

# 最急降下法を用いたリアルタイム料金設定による負荷平準化

宮野 雄基 滑川 徹 (慶應義塾大学)

## Load leveling Control by Real-Time Pricing Based on Steepest Descent Method

\*Y. Miyano, T. Namerikawa (Keio University)

**Abstract**— This paper describes load leveling control by real-time pricing based on steepest descent method. First, we propose a profit maximization problem of demand and supply, satisfying the supply constraint and the balance between supply and demand. Then we rewrite to dual problem which minimizes electricity price. We solve the problem by steepest descent method and proof its convergence. Finally some numerical simulations show the effectiveness of the load leveling control.

**Key Words:** Real-Time Pricing, Smart Grid, Steepest Descent Method, Electricity market

### 1 はじめに

生活水準向上などにより電力需要が増加する一方で、環境への関心が高まっている今、自然エネルギーや蓄電池を統合した効率的なエネルギーシステムが求められている。そのひとつとして、電力価格により電力需要量を制御するダイナミックプライシング、特に1時間間隔など細かい時間間隔で価格を調整するリアルタイム料金が注目を集めている<sup>1)</sup>。しかし制御理論からのアプローチの結果は少なく、またスマートメータなど新たな技術によるシステムでの有用性を検証する必要がある。

需要側の経済的な効率化として市場原理、つまり電力市場が挙げられる<sup>2)</sup>。電力自由化により、海外では電力市場が機能しており、日本にも日本卸電力取引所が存在する。しかし電力市場では需要家が入札をする必要があり、小口需要家や、複数の小口需要家が含まれるCEMSが入札を行うのは難しい。ここでは、需要計画と供給計画のみから最適価格を決定する電力市場を考える。

この電力市場は一般的な市場と異なる面がある。まずリアルタイムで需給バランスを整えなければならない。加えて大きい壁となるのが、消費側と生産・管理側での情報の差である。実際、リアルタイム料金においてもこの情報の差によって、消費者の行動に不安定さが増し、需要予測や価格決定が困難になる。これに対して非線形モデル<sup>3)</sup>を提案した文献があるが、供給制約を考慮しておらず、また需要家、供給家の動きによっては価格が安定しない場合がある。

そこで本稿では最急降下法を用いたリアルタイム料金設定法を提案することにより、需要家の負荷平準化を行う。本稿の提案制御則は、適切なステップ幅を与えることにより、文献<sup>3)</sup>で安定しない場合でも安定させることができる。また需要計画量を、設定した供給制約内または近傍に収束させることができる。

本稿の構成は以下のとおりである。まずリアルタイム料金における電力市場モデルを説明する。続いて求める最適化問題とその双対問題を示す。その後双対問題の解法として最急降下法を提案し、その収束性を確認する。最後にシミュレーションを行ない、提案法の有用

性を確認する。

### 2 問題設定

電力市場は大きく分けて、需要家、供給家、独立系統運用機関 (Independent System Operator, 以下 ISO) から構成されている。ISOとは、電力会社から独立して送電システムの運用管理を行う非営利機関であり、米国や欧州で採用されている。日本では、この業務は電力会社の中央給電指令所が行なっている。需要家と供給家は利益を最大化するよう需要量または供給量を決定するとする。ISOは受給均衡を満たしかつ社会全体の利益を最大化するよう電力価格を決定するとする。ここではISOが求める利益最大化問題について考える。

また電力価格は以下の流れで決定される。概念図を Fig.1 に示す。

1. ISOが1日の1時間ごとの電力価格を設定し、需要家と供給家に伝える
2. 需要家と供給家が運用計画を立て、それをISOに伝える
3. 需給バランスが取れない、または供給制約を満たさない場合、新たに価格を調整し、需要家と供給家に伝える
4. 以下、2.3.をN回繰り返す

