

通信ネットワークを介した電力市場モデルに関する研究

松本 啓之亮 大阪府立大学大学院工学研究科教授

1 まえがき

現代の社会システムは自律的に意思決定を行うプレイヤー(主体)が複数存在し、それらの間には競合、協調関係が成り立っている。このような状況下で通信ネットワークを介したコンピュータ市場が資源配分、スケジューリング、最適化問題への解法[1]-[3]として提案されている。本研究では電力市場モデルの具体例として、現在注目を浴びている電力負荷管理システムであるD SM(Demand Side Management)[4]システムを取り上げる。

モデル化に際して、管理可能な電力負荷(電力需要家)はすべて負荷エージェントとして表現される。各負荷エージェントの特性は、電力需要に対する効用関数としてモデル化される。これまでの多くの研究[3]では、この効用関数は何らかの形で与えられるものとしていた。しかし、効用関数の決定は容易ではなく、動的に変化し得るものである。このため、ここでは負荷エージェントの効用関数を通信ネットワークを介してオンラインで推定する方法を提案する。これにより、より正確に効用関数が推定でき、需要家の嗜好の変化にも追従することが可能となる。

2 効用関数

ゲーム理論は効用という評価基準でさまざまな社会状況に対して現在起こっている状況を表現し、その善し悪しを明確にできること、またそれに対して適切な対策を具体的に提示することができることが特徴として挙げられる。本研究においてもこの“効用”という評価基準を用いてシステムをとらえる。ここでは対象システムに対して、システムに存在する主体とその主体の意思、そしてその主体の得る効用という観点から眺め、以下のような考察を行いシステムをモデル化し、さまざまな分析ができる状況を構築する。

複数の主体が存在するシステムを考える。このシステムにおいて、合理的思考に基づいて意思決定を行うものと仮定されたある主体は、周りの状況に応じて自律的に意思決定を行い、自分自身の満足度(効用)をより高くしようと考えられる。ここで“周りの状況”として、他の主体の意思決定およびシステムに対する外的要因が考えられる。そこで、各主体の意思決定の組合せに対するある主体の効用を効用関数として次のように定義する。

主体 $p_1, p_2, \dots, p_n$ の意思決定の組合せ $s_1, s_2, \dots, s_n$ と外的要因 e に対する主体 p_i の効用 u_i は、主体 $p_1, p_2, \dots, p_n$ の意思決定の組合せ $s_1, s_2, \dots, s_n$ と外的要因 e によって一意に決定される。つまり、 u_i は $s_1, s_2, \dots, s_n$ と e の関数として、

$$u_i = f_i(s_1, s_2, \dots, s_n, e)$$

と表現することができる。ただし、 $i=1, 2, \dots, n$ である。

3 システムの評価

対象システムにおいて各主体から見た最適状態は異なるので、各主体の効用関数だけでは、システム全体としての状態の善し悪しを判断することは困難である。したがって本研究では、すべての主体ができるだけ多くの効用が得られるように各主体の意思の組合せを選択してこれを最適解とみなす。またこの組合せを選択したときのシステムの状態をシステム全体として最適状態にあるとみなす。

ここで、システムの状態を評価するものとして、システム全体としての効用を考え、システム全体としての効用関数を導入する。システム全体としての効用関数を一般に次式で表す。これは、各主体の効用に重みを掛けたものの和になっている。重みは、システム内での各主体の状況、立場に相違があるためにこれを正規化するためのものである。

$$Y = \sum_{i=1}^n \alpha_i u_i \quad (3.1)$$

ただし、 Y はシステム全体としての効用を表し、 α_i ($i=1, 2, \dots, n$)は重みを表す。

これにより、本研究の目的はシステム全体としての効用関数を最大化することになる。つまり、式 (3.1)の最大化問題に置き換えられる。

4 システムの最適化

ここでは、システム全体としての最適状態を具体的にどのような手段で実現するかということについて検討する。

4.1 手順

システム全体としての最適状態を実現するため、下記の手順に従い問題解決を図る。

- 手順1. システムをモデル化し、各主体の効用関数を求める。
- 手順2. システム全体としての効用関数を求める。
- 手順3. 現状を認識する。
- 手順4. システム全体としての効用を最大にする状態を実現する。

