

X-Economy システムによる電力市場のモデル化とその実装

岡田 靖司[†] 川村 秀憲[†] 中村 仁也^{††} 和泉 潔^{†††} 車谷 浩一^{†††}
河野 浩二^{††} 大内 東[†]

[†] 北海道大学大学院工学研究科 〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目

^{††} 富士総合研究所 〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2丁目3番地

^{†††} 産業技術総合研究所 サイバーアシスト研究センター 〒135-0064 東京都江東区青海2丁目41番地6

E-mail: †{yasushi,kawamura,ohuchi}@complex.eng.hokudai.ac.jp,

††{jnakamur,kohno}@star.fuji-ric.co.jp, †††kiyoshi@ni.aist.go.jp, ††††kurumatani@w-econ.org

あらまし 本研究では、電力取引自由化において電力事業が発電部門と配電部門に分離された形態を想定し、2つの部門をエージェント化し、電力取引市場をモデル化する。電力取引市場は前日市場とリアルタイム市場からなるものとする。そして配電エージェントの抱える実需要家のタイプが戦略に与える影響に留意してシミュレーションする。実験の結果、電力の市場売買価格が高い時間帯の消費が多い需要家を多く抱える配電エージェントは、コストに敏感になり売買価格の安い前日市場での調達を重視する戦略をとることがわかった。

キーワード 電力取引自由化、電力取引市場、人工市場、X-Economy System

Modeling and implementation of electricity market by X-Economy system

Yasushi OKADA[†], Hidenori KAWAMURA[†], Jinya NAKAMURA^{††}, Kiyoshi IZUMI^{†††}, Koichi
KURUMATANI^{†††}, Koji KAWANO^{††}, and Azuma OHUCHI[†]

[†] Hokkaido University Graduate School of Engineering

^{††} Fuji Research Institute Corporation

^{†††} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Cyber Assist Research Center

E-mail: †{yasushi,kawamura,ohuchi}@complex.eng.hokudai.ac.jp,

††{jnakamur,kohno}@star.fuji-ric.co.jp, †††kiyoshi@ni.aist.go.jp, ††††kurumatani@w-econ.org

Abstract In this study, we make a model of electricity market supposing that power industry is separated into the power generation section and the power distribution section. We assume that electricity market consists of day-ahead market and realtime market. In order to research effect that consumer type has on the power distribution agent's tactics, we simulate electricity market. As a result, we found that power distribution agents that have consumers that demand much power of high costs choose tactics to buy much power in day-ahead market.

Key words Electricity Dealing Deregulation, Electricity Market, Artificial Market, X-Economy System

1. はじめに

近年諸外国において、電力取引自由化による電力市場の導入が進められている。日本においても平成12年3月より大口の需要家を対象とした電力の小売が自由化されており、将来的には発電・配電・送電事業の分離や大口以外の小売の自由化など、より広範な自由化が進むものと見られている [1].

従来の配電事業は実需要家に電力を配送するだけであった

が、自由化が進展した場合、実需要家のニーズをつかんだ独自の商品開発に取り組む必要が出てくる [2]. すなわち、実需要家の種類が配電事業者の行動戦略に大きく影響してくると思われる。

そこで本研究では、電力事業者が発電事業者と配電事業者に分離された形態を想定し、それぞれをクラシファイアシステムを用いてモデル化する。そしてエージェントベース・シミュレータである X-Economy System を用いて電力市場のシミュ

レーションを行い、異なる実需要家を抱える配電事業者の行動戦略の違いを観察する。

2. X-Economy System

本研究では X-Economy System [3] を用いてモデルの実装を行っている。X-Economy System とは人工市場研究用のエージェントベースシミュレータであり、基本的な要素がモジュール化されている。このため、利用者は必要な部分を変更するだけで実験を行うことができる [4]。

X-Economy System では決済方法として板寄せ方式を用いており、取引中での情報の流れも本研究の設定と同じなので、電力市場の実装にあたってはエージェントの予測・注文・学習といった、意思決定の部分だけを変更している。

3. 電力市場

3.1 電力市場の構成

諸外国における電力市場は一般的に相対市場、前日 (DA) 市場、リアルタイム (RT) 市場から成り立つ。本研究では簡略化のために DA 市場と RT 市場のみを実装し、1 時間ごとに取引を行うこととする。DA 市場では翌日の現時間における電力の供給権が取引され、RT 市場では当日の現時間における電力の供給権が取引される。