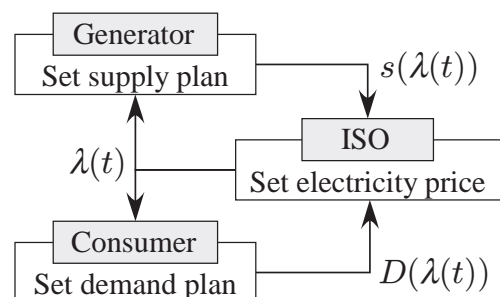


Fig. 1: Schematic views of the model

#### 2.1 需要家、供給家のモデル

$x_d \in \mathbb{R}_+$  (0以上の実数) を需要家が消費する電力量,  $x_s \in \mathbb{R}_+$  を供給家が生産する電力量,  $[s_{\min}, s_{\max}]$  を供給電力制約量,  $\lambda \in \mathbb{R}_+$  (正の実数) を電力価格とする。

需要家が  $x_d$  だけの電力を利用して得られる金銭的価値を表す関数、つまり効用関数を  $v(x_d)$  とする。また供給家が  $x_s$  だけ発電するのにかかる金銭的費用を表す関数、つまり費用関数を  $c(x_s)$  とする。ただしこの需要家、供給家は、複数の需要家、供給家を1つにまとめたものであり、代表エージェント (Representative Agent) と呼ばれる<sup>4)</sup>。ここで効用関数、費用関数に対して以下の仮定を置く。

仮定 1.  $v(x_d)$  を  $[0, \infty)$  で  $C^2$  級関数、単調増加、かつ厳密に凹とする。また  $c(x_s)$  を  $[0, \infty)$  で  $C^2$  級関数、単調増加、かつ厳密に凸とする。

価格  $\lambda$  が示された場合、各エージェントが決定する最適な需要量  $d(\lambda) \in \mathbb{R}_+$  および供給量  $s(\lambda) \in \mathbb{R}_+$  は以下のように定義できる。

$$d(\lambda) = \operatorname{argmax}_{x_d \geq 0} v(x_d) - \lambda x_d \quad (1)$$

$$= \max_{x_d \geq 0} \{0, \{x | \dot{v}(x_d) = \lambda\}\} \quad (2)$$

$$s(\lambda) = \operatorname{argmax}_{s_{\min} \leq x_s \leq s_{\max}} \lambda x_s - c(x_s) \quad (3)$$

$$= \max_{s_{\min} \leq x_s \leq s_{\max}} \{0, \{x | \dot{c}(x_s) = \lambda\}\} \quad (4)$$

(1) 式は、電力により得られる金銭的価値  $v(x_d)$  と電力の購入費用  $\lambda x_d$  の差分、つまり需要家が得る利益が最大になるように需要量を決定することを意味する。同様に (3) 式は、電力の売上  $\lambda x_s$  と発電費用  $c(x_s)$  の差分、つまり供給家が得る利益が最大になるように供給量を決定することを意味する。概念図を Fig.2 に示す。

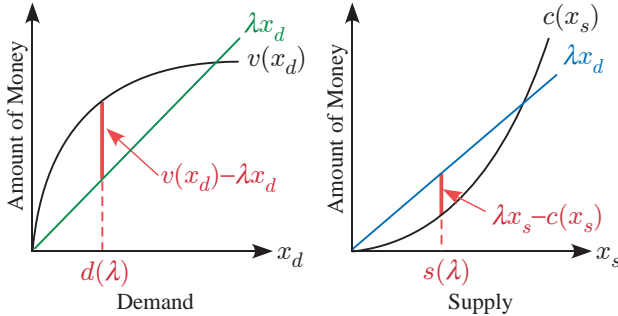


Fig. 2: Utility function and Cost function

また簡略化の為に、需要関数、供給関数を  $d(\lambda) = \dot{v}^{-1}(\lambda)$ ,  $s(\lambda) = \dot{c}^{-1}(\lambda)$  と表記する。

### 3 最適化問題の定式化

#### 3.1 ISO のモデル

本稿で扱う電力市場モデルは入札を行わない。そのため、ISO が知る需要家の情報は需要計画量のみである。そこで ISO について以下の仮定を設ける。

仮定 2. ISO は費用関数  $c(x_s)$  および供給関数  $s(\lambda)$  は既知とする。一方、効用関数  $v(x_d)$  および需要関数  $d(\lambda)$  は未知であるとする。

また、モデルの簡略化のため以下の仮定を加える。これにより、需要計画と供給計画の電力量さえ一致すれば受給均衡が満たされることになる。

仮定 3.