4.2 効用関数の推定

本手法を検討する際、手順1、手順2において次のような問題が考えられる。各主体の効用関数が未知の場合または測定が困難である場合、もしくは時間の推移とともに効用関数が変化する場合、どのような方法で効用関数を算出、決定するのか。また、導出された効用関数が正しいものであるかどうかの判断基準をどのように設定するのか。

このような不確実性や計測不能な未知のパラメータが存在するシステムに対して、本研究では、効用関数のパターン分類とGauss-Newton法による効用関数のパラメータ推定との二段階の方法を採用することにより効用関数を推定する。

効用関数推定の処理手順を以下に示す。

前処理。過去の実績、経験からあらかじめ効用関数のパターンを適当数設定しておき、各パラメータには初期値を与えておく。

処理1. 推定したい効用関数を前処理で作成したパターンのうちの一番近いパターンとして分類する。

処理2. Gauss-Newton法により各パラメータを推定する。

前処理と処理1で特徴点の抽出によるパターン分類を行う。次の処理で用いるGauss-Newton法は初期値依存が強いので、前処理の段階で正確な効用関数にできるだけ近いパターンをあらかじめ作成し、効用関数のパラメータ真値に近い値を初期値として与えておき、収束が迅速に行われるようにする。

処理2では、非線形最小2乗法のうちの傾斜法(降下法)に分類されるGauss-Newton法により、パラメータ推定を行う。Gauss-Newton法は適当な係数の初期値を出発点として、その近くで関数をテイラー展開して、係数の変化分に関して線形な方程式に変換してから方程式を解き、係数の修正値を算出し、その修正値を初期値に加え、これを新たな推定値として上記操作を繰り返すことにより徐々に正確な値に近づけていくという、反復的な求解法である。

Gauss-Newton法によるパラメータ推定は、仮定から計算によって得られる結果と実際に得られる観測値との差を評価値として示すことで、求めたいパラメータが試行錯誤により自動的に獲得されるようになっている。これによって時間の推移によるパラメータの変化、つまり効用関数の変化に追従できる。

本研究で提案する効用関数推定アルゴリズムの導入によって、時々刻々変化するシステムに対して自律的な適応によって迅速にかつ柔軟に対応することができる。また本手法では、複雑で時間のかかる効用関数の推定方法を用いないことで、他の手法ではシステムの時間変化に計算時間が追いつかなくなるようなシステムの効用関数の推定をも可能にしている。

4.3 最適状態の実現

手順1、手順2によって、各主体の効用関数 u_i とシステム全体としての効用関数 Y が推定されたら、手順3によって現状を認識し、手順4によって Y を最大にする各主体の意思の組合せを最適状態として実現するわけであるが、この際、次の点について考察する必要がある。

合理的思考に基づいて意思決定を行う主体が自分自身の効用を最大化するように意思決定を行っている状態(初期状態)から Y を最大にする状態に推移するか、つまり Y を最大にする状態が実現するのかどうか。問題は Y を最大にする状態へ推移させるときに、いくつかの主体の効用が減少する可能性があることである。合理的思考に基づいて意思決定を行う主体は

自分自身の効用を下げるように意思決定は行わないので、各主体が初期状態のときに得られる効用と同じかそれ以上の効用を何らかの手段によって得ることができ、かつその保証がある場合のみ、 Y を最大にする状態への推移が起こる、つまりその状態が実現するということになる。

ここで上記の“何らかの手段”というのは、状態が推移することによって効用が減少した主体への(効用の)還元に対応する。また、“保証がある”というのは、状態を推移させる際に取決め等を行った場合にその取決めを守ることである。多くの場合、主体同士が協調関係を持つことによって、状態が推移することによって効用が減少した主体への還元(現実問題においては補填、報酬等と呼ばれていることが多い)、状態を推移させる際の実現等を得る。

したがって、本研究においてシステム全体としての最適状態を実現することは、言い換えるとすべての主体の効用を減少させることなくシステム全体としての効用を最大化することになる。つまり、 u_i を初期状態以上に保つという制約条件のついた式(3.1)の最大化問題である。よって、上記の手順4は次のように書き換えられる。

手順4. 各主体の効用を減少させないという条件のもとで、システム全体としての効用関数を最大にする状態を実現する。

以上で示した手法によって、システム全体としての最適化を実現することができる。

5 DSMシステム

ここでは、これまでに述べた手法の具体的な市場モデルとして、現在注目を浴びている電力負荷管理システムであるDSMシステムを取り上げる。まずDSMシステムの特徴と経緯を述べ、つぎにDSMシステム実現へ向けてシステムをモデル化する。