3.2 決済方法

欧米の電力市場では決済方法としてプール制と呼ばれる方法が多く用いられている [2]。このプール制は株式市場で用いられている板寄せ方式とほぼ同一であり、本研究においては DA 市場・RT 市場ともに板寄せ方式を用いる。これは、発電エージェントと配電エージェントの注文を総計して需要供給曲線を描き、その交点を売買価格として、売買価格以上の価格をつけている売り注文と売買価格以下の価格をつけている買い注文を一律売買価格で売買を成立させてしまう方法である。

DA 市場では発電エージェントは売り、配電エージェントは買いの注文しか出さず、注文量と注文価格を自由に設定できる。一方 RT 市場では、発電エージェントは (発電容量-前日の DA 市場における販売量) の注文量で売り注文を出す。前日の DA 市場で発電量以上を販売してしまった発電エージェントは $+\infty$ の価格でその分の買い注文を出す。配電エージェントは $+\infty$ の価格で (実需要量-前日の DA 市場における購入量) の注文量で買い注文を出す。前日の DA 市場で実需要量以上を購入してしまった配電エージェントは価格 1 でその分の売り注文を出す。

3.3 取引の流れ

本モデルにおける取引の流れを以下に示す。

- (1) 発電・配電エージェントが売買についての予測を行う
- (2) 発電・配電エージェントが DA・RT 市場に注文を出す
- (3) DA・RT 市場において売買を成立させる
- (4) 発電・配電エージェントに売買の情報を伝える
- (5) 発電エージェントが発電費用を支払い、配電エージェントが需要家から料金を徴収する
- (6) 発電・配電エージェントが売買の情報を元に学習を行う

表 1 クラシファイアの構造
Table 1 Structure of classifier.

現在 時間	状態部						行動部
	前日			前時間			
	DA 売買価格	RT 売買価格	DA 依存度	DA 売買価格	RT 売買価格	DA 依存度	
2bit	3bit	3bit	3bit	3bit	3bit	3bit	

表 2 発電エージェントのクラシファイアの状態部
Table 2 Power generation agent's condition part of classifier.

ビット	000	001	010	011	100	101	110	111
売買価格-コスト	~0	1	2	3,4	5~7	8~11	12~16	17~
依存度 (%)	0~12	13~25	26~38	39~50	51~63	64~75	76~88	89~100

表 3 配電エージェントのクラシファイアの状態部
Table 3 Power distribution agent's condition part of classifier.

ビット	000	001	010	011	100	101	110	111
販売価格-売買価格	8~	7~5	4,3	2	1	0	1	2~
依存度 (%)	0~12	13~25	26~38	39~50	51~63	64~75	76~88	89~100

4. エージェント

現実の電力市場の参加者は、過去の価格を参考に予測を行うことが多い。そこで本研究では発電・配電エージェントともにクラシファイアシステムを用いて電力の売買価格と RT, DA 市場での売買比率の予測を行う [5]。クラシファイアシステムでは各エージェントは "if 条件部 then 行動部" という形式のルールを多数保有している。条件部は 0, 1, # (任意) の 3 つの記号から成り立っており、それぞれビット化されたある環境情報に対応している。与えられた環境情報に対応する条件部をもつルールが複数存在する場合には、各ルールに設定された強度に比例する確率で選択が行われる。選択されたルールの行動部に基づいて行動した後は、環境変化に従って、選択されたルールの強度に報酬が加えられる。以上のことを各時間で繰り返すと、結果的に報酬が多くもらえる優れたルールを高い確率で選択できるようになる。

以下では日付 d , 時間 t とする。

4.1 発電エージェント

発電エージェントは DA 市場用と RT 市場用の 2 つのクラシファイアを備えており、それぞれの状態部は時間、前日の DA 市場の価格、RT 市場の価格、DA 市場への依存度、前時間の DA 市場の価格、RT 市場の価格、DA 市場への依存度から成る (表 1)。時間は現時間、DA・RT 市場の価格は、(各市場における売買価格-単位発電コスト) の度合いを表す。DA 市場への依存度は市場全体において (当該日前日の DA 市場での取引量 / (当該日の RT 市場での取引量 + 当該日前日の DA 市場での取引量)) の度合いを表す。具体的な値と度合いの関係を表 2 に示す。