1. 予備容量電力が十分にある。
2. 送配電線における抵抗の損失は無視できる。
3. 送電容量がなく、電力の混雑が存在しない。

ISO が求める最適化問題は、需要家供給家の双方の利益の和  $\{v(x_d) - \lambda x_d\} + \{\lambda x_s - c(x_s)\}$  の最大化である。受給均衡を満たす場合  $x_d = x_s$  なので、以下の式で書き換えられる。

$$\max_{x_d \geq 0, s_{\min} \leq x_s \leq s_{\max}} v(x_d) - c(x_s), \quad \text{s.t. } x_s - x_d = 0 \quad (5)$$

仮定 2 より ISO は関数  $v(x_d)$  を得ることができず、また直接  $x_d, x_s$  を需要家および供給家に司令決定することができない。そこで双対問題を提案する。この双対問題のラグランジュ乗数が価格に対応することを次で確認する<sup>5)</sup>。

#### 3.2 双対問題

ラグランジュ未定乗数を  $\lambda_0$  とすると、(5) 式的双対問題は以下のように表される。

$$\min_{\lambda} \varphi(\lambda), \quad \varphi(\lambda) = \max_{x_d \geq 0, s_{\min} \leq x_s \leq s_{\max}} L(\lambda_0, x_d, x_s), \quad (6)$$

$$L(\lambda_0, x_d, x_s) = (v(x_d) - \lambda_0 x_d) + (\lambda_0 x_s - c(x_s)) \quad (7)$$

この双対問題に対し以下の補題が成り立つ。

補題 1. 仮定 1-3 が成り立つとする。このとき主問題 (5) 式は最適解  $x_d^*, x_s^*$  をもつ。また価格  $\lambda$  は双対問題 (7) 式のラグランジュ乗数  $\lambda_0$  に対応している。

*Proof.* クーン・タッカーの定理より、最適解  $x_d^*, x_s^*$  が存在する必要十分条件は、以下 (8) 式が成り立つような  $\lambda_0$  が存在することである。

$$\frac{\partial L}{\partial x_d} = \dot{v}(x_d) - \lambda_0 = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial x_s} = \dot{c}(x_s) - \lambda_0 = 0 \quad (8)$$

(8) 式が (2) 式、(4) 式にそれぞれ対応していることから、 $x_d^* = d(\lambda_0)$ ,  $x_s^* = s(\lambda_0)$  の時、(8) 式を満たすことがわかる。また価格  $\lambda^*$  がラグランジュ乗数  $\lambda_0$  に対応していることが確認できる。以降  $\lambda_0$  は  $\lambda$  と表記する。また最適解は価格の関数となるので  $x_d^*(\lambda)$ ,  $x_s^*(\lambda)$  と表記する。□

続いて  $f(x_d, x_s) = v(x_d) - c(x_s)$ ,  $h(x_d, x_s) = x_s - x_d$  とすると、以下の補題が成り立つ。

補題 2. 仮定 1-3 が成り立つとする。このとき関数  $f(x_d, x_s)$ ,  $h(x_d, x_s)$  が連続で、かつ  $(x_d, x_s)$  の領域が非空有界閉集合ならば、関数  $\varphi(\lambda)$  は凸関数である。さらに  $\lambda$  に対するラグランジュ問題の最適解が唯一ならば、関数  $\varphi(\lambda)$  は  $\lambda$  で微分可能であり、その勾配は以下のように与えられる。

$$\nabla \varphi(\lambda) = h(x_d^*(\lambda), x_s^*(\lambda)) \quad (9)$$

*Proof.* 文献<sup>5)</sup>を参照。□

## 4 最急降下法によるアルゴリズム

$\varphi(\lambda)$  は  $x_d, x_s$  それぞれ独立した最大化問題に書き換えることができる.  $\varphi_d, \varphi_s$  がそれぞれ (1) 式, (3) 式に対応しており, 需要家, 供給家の利益最大化の動きであることがわかる.