5.1 デマンドサイドマネジメント

これまで電気事業においては、電力の経済性および品質を向上させることと電力を安定して供給することが主要課題であると考えられてきた。しかし近年、主要エネルギーが電力へシフトすることによって電力需要が急増し、また季節ごと、時間ごとの電力使用量の格差が生じることによって発電効率が低下するといった新しい課題が出てきた。これらの課題に対応するものとして、従来からロードマネジメント(Load Management)という考え方があった。これは、電力会社が電力需要家の電力使用量を直接的あるいは間接的に制御しようというものである。

しかし、電力システムのより効率的な運営のために、電力会社が一方的に負荷管理を行うだけでなく、電力需要家にも負荷管理に協力してもらうという考え方が広まってきた。DSM(デマンドサイドマネジメント)はロードマネジメントに代わり、現在の電気事業における諸課題の解決策の一つとして注目されているもので、電力会社が電力需要家に働きかけを行うことによって、協調関係に基づいて電力システムをより効率的に運営しようというものである。図5.1はDSMシステムのイメージ図である。

DSMシステムは、電力会社と電力需要家が協調関係をとることにより負荷管理と省エネを推進するという点に大きな特徴がある。具体的には、負荷管理を行い電力需要家の負荷の抑制(省エネ)と平準化を図ることで、電力会社は既存の発電

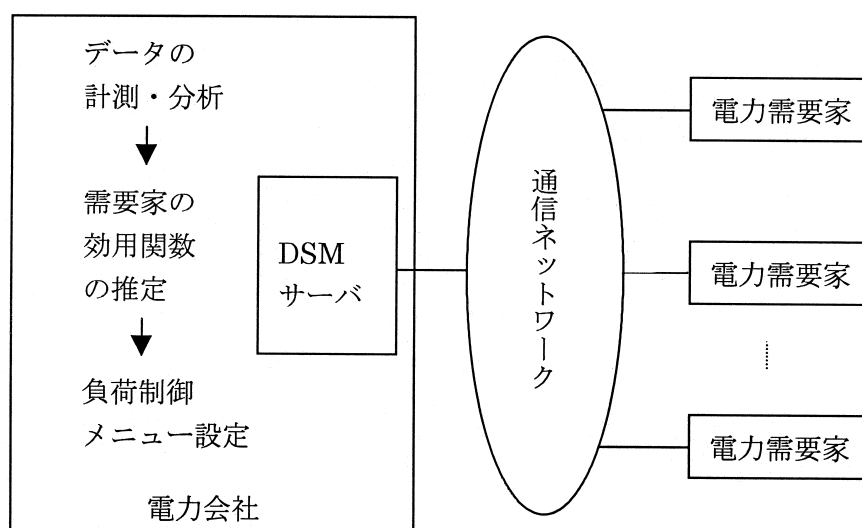


図5.1 DSMシステムの構成

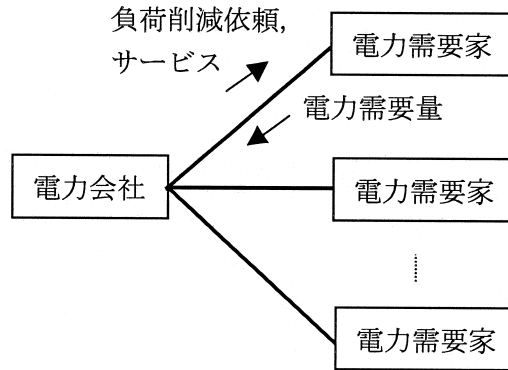


図5.2 DSMシステムの枠組

システムの効率を上昇させ新規の発電設備投資を抑制し、それによって出た利潤を電気料金の引下げや付加サービスの充実という形で電力需要家に還元するといった効果を生み出すことができる。

5.2 DSMシステムのモデル化

つぎに、電力会社および電力需要家の特性を表現し、DSMシステムを実現するためにシステムのモデル化を行う。DSMシステムにおける主体として、電力会社、電力需要家(以後、需要家と表記する)を考え、それらの間のやりとり(各需要家の電力使用量に対する電力会社のさまざまな要求やサービス、それらに対する各需要家の反応)を効用関数を用いて表現する。これらのことを考慮して、図5.2のような枠組を設定する。