行動部は注文用のパラメータ α_1 , α_2 , β の値を表しており、 α_1 , α_2 は 0.0~0.9, β は 0.0~1.0 の値をとる。発電エージェントは α_1 , β の値を決める際には DA 市場用、 α_2 の値を決める

際には RT 市場用のクラシファイアを用いる。

4.1.1 予 測

予測は、現在の環境情報をビット化してクラシファイアに与え、パラメータ $\alpha_1, \alpha_2, \beta$ の値を決めることで行う。

本研究では各時間における発電容量は固定とし、その予測は行わないこととする。

4.1.2 注 文

発電容量を C とすると、DA 市場への注文量 $O_{DA}(d, t)$ は以下のようになる。

$$O_{DA}(d, t) = \beta \times C \quad (1)$$

注文価格 $P_{DA}(d, t)$ は単位量当たりの発電コストを MC (円/MWh) とすると以下のようになる。

$$P_{DA}(d, t) = \frac{MC}{1 - \alpha_1} \quad (2)$$

RT 市場への注文量 $O_{RT}(d, t)$ と注文価格 $P_{RT}(d, t)$ は、 $(d-1)$ 日の時間 t における DA 市場における販売量を $S_{DA}(d-1, t)$ とすると以下のようになる。

$$O_{RT}(d, t) = C - S_{DA}(d-1, t) \quad (3)$$

$$P_{RT}(d, t) = \frac{MC}{1 - \alpha_2} \quad (4)$$

4.1.3 支 払

当該日前日に DA 市場で販売した電力と当該日に RT 市場で販売した電力の発電費用の支払いを行う。具体的には、((前日の DA 市場における販売量+RT 市場における販売量) $\times MC$) の分だけ所持金を減じる。本研究では $MC = 10$ 円に固定する。

4.1.4 学 習

市場に注文を出し決済が終わると、その結果を元にエージェントは注文用のパラメータの学習を行う。利用したルールへの報酬 $r(d, t)$ は以下のように定義される [6]。

$$r(d, t) = \frac{\text{売上総額} - \text{発電費用}}{C} \quad (5)$$

売上総額とは、(前日の DA 市場における販売量 \times 前日の DA 市場における売買価格+RT 市場における販売量 \times RT 市場における売買価格) であり、発電費用は、(前日の DA 市場における販売量+RT 市場における販売量) $\times MC$ である。よって、売買価格が高い市場で多く販売したほうが報酬が高くなるようになっていく。

また、確率 0.01 で遺伝的アルゴリズムによる DA 市場用、RT 市場用のクラシファイアへの遺伝的操作が適用される。遺伝的操作が適用された場合、選択、交叉、突然変異の操作が行われる。選択はクラシファイア中のルールを強度が低い順に 2 つ削除する。交叉では残りのルールの中から強度に応じたルールを選択して 2 つ選り出し、そのコピーをランダムな点で一点交叉させて作り出した新たな 2 つのルールを加える。突然変異は以上の操作後、各ルールについて確率 0.01 で発生する。突然変異が発生したルールは状態部のビットの一つが 0, 1, # のいずれかに変化し、行動部に $-0.1 \sim +0.1$ のランダムな値が加えられる。

4.2 配電エージェント

配電エージェントは DA 市場用のクラシファイアのみを備えており、その状態部は発電エージェントと同様である。ただし、価格の部分は (需要家への期待販売価格-各市場における売買価格) の度合いを表す。本研究では需要家への販売価格は一定であり、期待販売価格も一定である。具体的な値と度合いの関係を表 3 に示す。

行動部は注文用のパラメータ δ, γ の値を表しており、それぞれ 0.0 \sim 1.0 の値をとる。

4.2.1 予 測

当該日の実需要量 $D(d, t)$ は以下のように決まる。

$$D(d, t) = \epsilon \times DB \quad (6)$$

ϵ は平均 1, 標準偏差 σ の正規乱数, DB は実需要量の基準値である。

配電エージェントは当該日とその前日の実需要量から翌日の実需要量の予測を行う。

$$\hat{D}(d+1, t) = a_0(t) + a_1(t)D(d, t) + a_2(t)D(d-1, t) \quad (7)$$

4.2.2 注 文

DA 市場への注文量 $O_{DA}(d, t)$ は以下のようになる。

$$O_{DA}(d, t) = \delta \times \hat{D}(d+1, t) \quad (8)$$

このときの注文価格 $P_{DA}(d, t)$ は、需要家への小売価格を RP とすると以下のとおりである。

$$P_{DA}(d, t) = (1 - \gamma) \times RP \quad (9)$$

4.2.3 徴 収

需要家から小売料金の徴収を行う。具体的には、((前日の DA 市場における購入量+RT 市場における購入量) $\times RP$) の分だけ所持金を増やす。本研究では $RP = 20$ に固定する。