$$\varphi(\lambda) = \varphi_d(\lambda) + \varphi_s(\lambda) \quad (10)$$

$$\varphi_d = \max_{x_d \geq 0} (v(x_d) - \lambda x_d) \quad (11)$$

$$\varphi_s = \max_{s_{\min} \leq x_s \leq s_{\max}} (\lambda x_s - c(x_s)) \quad (12)$$

双対問題 (6) 式が補題 2 を満たすので,  $\varphi(\lambda)$  は  $\lambda$  に対して微分可能であり, その勾配は以下ようになる.

$$\nabla\varphi(\lambda) = x_s^*(\lambda) - x_d^*(\lambda) = -(d(\lambda) - s(\lambda)) \quad (13)$$

$d(\lambda)$  の値は需要家から与えられるので, ISO は  $\nabla\varphi(\lambda)$  を計算可能である.

最適解  $\lambda^*$  を求める手法のうち, 1 次モデルに基づいた手法として最急降下法が知られている. 最急降下法による更新式は (14) 式で表される. ただし  $t \in \mathbb{Z}_+$  (0 以上の整数) は反復回数,  $\gamma$  はステップ幅であり小さな正の定数である. なお一般的には  $\gamma$  は直線探索により逐一計算されるが, 仮定 2 より直接計算ができないことに注意されたい.

$$\begin{aligned} \lambda(t+1) &= \lambda(t) - \gamma(\nabla\varphi(\lambda)) \\ &= \lambda(t) + \gamma(d(\lambda(t)) - s(\lambda(t))) \end{aligned} \quad (14)$$

以上をまとめると, 価格更新アルゴリズムは, 仮定 1 ~ 3 の下で以下のアルゴリズムで表される.

### アルゴリズム 1.

1. ISO が電力価格の初期値  $\lambda(0)$  を任意に設定する.
2. ISO が設定した価格により需要量, 供給量が決定される. 反復回数を  $t$  とする場合, 以下の式で表される.

$$d(\lambda(t)) = \operatorname{argmax}_{x_d \geq 0} v(x_d) - \lambda(t)x_d \quad (15)$$

$$s(\lambda(t)) = \operatorname{argmax}_{s_{\min} \leq x_s \leq s_{\max}} \lambda(t)x_s - c(x_s) \quad (16)$$

3. 需要量, 供給量から最急降下法により価格が設定し直され, 価格  $\lambda(t)$  が更新される.

$$\lambda(t+1) = \lambda(t) + \gamma(d(\lambda(t)) - s(\lambda(t))) \quad (17)$$

4. 以下, 2.3. を  $N$  回繰り返す.

### 4.1 最急降下法の収束性

固定されたステップ幅  $\gamma$  を与えた場合の最急降下法の収束性について確認する. 変数  $\lambda$  の異なる 2 つの値  $\lambda_1, \lambda_2 (\forall \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R})$  を与えた時, 以下の仮定を設ける.

#### 仮定 4.

1.  $\varphi(\lambda) \geq 0, \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}$

2.  $\varphi(\lambda)$  はリプシッツ連続である. つまり, 非負の実数  $K_0 \geq 0$  について次式が成り立つ.

$$\|\nabla\varphi(\lambda_1) - \nabla\varphi(\lambda_2)\| \leq K_0 \|\lambda_1 - \lambda_2\| \quad (18)$$

またリプシッツ定数, つまり  $K_0$  の最小値を  $K$  とする.

3. 下式を満たす  $\alpha_0$  が存在するとする.

$$(\nabla\varphi(\lambda_1) - \nabla\varphi(\lambda_2))(\lambda_1 - \lambda_2) \geq \alpha_0 \|\lambda_1 - \lambda_2\|^2 \quad (19)$$

また  $\alpha_0$  の最大値を  $\alpha$  とする.

