

動的なコミュニティ形成に基づく電力融通手法： カーネルに基づく 提携形成プロトコル DNPk-CFM の具体化

新美 真^{1,a)} 榎 優一^{2,b)} 伊藤 孝行^{3,c)}

受付日 2016年2月28日, 採録日 2016年9月6日

概要: 再生可能エネルギーの導入にともない, 電力需給の平準化や発生する余剰電力の処理が課題となっている. 解決手段の1つとして, 家庭間でコミュニティを形成することで蓄電池を効率的に活用する電力マネジメントがある. 本研究では, カーネルに基づく提携形成プロトコル DNPk-CFM を具体化し, 蓄電池を備えた各家庭の電力需給および送電による電力損失からなる提携値を用いてコミュニティを形成する手法を提案する. DNPk-CFM を具体化することで, 電力損失による優加法性のない状況に対応する. また, コミュニティを動的に変化させることで, 効率的な電力融通が可能であることを示す.

キーワード: 提携ゲーム, 電力マネジメント

A Method for Trading Electric Power Based on Dynamic Community Formation: An Instantiation of Coalition Formation Protocol DNPk-CFM Based on Kernel

MAKOTO NIIMI^{1,a)} YUICHI ENOKI^{2,b)} TAKAYUKI ITO^{3,c)}

Received: February 28, 2016, Accepted: September 6, 2016

Abstract: As introducing renewable energies, load balancing and managing power-surpluses are the main issues. It is considered as a solution to introduce an electric power management with the community-based storage batteries efficiently. In this study, we propose the method for community formation by calculating coalition values based on demands and supplies. We assume each home has a storage battery and transmission loss. For calculating coalition values, we employ the popular DNPk-CFM. DNPk-CFM can apply non-super-additive environments. We instantiate DNPk-CFM so that it works in the community-based power-management. Further we show that our proposed dynamic community formation enables the homes to trade powers efficiently.

Keywords: coalition game, power management

¹ 名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻
Department of Computer Science and Engineering, Graduate
School of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Nagoya, Aichi 466-8555, Japan

² 株式会社エヌ・ティ・ティ・データ
NTT DATA Corporation, Koto, Tokyo 135-6033, Japan

³ 名古屋工業大学大学院工学研究科産業戦略工学専攻
School of Techno-Business Administration, Graduate School
of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya,
Aichi 466-8555, Japan

a) niimi.makoto@itolab.nitech.ac.jp

b) enoki.yuichi@itolab.nitech.ac.jp

c) ito.takayuki@nitech.ac.jp

1. はじめに

スマートグリッドの導入が世界的に進められている [1], [2]. スマートグリッドとは通信機能および制御機能を付加した電力網である. スマートグリッドでは電力事業所から末端の電力機器までを高機能な電力制御端末どうしにより結び合わせ, 自律分散的な制御方式を可能とする. 自律分散的な制御方式により, 従来型の中央制御では達成不可能である需給バランスの効率的な調整や, 太陽光

発電や風力発電などの再生可能エネルギーを用いた発電設備によるエネルギー自給率の向上や地球温暖化対策などが可能となる。

風力や太陽光のような自然エネルギーによる発電は二酸化炭素が発生しないので地球温暖化防止に役立つことや、再生可能なエネルギーであるというメリットが存在する一方で、天候によって発電できる量が変動し電気系統が不安定になるというデメリットが存在している。そのため、デメリットを克服するための取り組みとして、蓄電池を用いた電力マネジメントの研究 [3] が行われている。

以上の背景をもとに、本研究では動的なコミュニティ形成による効率的な電力融通手法を提案する。具体的には以下の3点を達成していることを示す。

- 電力需給バランスの調整による無駄な電力の抑制
- コミュニティ内の余剰電力と不足電力の抑制による電力事業所の負担軽減
- 動的なコミュニティ形成による家庭の利得の増加

本論文ではすべての家庭が太陽光発電および蓄電池を取り入れており、加えて各家庭間で自由な電力取引が可能であることを仮定する。また、各家庭間の電力のやりとりによって送電ロスが発生することを仮定する。