4.2.4 学 習

学習の仕組みも発電エージェントと同じである。但し報酬 $r(d, t)$ は以下のように定義される。

$$r(d, t) = \frac{\text{小売総額} - \text{購入総額}}{D(d, t)} \quad (10)$$

小売総額は、((前日の DA 市場における購入量+RT 市場における購入量) $\times RP$)、購入総額は、(前日の DA 市場における購入量 \times 前日の DA 市場における売買価格+RT 市場における購入量 \times RT 市場における売買価格) である。よって、売買価格が安い市場で多く購入したほうが報酬が高くなるようになっていく。

実需要量の予測係数の学習は最急降下法を用いて行う。まず、2 乗誤差 ϵ^2 を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \epsilon^2 &= (D(d, t) - \hat{D}(d, t))^2 \\ &= (D(d, t) - a_0(t) - a_1(t)D(d-1, t) \\ &\quad - a_2(t)D(d-2, t))^2 \end{aligned} \quad (11)$$

すると、各係数の更新式は以下のようになる。

表 4 時間ごとの実需要量の基準値と正規乱数の標準偏差

Table 4 Reference point of real demand amount and standard deviation of Gaussian noise on each hour.

	0時 (MWh)	1時 (MWh)	2時 (MWh)	標準偏差
グループ 1	248	254	248	0.01
グループ 2	248	254	248	0.1
グループ 3	113	524	113	0.01
グループ 4	113	524	113	0.1
グループ 5	150	225	375	0.01
グループ 6	150	225	375	0.1

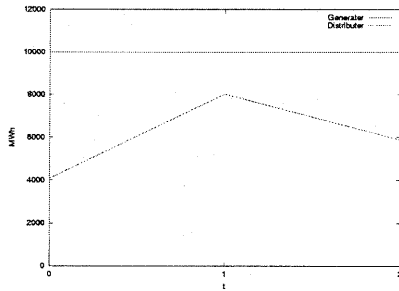


図 1 1日の各時間における全発電容量と全実需要量

Fig. 1 All power generation capacity and real demand amount on each hour in a day.

$$a_0(t) \leftarrow a_0(t) - \alpha \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_0(t)} = a_0(t) + 2\alpha \varepsilon \quad (12)$$

$$a_1(t) \leftarrow a_1(t) - \alpha \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_1(t)} = a_1(t) + 2\alpha \varepsilon D(d-1, t) \quad (13)$$

$$a_2(t) \leftarrow a_2(t) - \alpha \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_2(t)} = a_2(t) + 2\alpha \varepsilon D(d-2, t) \quad (14)$$

本研究では、 $\alpha = 1.0 \times 10^{-11}$ とする。

5. 実験設定

1日の発電容量の等しい発電エージェント5人と、1日の実需要量の等しい配電エージェント24人で実験を行った。発電エージェント1人の各時間における発電容量は2000MWhである。配電エージェントは4人ずつから成り立つ6つのグループに分けられており、それぞれ時間ごとの実需要量の基準値と正規乱数の標準偏差が異なる。配電エージェント1人当たりの詳細を表4に示す。また、各時間における全発電容量と全実需要量の関係を図1に示す。1日3時間として50000日の実験を10回行った。

6. 実験結果

以下の結果は、全てエージェントの学習が安定した最終1000日間についての、10回の実験の平均である。

図2, 3, 4, 5, 6, 7はある1回の実験における最終1000日の、時間別市場ごとの売買価格の推移である。DA市場では時間に関係なく10~20円の間で安定して価格推移しているのが

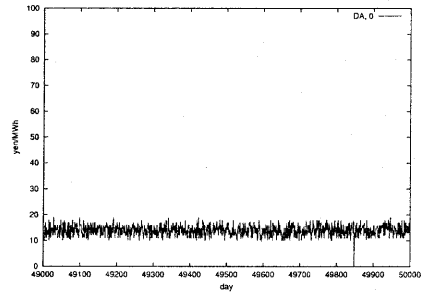


図 2 0時における DA 市場の売買価格

Fig. 2 Trading price on 0 hour in DA market.