このとき以下の収束性が示せる.

定理 1. 仮定 1-4 が成り立つとする.  $\gamma$  が以下を満たす時に, 最急降下法によりアルゴリズム 1 は収束する.

$$0 < \gamma < \frac{2\alpha}{K^2} \quad (20)$$

*Proof.* 最急降下アルゴリズムが縮小写像で表されることを利用して, 収束性を証明する. ある関数  $T(\lambda)$  が縮小写像であることの定義は以下の様に表される.

$$\|T(\lambda_1) - T(\lambda_2)\| \leq \zeta \|\lambda_1 - \lambda_2\|, \quad 0 \leq \zeta < 1 \quad (21)$$

縮小写像  $T(\lambda(t))$  を以下の様に置く.

$$T(\lambda(t)) = \lambda(t+1) = \lambda(t) - \gamma\nabla\varphi(\lambda(t)) \quad (22)$$

ただしこれ以降は簡略化のため  $\lambda(t) \rightarrow \lambda$  と表記する. すると仮定 4 より以下の式変形ができる.

$$\begin{aligned} &\|T(\lambda_1) - T(\lambda_2)\|^2 \\ &= \|((\lambda_1 - \gamma\nabla\varphi(\lambda_1)) - ((\lambda_2 - \gamma\nabla\varphi(\lambda_2)))\|^2 \\ &= \|x - y\|^2 + \gamma^2 (\nabla\varphi(\lambda_1) - \nabla\varphi(\lambda_2))^2 \\ &\quad - 2\gamma (\nabla\varphi(\lambda_1) - \nabla\varphi(\lambda_2))(x - y) \\ &\leq \|x - y\|^2 + \gamma^2 K \|x - y\|^2 - 2\gamma\alpha \|x - y\| \\ &= (1 - 2\alpha\gamma + K^2\gamma^2) \|x - y\|^2 \end{aligned} \quad (23)$$

よって縮小写像となるための  $\gamma$  は以下のとおりである.

$$\begin{aligned} (21) \text{ 式} &\Leftrightarrow 0 < (1 - 2\alpha\gamma + K^2\gamma^2) < 1 \\ &\Leftrightarrow 0 < \gamma < \frac{2\alpha}{K^2} \end{aligned} \quad (24)$$

□

### 4.2 リプシッツ定数 $K$ の計算

(18) 式より, 以下が成り立つ.

$$\frac{\|\nabla\varphi(\lambda_1) - \nabla\varphi(\lambda_2)\|}{\|\lambda_1 - \lambda_2\|} \leq K_0 \quad (25)$$

このとき,  $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$  とした場合, (25) 式の左辺は微分を意味する. よって (18) 式は以下のように書き換えられる.

$$K_0 \geq \|\nabla^2\varphi(\lambda)\| = \left\| \frac{1}{\ddot{v}(\dot{v}^{-1}(\lambda))} - \frac{1}{\ddot{c}(\dot{c}^{-1}(\lambda))} \right\| \quad (26)$$

仮定 1 より  $\dot{c} > 0, \dot{v} < 0$  なのでリプシッツ定数  $K$  は以下のように得られる.

$$K = \max_{\lambda} \left( \frac{1}{\ddot{c}(\dot{c}^{-1}(\lambda))} - \frac{1}{\ddot{v}(\dot{v}^{-1}(\lambda))} \right) \quad (27)$$

### 4.3 係数 $\alpha$ の計算

(19) 式より, 以下が成り立つ.

$$\begin{aligned}\alpha_0 &\leq \frac{(\nabla(\lambda_1) - \nabla(\lambda_2))(\lambda_1 - \lambda_2)}{\|\lambda_1 - \lambda_2\|^2} \\ &\leq \frac{\|\nabla\varphi(\lambda_1) - \nabla\varphi(\lambda_2)\|}{\|\lambda_1 - \lambda_2\|}\end{aligned}\quad (28)$$

(25) 式と同様に右辺は微分を意味する. よって (28) 式は以下のように書き換えられる.