上記目的が達成されていることを示すために、電力マネジメントシミュレータを作成し評価を行う。コミュニティ形成を行わない場合、提携ゲームを利用せずに近隣の家庭間で提携を組んだ場合、および提携ゲームを用いて1日ごとに提携を組み替える場合を比較し、提案手法である提携ゲームを用いた場合の方が効率的に電力融通を行っていることを示す。

本論文の構成を以下に示す。まず、2章で本研究の関連研究について示す。3.1節では送電ロスと電力需給を用いた提携値の定義を示す。4章では動的なコミュニティの形成手法について述べる。5章ではシミュレータを構成するエージェントの役割について説明する。6章ではシミュレーションによる評価実験の設定について述べ、実験結果を考察し本研究の提案手法の有用性を確認する。7章では本研究のまとめを示し、今後の課題について述べる。

2. 関連研究

本研究では、文献 [3] を基盤に電力マネジメントシミュレーションを開発しているが、大きく異なる点として家庭エージェント間の電力融通時における融通量の調整機能、および提携ゲームを用いた動的なコミュニティ形成と利得配分があげられる。文献 [3] では、コミュニティ形成の手続きが与えられておらず、コミュニティを固定のものとしている。また、コミュニティ内の電力融通において発生する利得の配分に関して言及していない。本研究では提携ゲームを用いてコミュニティを動的に変更し、得た利得は提携ゲームにおけるカーネルを用いて配分している。また、文

献 [3] では余剰電力を最大限に利用するため、各家庭の電力購入希望量が満たされないことが多く発生していた。コミュニティから家庭への電力融通量は蓄電池の空き容量のみに依存しており、家庭から提出された購入希望量は計算に利用されていない。本研究では、家庭エージェント間の電力融通時に追加の電力融通希望を行うことで、電力売買希望を可能な限り満たしながらも余剰電力と不足電力を抑制している。

文献 [4], [5] ではマイクログリッド間の提携やバーチャルパワープラントの形成を提携値を定義することで行っている。しかし、提携値は具体的な利得を示しておらず、利得配分を行うことができない。本研究では、実際にコミュニティが得る利得として提携値を定めているため利得配分が可能となっている。また、文献 [5] では評価実験においてコミュニティを形成した場合とコミュニティを形成しない場合との比較のみであった。本研究では、コミュニティを動的に形成することによる有用性を示すため、提案手法の動的にコミュニティを形成した場合、固定のコミュニティを形成した場合、および提携を行わない場合の3つの手法について評価実験を行う。また、本研究の電力送電に関しては文献 [4] の GreedEnEx を参考に決定している。

動的なコミュニティ形成のメカニズムは、提携形成のアルゴリズムである DNPk-CFM (Distributed, Negotiation-based, Polynomial, Kernel-oriented Coalition Formation Model) [6] を参考に実装している。DNPk-CFM は交渉ベースの提携手法である。DNPk-CFM は提携を組んだとしても必ずしも提携値を増やせない (優加法性がない) 状況でも動作する優れたアルゴリズムであり、電力マネジメントという具体的事例に適用した点は有用である。文献 [6] では超過要求の計算の提携サイズを制限することで計算の高速化を図っている。計算を高速化する理由は、提携構造の利得配分の計算を行うにはすべての可能な提携の組合せの超過要求を求める必要があり指数時間となるためである。本研究では近隣のコミュニティのみに対して提携を提案することで実現している。

文献 [7] は、エージェントに基づく蓄電池のマネジメント手法を提案している。リアルタイム料金制における経済的な蓄電池の有効利用や電力購入戦略に主眼が置かれているが、再生可能エネルギーは想定されていない。本研究では、再生可能エネルギーの1つである太陽光による発電を想定したエージェントシミュレーションを行う。

文献 [8] は、住宅内部の需要コントロールに関して述べられている。家庭内の電力需要をいくつかに分類して、電力使用のタイミングを変化させることで需要のピークの回避をしている。本研究では、家庭間での電力融通を想定しており、文献 [8] と比較してより規模の大きなマネジメントを行うことができる。