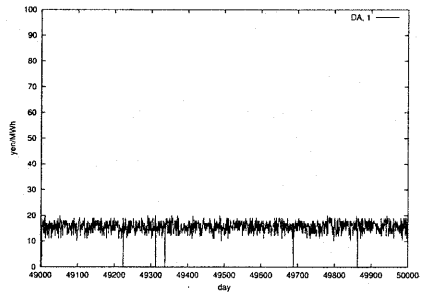


図 3 1時における DA 市場の売買価格

Fig. 3 Trading price on 1 hour in DA market.

表 5 DA・RT 市場における売買価格と取引量

Table 5 Trading price and volume in DA and RT market

	時間	価格 (平均)	価格 (標準偏差)	取引量 (平均)	取引量 (標準偏差)
DA	0	13.563	2.436	1006	392
	1	14.691	2.333	1304	621
	2	14.099	2.430	1284	545
RT	0	15.170	4.929	3081	382
	1	33.107	19.309	6753	591
	2	18.789	7.495	4613	532

分かる。一方 RT 市場では時間により様相が大きく異なる。全発電容量に対して全実需要量がそれほど大きくない0時では時々20円を超える価格になるものの、ほとんど10~20円の間で売買価格が収まっている。やや実需要量が増える2時には価格が20円を超える日が多くなり、最低売買価格も0時に比べやや上昇している。1時には売買価格が最高の100円付近に到達する日も現れ、最低売買価格は15円付近にまで上昇している。これらの原因としては、全発電容量に対して全実需要量が増えていくと、需要供給曲線の交点が右にシフトしていくためだと考えられる。

表5はDA, RT市場それぞれの売買価格と取引量の平均と分散である。DA, RT市場ともに、需要量が多い時間の順に平均価格が大きくなっているのがわかる。特に需要の多い時間1では、平均価格が配電エージェントの販売価格20円を大きく上回っている。

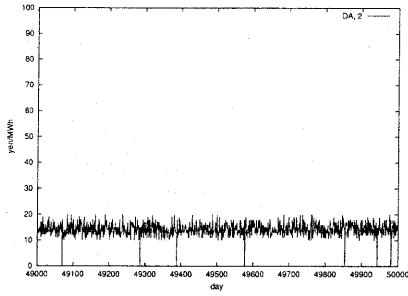


図 4 2時における DA 市場の売買価格
Fig. 4 Trading price on 2 hour in DA market.

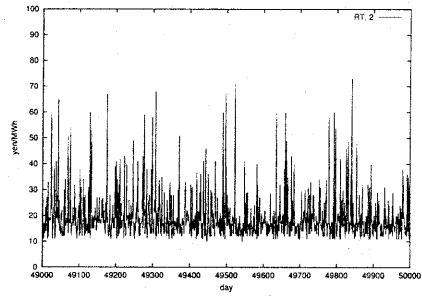


図 7 2時における RT 市場の売買価格
Fig. 7 Trading price on 2 hour in RT market.

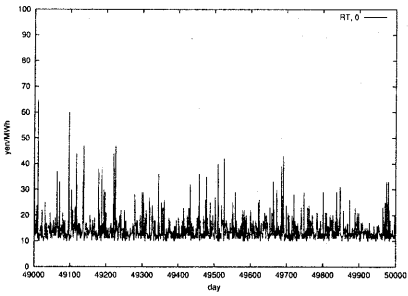


図 5 0時における RT 市場の売買価格
Fig. 5 Trading price on 0 hour in RT market.

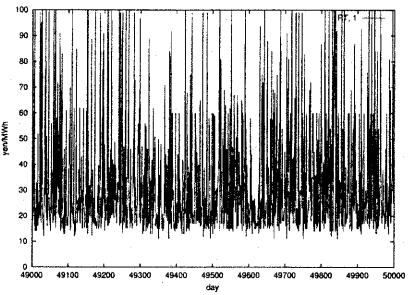


図 6 1時における RT 市場の売買価格
Fig. 6 Trading price on 1 hour in RT market.