$$\alpha_0 \leq \|\nabla^2\varphi(\lambda)\| = \left\| \frac{1}{\ddot{v}(\dot{v}^{-1}(\lambda))} - \frac{1}{\ddot{c}(\dot{c}^{-1}(\lambda))} \right\| \quad (29)$$

よって  $\alpha$  は以下のように得られる.

$$\alpha = \min_{\lambda} \left( \frac{1}{\ddot{c}(\dot{c}^{-1}(\lambda))} - \frac{1}{\ddot{v}(\dot{v}^{-1}(\lambda))} \right) \quad (30)$$

ここで,  $K$  と  $\alpha$  の解法を求めたが, モデル上ではこれらの値を得ることはできないことに注意されたい. なお  $0 < \gamma < 2/K$  のとき  $\lambda$  は発散しない.

## 5 加法的摂動, 乗法的摂動の考慮

需要関数に摂動を考慮したより現実的なモデルへ拡張した場合を考える. 摂動は乗法, 加法の 2 種類で表すことができる. 効用関数をそれぞれ以下のように設定する.

$$\tilde{v}(x_d) = (1 + \delta_2)v\left(\frac{x_d}{(1 + \delta_2)}\right) \quad (31)$$

$$\tilde{v}(x_d) = v(x - d_1) \quad (32)$$

$(1 + \delta_2) \in \mathbb{R}_+$  は乗法的摂動,  $d_1 \in \mathbb{R}_+$  は加法的摂動,  $\tilde{v}(x_d) : \mathbb{R}_+ \mapsto \mathbb{R}_+$  は摂動を含めた効用関数である.  $\lambda > 0$  が与えられた場合, (31) 式の需要関数は (33) 式, (32) 式の需要関数は (34) 式で表される.

$$\tilde{d}(\lambda) = (1 + \delta_2)\dot{v}^{-1}(\lambda) \quad (33)$$

$$\tilde{d}(\lambda) = d_1 + \dot{v}^{-1}(\lambda) \quad (34)$$

市場での意味を考えると,  $(1 + \delta_2)$  はモデル化誤差, 時刻単位の商品ごとの摂動を表し,  $d_1$  は価格に影響されず最低限必要な電力需要量とみなすことができる.

摂動を考慮した効用関数を  $\tilde{v}(x_d)$ , 需要関数を  $D(\lambda)$  と表記すると, 2 つの摂動をまとめた効用関数および需要関数は以下のように表される.

$$\tilde{v}(x_d) = (1 + \delta_2)v\left(\frac{x_d}{1 + \delta_2} - d_1\right) \quad (35)$$

$$D(\lambda) = d_1 + (1 + \delta_2)\dot{v}^{-1}(\lambda) \quad (36)$$

これより,  $\lambda \rightarrow \lambda(t)$  と表記を元に戻すと, アルゴリズムは以下のように書き換えられる.

### アルゴリズム 2.

1. ISO が電力価格の初期値  $\lambda(0)$  を任意に設定する.

2. ISO が設定した価格により, 需要量, 供給量が決定される. 反復回数を  $t$  の場合, 以下の式で表される.

$$D(\lambda(t)) = d_1 + (1 + \delta_2)\dot{v}^{-1}(\lambda(t)) \quad (37)$$

$$s(\lambda(t)) = \dot{c}^{-1}(\lambda(t)) \quad (38)$$

3. 需要量, 供給量から最急降下法により価格が設定し直され, 価格  $\lambda(t)$  が更新される.

$$\lambda(t+1) = \lambda(t) + \gamma(D(\lambda(t)) - s(\lambda(t))) \quad (39)$$

4. 以下, 2.3. を  $N$  回反復する.

## 6 シミュレーション

このセクションでは数値シミュレーションを行う. このシミュレーションでは, 1 日先の 1 時間単位の電力需要計画を平準化することを目的とする.