負荷エージェントである需要家 i ($i=1, 2, \dots, n$)の電力使用量 r_i (ただし $0 \leq r_i \leq r_{imax}$)を各需要家の意思とみなす。また、需要家 i の電力使用量 r_i に対する需要家 i の満足度を需要家 i の効用 $u_i(r_i)$ (ただし $u_i(0)=0$ であり、 $0 \leq u_i(r_i) \leq 1$ 、つまり効用の最小値は電力を使用していない場合で、効用の最大値は1に正規化して考える)として考え、各需要家の使用する電力の総量 R に対する電力会社の満足度 $v_1(R)$ を電力会社の効用と考える。さらに α を重みとして、システム全体としての効用を電力会社の効用と各需要家の効用の重み付き和 $f(R)$ として定義する。これらの関係を以下にまとめておく。

$$f(R) = v_1(R) + \alpha \sum_{i=1}^n r_i u_i(r_i) \quad (5.1)$$

$$\text{ここで、} R = \sum_{i=1}^n r_i, \quad (5.2)$$

これが電力の需要供給システムにおける現状をモデル化したものである。DSMシステムではこの現状に対して、電力会社が各需要家に対して電力を削減してもらうために使用している電力量に応じたサービスを提供し、双方の利益を向上させるという目的を達成させる。このため、電力会社が需要家 i に対して電力を削減してもらう代わりに提供するサービスを報酬(関数)として $w_i(r_i)$ と表現する。この報酬関数を導入した後の電力会社の効用を $q_1(R)$ 、需要家 i の効用を $p_i(r_i)$ 、システム全体としての効用を $f(R)$ として、上記関係を次のように書き換える。

$$p_i(r_i) = u_i(r_i) + w_i(r_i) \quad (5.3)$$

$$q_1(R) = v_1(R) - \sum_{i=1}^n r_i w_i(r_i) \quad (5.4)$$

$$f(R) = q_1(R) + \alpha \sum_{i=1}^n r_i p_i(r_i) \quad (5.5)$$

この報酬関数が、システム全体としての効用 $f(R)$ を最大にする状態へ推移することによって効用が減少した主体への効用の還元に相当する。これらの考察によって、式(5.2)～(5.5)を用いて本手法を適用し、システム全体としての最適化を図る。数学的には、制約条件式(5.2)と式(5.3)および(5.4)を現状以上に保つという制約下で式(5.5)の最大化問題を解くことになる。

6 シミュレーション

DSMシステムは、電力会社が電力需要家に何らかのサービスを提供することによって電力需要家の使用している電力使用量を削減してもらい電力会社の所望の量に調整し、電力会社、需要家双方の利益を高めるシステムであり、電力会社の視点であることに留意する。したがって、検討するシステムにおいて電力会社の情報は既知であるが需要家の情報は未知であることになる。

DSMシステムモデルの図5.2において、需要家の軒数を3軒、つまり $n = 3$ として考える。以上のことを考慮して、電力会社および各需要家の効用関数を次のように設定する。ただし、 $i = 1, 2, 3$ とする。

$u_i(r_i)$ (未知の関数)

$v_l(R) = -(R - 4)^2/8 + 2$ (既知の関数)

重み α を $\alpha = 1$ と設定すると、システム全体としての効用関数は次のようになる。

$$f(R) = v_l(R) + \sum_{i=1}^3 r_i u_i(r_i)$$

以上の条件のもとで本手法を適用し、システム全体としての最適化を図る。

6.1 効用関数の推定

電力会社および各需要家の効用関数、システム全体としての効用関数を決定するため、条件設定のうち各需要家の効用関数が未知であるので効用関数の推定を行う。あらかじめ、需要家 i の効用関数(のパターン)として

$$u_i(r_i) = a - b \exp(-cr_i) - dr_i \quad (6.1)$$

を与える。ただし、 a, b, c, d は未知のパラメータである。また、各需要家は自分自身の効用を最大化するように意思決定を行うので、計算上の各需要家の電力使用量を r_{ie} と表記すると、需要家の効用関数は単調な凸型関数で $(0, 0)$ 、 $(r_{ie}, 1)$ を通ることになるので、

$$k = d/a \quad (6.2)$$

として、

$$a = b \quad (6.3)$$

$u_i'(r_i) = a \{c \exp(-cr_i) - k\}$, $u_i'(r_{ie}) = 0$ であるから

$$r_{ie} = c^{-1} \log c/k \quad (6.4)$$

$$u_i(r_{ie}) = a \{1 - c^{-1}k (1 + \log c/k)\} = 1 \quad (6.5)$$

が成り立つ。

表6.1 入力データ

	需要家 1	需要家 2	需要家 3
a_0	2.184	2.184	2.184
b_0	2.184	2.184	2.184
c_0	0.875	0.875	0.875
d_0	0.407	0.407	0.407
r_0	1.77	1.77	1.77
r_t	1.50	2.00	3.00