文献 [9] は、PowerTAC と呼ばれる電力市場のブローカ

エージェントの競技会に関して述べられている。ブローカエージェントは電力市場や消費者などの間で電力仲介を行い、金銭的な利得を獲得する。したがって、消費者の需要量の予測が重要となり、その手法について研究がなされている [10], [11]。本研究では各家庭が消費電力量を予測しているが、提案されている手法と置換が可能である。

電力価格を操作して電力消費量を変更させる研究が行われている。たとえば、ピーク時の電力量を削減することを目的とした文献 [12] をはじめとして、消費電力の上昇率である Inclining Block Rates (IBR) を用いて価格決定する研究 [13]、および時間ごとの総電力消費量をアパートや住居ごとに設定し超過した電力料金を高額に設定する研究 [14]、電力消費スケジューリングをゲームとして扱い消費電力の生産コストを最小化するナッシュ均衡を求める研究 [15] がある。本研究では動的なコミュニティの形成によって効率的に電力融通が行えることを示すため、電力需要の変更を目的とした電力価格の操作は行わない。

文献 [16] は、スコアリングルールを用いることで消費電力の予測精度を高めている。本研究の実験では蓄電池運用に関する目的関数の最適化を行っているが、予測精度を高める誘引を持たせる手法を応用することで、さらなる電力融通の効率化が期待できる。

3. 協力ゲームの用語の定義

3.1 送電ロスと電力需給を用いた提携値

本研究の電力マネジメントシミュレーションの概念図を図 1 に示す。コミュニティは家庭により構成され、電力事業所と電力をやりとりする。本研究ではコミュニティ C (提携) における提携値 $v(C)$ を定め、提携値をもとに家庭がコミュニティを形成することを提案する。特性関数 v は以下の式 (1) で表す。

$$v(C) = -\alpha \sum_{(i,j) \in ET_C} |L(i,j)| - \alpha \left(\sum_{i \in C \setminus \{p\}} \hat{D}_i - S_p \right) + \beta \sum_{i \in C} \hat{S}_i \quad (1)$$

ここで α と β はそれぞれ電力事業所から電力を買う場合

の価格および電力事業所へ電力を売る場合の価格を示す。なお、 $\alpha > \beta$ とする。また \hat{D}_i と \hat{S}_i は家庭 i に関して、コミュニティ内の家庭間で送電し終えた後に足りない電力量および残った電力量を示す。つまり $\sum_{i \in C} \hat{D}_i$ と $\sum_{i \in C} \hat{S}_i$ はどちらかが必ず 0 となる。よって項 $-\alpha \sum_{i \in C} \hat{D}_i$ は足りない電力を電力事業所から買い入れるコストを示す。一方、項 $\beta \sum_{i \in C} \hat{S}_i$ は余った電力を電力事業所へ売った場合の利得を示す。 p は電力事業所を表し、 S_p は電力事業所が提携に参加し、足りない電力量を賄うことを意味する。もし電力量が余っている場合には、 $S_p = 0$ となる。残りの項 $-\alpha \sum_{(i,j) \in ET_C} |L(i,j)|$ に含まれる $L(i,j)$ は家庭 i と家庭 j 間の送電ロスを示す。総和の下の部分 $(i,j) \in ET_C$ は提携 C に含まれる任意の 2 つの家庭の組合せの集合を示す。項全体としてはコミュニティ内におけるすべての送電ロスによる損失を示す。送電ロスの具体的な計算式 [17] は式 (2) で表す。

$$L(i,j) = \left[\frac{P(i,j)}{\Psi} \right]^2 \times r \times dist(i,j) \quad (2)$$

ここで $P(i,j)$ 、 Ψ 、 r 、および $dist(i,j)$ はそれぞれ家庭 i から家庭 j への送電量、送電線の電圧、送電線の抵抗率、および家庭 i と家庭 j 間の距離を示す。家庭 i から家庭 j への送電量 $P(i,j)$ は 1 日の始まりに各家庭が計算する売買計画に GreedEnEx [4] を用いて決定する。GreedEnEx は電力の需要量が最も大きい家庭 D に対して、家庭 D に近い家庭から順に需要量を満たすまで送電するという手法である。家庭 D の需要を満たした後は、家庭 D の次に需要量が多い家庭を家庭 D とし、送電可能な電力がなくなるまで処理を続けることで送電先を決定する。