需要関数のパラメータ調整として  $\mu_1, \mu_2$  を定義し, (37) 式を以下に書き換える.

$$D(\lambda(t)) = \mu_1 d_1 + \mu_2 (1 + \delta_2)\dot{v}^{-1}(\lambda(t)) \quad (40)$$

ここで,  $\delta_2 \sim \mathcal{N}(0, 0.01^2)$  とする.  $d_1$  を 2011 年 8 月 10 日の東京電力の電力使用実績データ<sup>7)</sup> を使用することで,  $\mu_1 d_1$  を最低限必要な電力需要量とみなす. パラメータについては,  $\mu_2$  を電力価格の弾力性を考慮した上で任意に設定する.  $\mu_1$  は, 需給制約がない場合の 1 日の  $D(t)$  の合計値が, 1 日の  $d_1$  の合計値とほぼ一致するように調整する. シミュレーションでの反復回数を  $N$ , 時刻  $k$  における電力需要または価格を  $\bullet_k$  と表記すると以下のような式で表される.

$$\sum_{k=0}^{24} D_k(N) \approx \sum_{k=0}^{24} d_{1,k} \quad (41)$$

また効用関数, 費用関数は以下のように設定する.

$$v(x_d) = a \log(x_d), \quad c(x_s) = b x_s^3 \quad (42)$$

$a, b$  は, 従来の固定電力価格と  $v(x_d)$  または  $c(x_s)$  によって計算される 1 日の合計需要量または供給量が,  $d_1(t)$  の合計値とほぼ一致するように調整される. 時刻  $k$  における固定電力価格を  $\lambda_{f,k}$  と表記すると以下のような式で表される.

$$d_1 \approx \sum_{k=0}^{24} \dot{v}^{-1}(\lambda_{f,k}) \quad (43)$$

概念図を Fig.3 に示す. また各パラメータは  $N = 100$ ,  $s_{\min} = 3.4 \times 10^4$  [MW],  $s_{\max} = 3.6 \times 10^4$  [MW],  $a = 4.009 \times 10^7$ ,  $b = 9.993 \times 10^{-4}$ ,  $\mu_1 = 0.67$ ,  $\mu_2 = 0.2$ ,  $\gamma = 0.5$  とする.

まずシミュレーション結果を Fig.4,5 に示す. 赤, 水, 緑, 紫, 青は反復回数 1 回目から 6 回目, 黒は反復回数 100 回目, 黄色は供給制約条件である. 9 時から 19 時の間に注目すると, 最初は需要量が供給制約を大きく上回っているが, 反復回数が増えるうちに電力価格が増加

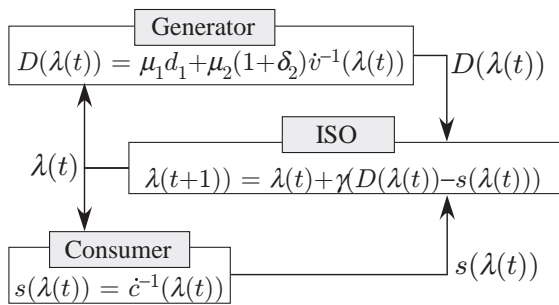


Fig. 3: Schematic views of the simulation model

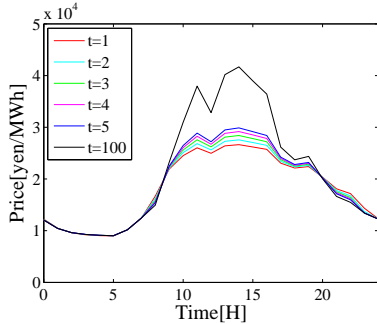


Fig. 4: Electricity price

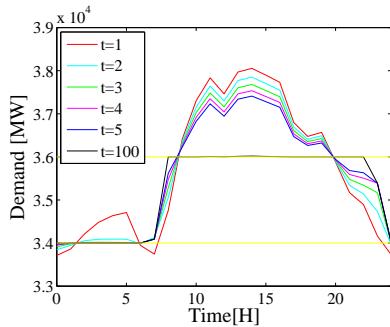


Fig. 5: Electricity demand

し、電力需要が低下していることがわかる。そして黒線はほぼ供給制約内または近傍に値を抑えられていることがわかる。

続いて、文献<sup>3)</sup>の手法との比較を行った。反復回数100回目の、1日先の1時間単位の電力需要計画を Fig.6 に示した。青が従来法、赤が提案法である。従来法と比べて、提案法では供給制約内または近傍に値を抑えられている。