表6.2 推定結果

	需要家 1	需要家 2	需要家 3
a	2.624	1.923	1.371
b	2.624	1.923	1.371
c	0.882	0.871	0.861
d	0.616	0.293	0.089

上記で求めた計算上の電力使用量 r_{ie} と実際に観測される電力使用量 r_{it} との差の2乗

$$s = (r_{it} - r_{ie})^2 \quad (6.6)$$

を目的関数とし、式(6.4)と各パラメータの初期値を用いて、Gauss-Newton 法によりパラメータ c, k を推定する。また式(6.5)、(6.3)、(6.2)からパラメータ a, b, d を順に求め、各需要家の効用関数を推定する。

この問題に用いた入力データと推定結果を、それぞれ表 6.1、表 6.2 に示す。

6.2 報酬による最適化

電力会社および各需要家の効用関数から現状の各需要家の電力使用量とそのときの電力会社および各需要家の効用、そしてシステム全体としての効用を調べる。報酬関数 $w_i(r_i)$ を

$$w_i(r_i) = \begin{cases} 0.1 & (0 \leq r_i \leq 1) \\ (r_i - r_d)/10(1 - r_d) & (1 \leq r_i \leq r_t) \\ 0 & (r_t \leq r_i \leq r_{max}) \end{cases}$$

に設定した場合の各需要家の電力使用量とそのときの電力会社および各需要家の効用、そしてシステム全体としての効用とを比較する。その結果を図 6.1、図 6.2 に図示する。