表 6 は配電エージェントのグループごとの、利益（小売総額-購入総額）の平均を表す。また、表 7 はその時間ごとの内訳を示したものである。各エージェントとも、売買価格の高い 1 時での売買で赤字を出しており、全体の収支も赤字になっている。特に 1 時における実需要量の多いグループ 3、4 の配電エージェントは全体の赤字が非常に大きい。また、需要の分散の大きい需要家を抱える配電エージェントは、そうでない配電エージェントよりも利益が少ない傾向が見られる。

一方で利益の標準偏差を見ると、グループ 3、4 が突出して大きく、その他はそれほど変わらない。グループ 3、4 の利益の標準偏差が大きいのは売買価格の分散が大きい 1 時の電力を多く購入しているためだと考えられる。需要の分散の大きい

表 6 配電エージェントの利益
Table 6 Profit of power distribution agent

	利益 (平均)	利益 (標準偏差)
グループ 1	-561845	1116628
グループ 2	-634017	966407
グループ 3	-4559000	1942990
グループ 4	-4741904	1787914
グループ 5	-647109	919746
グループ 6	-644913	985902

表 7 配電エージェントの利益の内訳
Table 7 Items of profit of power distribution agents

	0 時	1 時	2 時
グループ 1	1331747	-2503397	609805
グループ 2	1318669	-2535221	582535
グループ 3	597315	-5417626	261311
グループ 4	594879	-5592863	256080
グループ 5	797433	-2290171	845629
グループ 6	794245	-2232335	793177

表 8 配電エージェントのパラメータ
Table 8 Parameters of power distribution agents

	時間 0		時間 1		時間 2	
	δ	γ	δ	γ	δ	γ
グループ 1	0.564	0.407	0.534	0.464	0.553	0.418
グループ 2	0.545	0.450	0.522	0.476	0.547	0.449
グループ 3	0.534	0.448	0.515	0.478	0.534	0.452
グループ 4	0.522	0.463	0.511	0.481	0.527	0.463
グループ 5	0.544	0.427	0.515	0.469	0.548	0.426
グループ 6	0.542	0.449	0.521	0.469	0.535	0.459

い需要家を抱える配電エージェントは、利益の分散も大きいかと思われたが、そうとは言えない結果になった。

表 8 は各時間における配電エージェントが選択したパラメータの値の平均を表す。グループ 3、4 の配電エージェントが各時間で γ の値を大きめに設定し、売買価格の低い DA 市場で確実に電力を確保しようとする様子が確認できる。

表 9 は、実験最終日において、配電エージェントが所有するクラフファイア中の全ルールの状態部に含まれる # の数の平均と分散を示したものである。初期段階では状態部の各ビットの

表 9 配電エージェントのクラシファイア状態部の#の数

Table 9 Number of # in condition part of classifier of power distribution agent

	平均	分散
グループ 1	8.919	3.150
グループ 2	8.218	3.356
グループ 3	8.713	4.308
グループ 4	9.027	3.675
グループ 5	9.289	3.715
グループ 6	8.428	4.511

値は 0, 1, #のいずれかに等確率で決まるために#の平均数は 6, 7 個であるが, 最終日においてはどのグループも平均数が約 9 個になっており, #の数が多いルールの適応度が高くなる傾向を示している。

7. おわりに

本研究では電力市場を仮想的に構築し, その中で異なるタイプの需要家を抱える配電エージェントの戦略の違いを観察した。実験の結果, 市場売買価格が高い時間帯の消費が多い需要家を多く抱える配電エージェントは, コストに敏感になり, 少しでも安い市場で確保しようとする傾向が強くなることがわかった。

文 献

- [1] 石黒 正康, "市場争奪——電力小売り自由化," 日刊工業新聞社, 東京, 2001.
- [2] 井熊 均, 岩崎 友彦, 古澤 靖久, "電力取引ビジネス," 井熊 均 (編), 東洋経済新報社, 東京, 2001.
- [3] <http://www.x-econ.org/>
- [4] Hidenori Kawamura, Azuma Ohuchi and Koichi Kurumatani: Development of X-Economy System for Simulation of Multi-Agent Economy, "Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems" in Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, Vol. 72, A. Namatame et al. (Eds.), IOS Press, Ohmsha, pp.188-197(2002).
- [5] 小宮山 良一, 下村 貴裕, 藤井 康正, 山地 憲治, "送電系統を考慮に入れた電力市場のマルチエージェントシミュレーション," 第 26 回システム工学部会研究会, pp.25-30, Nov.2002.
- [6] 渡辺 勇, 岡田 健司, "電力市場シミュレーションに基づく取引価格形成の検討," 第 26 回システム工学部会研究会, pp.31-38, Nov.2002.