また、このとき13時と23時の最初20回の計算過程を図示したものが、Fig.7, 8である。横軸は反復回数、赤は13時、青は23時、破線は従来法、実線は提案法である。供給制約を大きく超過する13時の場合、提案法では価格が高くなり、需要を抑えていることがわかる。一方、供給制約内に収まっている23時の場合、従来法と提案法で収束値に差はないことがわかる。なお今回のシミュレーション結果では、23時については提案法のほうが収束速度が高いが、これはステップ幅に応じて結果が変化する。

## 7 おわりに

本稿では、最急降下法を用いた電力市場による、供給制約を考慮した電力需要の負荷平準化を提案した。

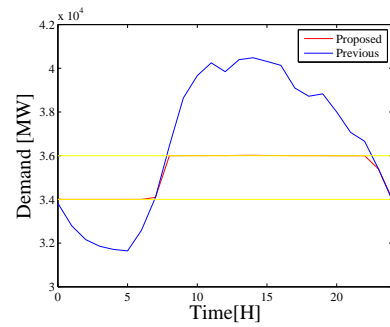


Fig. 6: Comparison between previous model and proposed model

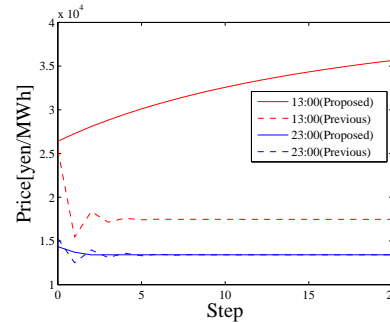


Fig. 7: Price at 13:00 and 23:00

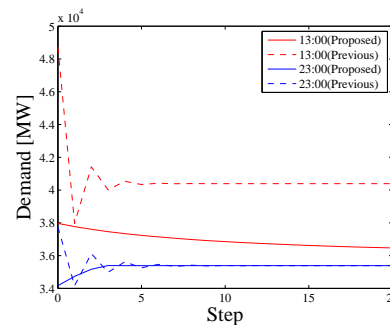


Fig. 8: Demand at 13:00 and 23:00

まず需要家、供給家、ISOのモデル化をした。続いてISOの最適化問題に対して、この双対問題を最急降下法を用いた解法を提案し、収束性を満たすステップ幅を確認した。さらにシミュレーションによりその有用性を確認した。

今後の課題としては、自然エネルギーや蓄電池、またはよりリアルタイムでの制御を考慮したモデルへの拡張が考えられる。

## 参考文献

- 1) A.Faruqui and S.Sergici, "Household Response to Dynamic Pricing of Electricity - A Survey of the Empirical Evidence", *Journal of Regulatory Economics*, 38-2, 193/225 (2010)
- 2) 八田達男, 田中誠, "電力自由化の経済学", 3/39 東洋経済新報社 (2004)
- 3) M.Roozbehani, M.A.Dahleh and S.K.Mitter, "Volatility of Power Grids under Real-Time Pricing", *IEEE Transactions on Power Systems*, Submitted (2011)
- 4) M.Roozbehani, M.A.Dahleh and S.K.Mitter, "On the stability of wholesale electricity markets under real-time pricing", *Proceeding of 49th IEEE Conference on Decision and Control*, 1911/1918 (2010)

- 5) 相吉英太郎, 増田和明, “市場原理のための基礎知識:最適化の理論と手法で接近する価格調整機構”, 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), 130-4, 534/539 (2010)
- 6) D.P.Bertsekas and J.N.Tsitsiklis, Parallel and Distributed Computation:Numerical Methods, 195/208 Prentice Hall (1989)
- 7) <http://www.tepco.co.jp/forecast/index-j.html>