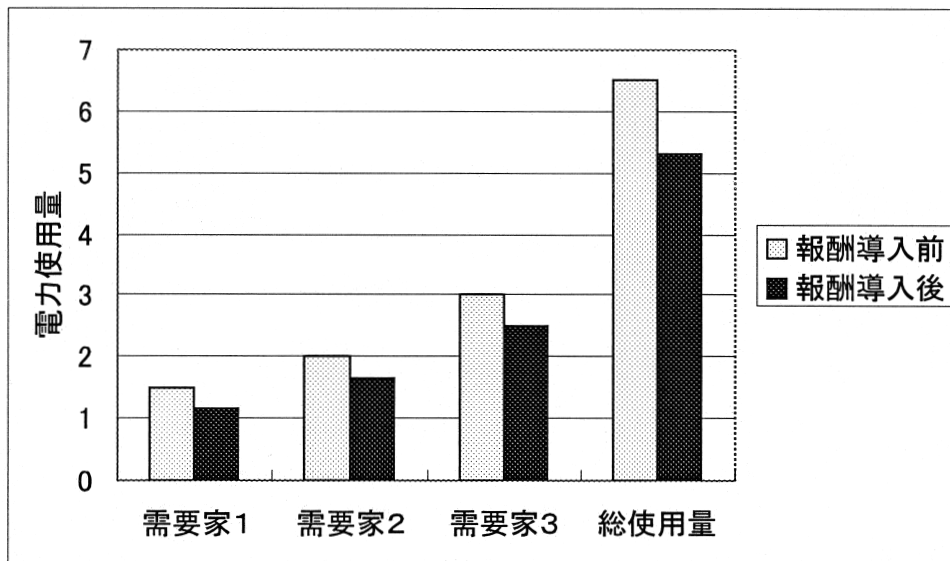


図6.1 各需要家の電力使用量と総使用量

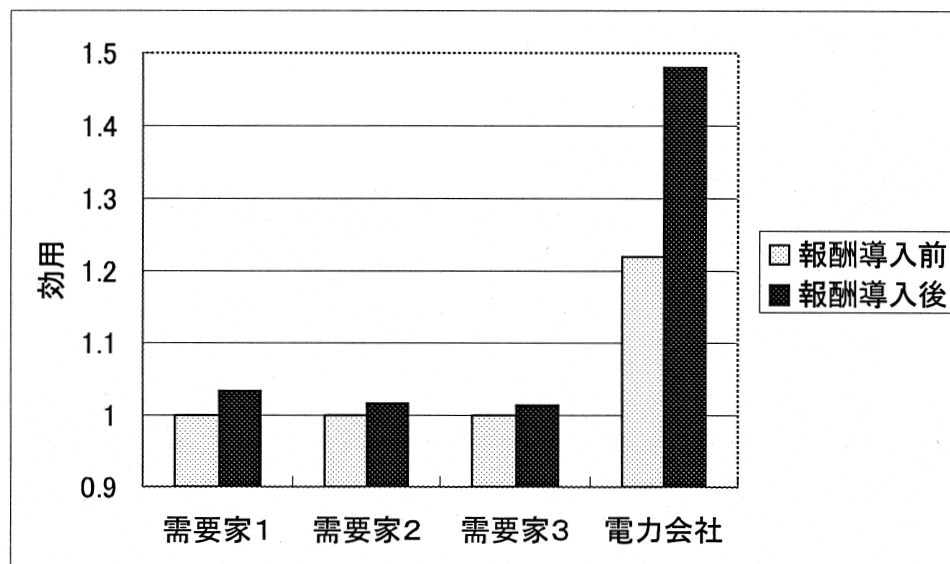


図6.2 各需要と電力会社の効用

6.3 考察

図6.1、図6.2から次のことが考察される。報酬関数 $w_i(r_i)$ の導入により電力会社の効用 $q_l(R)$ および各需要家の効用 $p_i(r_i)$ を減少させることなく(この場合にはむしろ増加している)、各需要家の電力使用量 r_i を減少させ、DSMシステムの目的である総電力使用量 R の削減を達成することができた。つまり、システム全体としての効用 $f(R)$ を増加させることができた。

このシミュレーションによって、適当な報酬関数の設定によりDSMシステムがシステム全体としての最適化を実現できることが示された。

また、今回の実験では効用関数の推定とシステム全体としての最適化を一度ずつ行った。本来、時間により状況が変化し得るシステムに対してはシステムの変化に応じて推定を行う必要がある。したがってシステムの変化に推定にかかる計算時間が追いつく必要がある。本手法では需要家の効用関数のオンライン推定法を採用したが、推定にかかった時間はわずかなものであり、システム全体としての最適化実現にかかった時間もわずかなものであった。この結果より、本手法による効用関数のオンライン推定法およびシステム最適化が時間により状況が変化し得るシステムにも対応できると考えられる。

7 あとがき

本論文では、複数の意思決定主体が存在するシステムに対する効用関数によるモデル化とシステム全体としての最適化手法について述べた。また、その際に必要となる各主体の効用関数の推定法について述べた。

本手法は、事前にあらゆる事態を想定してシステムの状態設定を行うことが困難であったり、システム状況が時間によって変化するなど不確定要素の存在するシステムに対して非常に有効である。システムの状態を決定できないシステムに対して過去の傾向と現在の状態からシステムの状態推定を行うことができ、またこれによって時間によって変化するシステムに対しても状況の追従が可能になる。

本研究の今後の課題としては、近年太陽光発電等の自家発電技術の発達普及により、電力供給主体が電力会社だけではなく、需要家が電力供給主体になるケースも増えつつあり、将来的には電力需給市場が構築されることが想定されている。本研究で構築したDSMシステムにおいてもこのような動向に対応することが必要となってくるであろう。

参考文献

- [1] R.A. Gagliano, M.D. Fraser, and M.E. Schaefer, "Auction Allocation of computing Resources," Communications of the ACM, vol. 38, no. 6, June 1995, pp. 88-102.
- [2] J.F. Kurose, and R. Simha, "A Microeconomic Approach to Optimal Resource Allocation in Distributed Computer Systems," IEEE Trans. Computers, vol. 38, no. 5, May 1989, pp. 705-717.
- [3] F.Yagge and H. Akkermans, "Power Load Management as a Computational Market," Proceedings of the Second International Conference on Multi-Agent Systems, Keihanna Plaza, Kyoto, Dec. 1996, pp. 393-400.
- [4] 鈴木浩, "注目され始めた電力事業のデマンドサイドマネジメント," 電気学会誌, vol. 113, no. 3, March 1993, pp. 213-220.

<発表資料>

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
An Interactive Approach to Demand Side Management Based on Utility Functions	International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000, London, UK.	2000年4月
リフレクションによるソフトウェア部品統合支援システムの開発	平成11年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G323, 姫路	1999年11月