式 (1) を定義することで、電力需要の噛み合ったエージェントどうして提携することが良いコミュニティであることを表現できる。実際にどのように提携を構築するのは 4.1 節で詳細に述べる。また、式 (1) は実際にコミュニティが得ることになる金銭的な利得を示しており、利得ベクトルの値をそのまま金銭の配分に用いることができる。利得の配分に関しては 4.2 節で詳細に述べる。

3.2 超過要求 (不満)

プレイヤー集合 A および特性関数 v の組によって表現されるゲーム (A, v) において $e(x; C) = v(C) - \sum_{i \in C} x_i$ で表される値を利得構成 $(x; \gamma)$ に対する提携 C の超過要求、または不満と呼ぶ。ここで、利得構成とはプレイヤーの集合の分割 γ と各プレイヤーに割り当てられる利得を表すベクトルの組である。

3.3 最大超過要求

利得構成 $(x; \gamma)$ が与えられているとき、2 人のプレイヤー $k, l \in C_j \in \gamma$ ($k \neq l$) を考える。プレイヤー k がプレイヤー l に対し不満を持つ場合、プレイヤー k はプレイヤー l を含ま

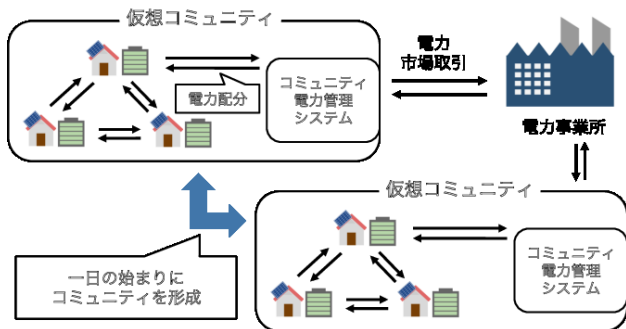


図 1 電力マネジメントシミュレーションの概念図

Fig. 1 Conceptual diagram of power management simulation.

い提携 C の超過要求の中でも最も大きい値をプレイヤー l への不満として申告すると考えられる。そのため、利得構成 $(x; \gamma)$ に関するプレイヤー k からプレイヤー l への最大超過要求 S_{kl} は $S_{kl} = \max_{C \in T_{kl}} e(x; C)$ で示される。ここで、 T_{kl} はプレイヤー k を含みプレイヤー l を含まない提携全体を示す。

3.4 要求関数

最大超過要求は提携での値であるため、プレイヤー k はプレイヤー l に最大超過要求そのままの値を要求できるわけではない。しかしながらプレイヤーどうしの要求の基礎として扱われる。 $S_{kl} > S_{lk}$, $x_l > v(l)$ が成り立つならば利得構成 $(x; \gamma)$ に関してプレイヤー k はプレイヤー l に対して不満を持つという。ここで、 $x_l > v(l)$ はプレイヤー l が個人合理的な最低限の利得しか獲得していないときに要求は不可能であることを示す。よって、プレイヤー k からプレイヤー l への要求は以下の式 (3) で示される。式 (3) をプレイヤー k のプレイヤー l に対する要求関数という。

$$d_{kl}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \min\{S_{kl} - S_{lk}, x_l - v(l)\} & \text{if } S_{kl} > S_{lk} \\ 0 & \text{if } S_{kl} \leq S_{lk} \end{cases} \quad (3)$$

3.5 カーネル

利得構成 $(x; \gamma)$ に関して、同じ提携に所属するプレイヤー k とプレイヤー l の間で、お互いに不満を持たない状態であるならば、プレイヤー k とプレイヤー l とは利得構成 $(x; \gamma)$ に関して均衡にあるという。要求関数を用いて均衡である状態を示すと、 $d_{kl}(x) = 0$ かつ $d_{lk}(x) = 0$ となる。均衡である状態ならば新たな利得の譲渡は生じない。

