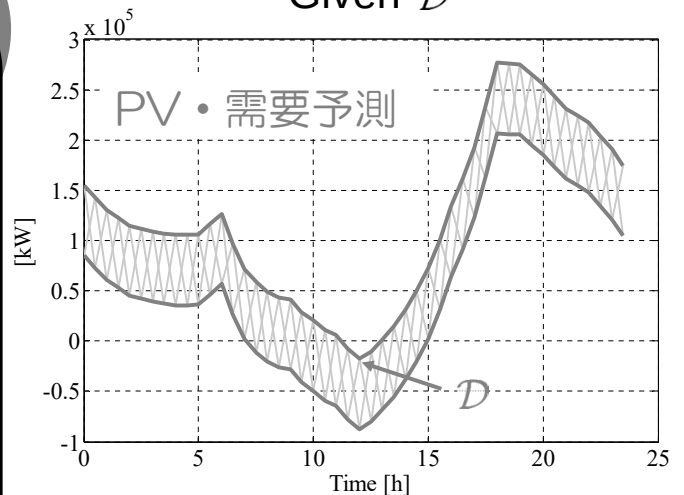
$$\Delta x_{\min} \leq \Delta x(k) \leq \Delta x_{\max}$$

$$x(0) = x(T) \quad v_{\min} \leq v(k) \leq v_{\max}$$

$$v_{\min} = 1 \times 10^7 \text{ [W]} \quad \Delta x_{\min} = -10 \times 10^7 \text{ [W]}$$

$$v_{\max} = 3 \times 10^8 \text{ [W]} \quad \Delta x_{\max} = 10 \times 10^7 \text{ [W]}$$

Given $\mathcal{D}$



$$B_1 = 4.60 \times 10^{-3} \text{ [JPY/Wh]}$$

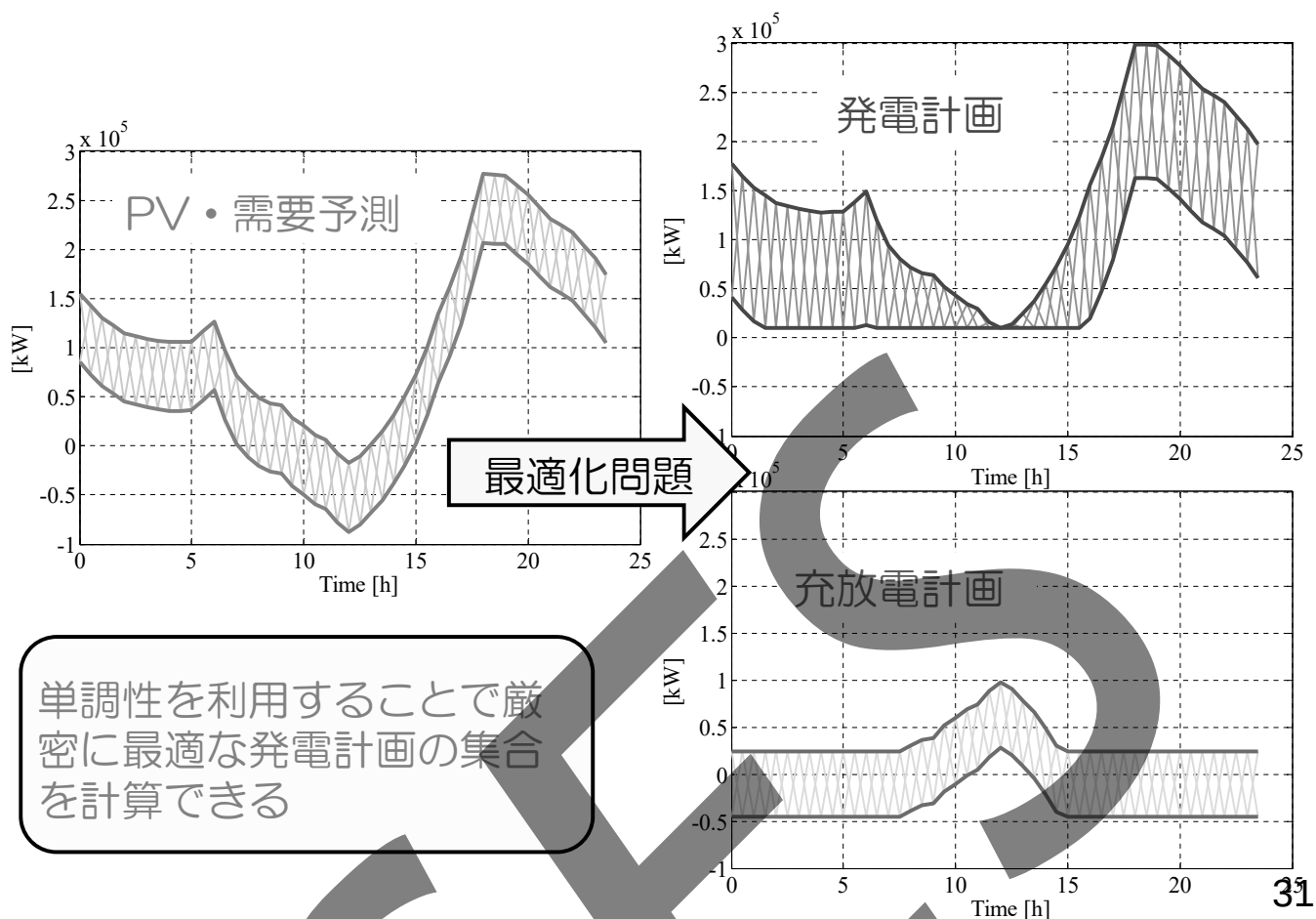
$$C_1 = 1.05 \times 10^{-12} \text{ [JPY/W}^2\text{h]}$$

$$B_2 = -2.17 \times 10^{-1} \text{ [JPY/Wh]}$$

$$C_2 = 1.80 \times 10^{-8} \text{ [JPY/W}^2\text{h]}$$

30

数値シミュレーション結果



まとめ

PV・需要予測の不確実さのもとで、需要家側も配慮した需給バランスの実現を目指して. . .

1. EEDC（系統側）＋HDC（需要家側）の枠組み
2. 時間分解能バランシングから
時空間分解能需給バランシングへ
3. 予測不確実さを含む階層型最適化の基礎
～確率的アプローチ
4. 区間予測を用いた最適化
～確定的アプローチ