ゲーム (N, v) において、同じ提携に属する任意の2人のプレイヤーが均衡にある個人合理的利得構成の全体をカーネルという。カーネルを K とすると、任意の提携構造 γ に対して $(x; \gamma) \in K$ となる個人合理的利得構成 $(x; \gamma)$ が少なくとも1つ存在する。

3.6 Kernel Polynomial-K- ϵ -Stability

DNPK-CFM [6] において、多項式時間で動作するカーネルの概念として、Kernel Polynomial-K- ϵ -Stability を定義している。もし提携 C に含まれるすべてのエージェント i, j (ここで、 $i \neq j$) について、エージェント i の利得が0、エージェント j の利得が0、または $|S_{kl} - S_{lk}| \leq \epsilon$ であるなら、Kernel Polynomial-K- ϵ -Stability である。

4. 動的なコミュニティの形成手法

4.1 DNPK-CFM を用いたコミュニティ形成

DNPK-CFM [6] は、すべてのエージェントが単独で提携を組んでいる状態から始め、新たな提携形成の提案を他のエージェントに送ることで徐々に提携を大きくしていく手

法である。提案手法の工夫点は以下の2点である。

- DNPK-CFM を電力マネジメントに合わせて具体化した点
- 閉区間 $[K_1, K_2]$ を距離と対応させて定義した点

提案手法の手順について述べる。提案手法において、DNPK-CFM を用いたコミュニティの形成は1日の始まりに実行される。家庭エージェントは1日の始まりに計算している電力の売買計画を用いて提携を形成する。シミュレーションにおける1日のタイムステップ数を N とすると、家庭 i の売買計画は $b_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{iN})$ と表すことができる。なお、 $b_{ik} \geq 0$ は家庭 i のタイムステップ k における購入したい電力量を表し、 $b_{ik} < 0$ は家庭 i のタイムステップ k における販売したい電力量を表す。式 (1) は1タイムステップにおける提携値を示しているため、1日における提携値 $\hat{v}(C)$ は以下の式 (4) で表される。

$$\hat{v}(C) = \sum_{k=1}^N v(C) \quad (4)$$

ただし、タイムステップ k の提携値 $v(C)$ において全家庭の売買量 $\{b_{1k}, b_{2k}, \dots, b_{nk}\}$ が GreedEnEx [4] に渡され、式 (1) におけるコミュニティ内の家庭間で送電し終えた後に足りない電力量 $\hat{D} = (\hat{D}_1, \hat{D}_2, \dots, \hat{D}_n)$ と残った電力量 $\hat{S} = (\hat{S}_1, \hat{S}_2, \dots, \hat{S}_n)$ 、および式 (2) における送電量を表す P が計算されているものとする。 n は家庭エージェントの数を示す。

式 (4) で示す1日における提携値を定めることにより、DNPK-CFM におけるコミュニティ形成の提案を行うことが可能となる。本論文では、Negotiation protocol を採用しており、交渉プロセスとしては Preliminary stage および First stage を使用している。以下に DNPK-CFM を用いたコミュニティの形成手法を示す。

- (1) 各家庭エージェントは売買計画を作成する。各家庭エージェントを各家庭エージェント1つで構成されるコミュニティとする。
- (2) 各コミュニティは式 (4) を用いて閉区間 $[K_1, K_2]$ に提携サイズを限定した超過要求を近隣のコミュニティのみを考慮に入れて計算する。超過要求を計算する際に必要となる提携 C について、 $K_1 \leq |C| \leq K_2$ という条件をつけている。
- (3) 各コミュニティは近隣のコミュニティと提携を組んだ場合に自身の利得がどれだけ増加するかを計算し、最も利得の増加が大きくなるコミュニティに対し提案を送る。利得の計算にはカーネルに所属する利得ベクトルを用いる。カーネルに所属する利得ベクトルを用いることで、同じ提携の任意のエージェント間で互いに不満を持たない状態となる [18]。
- (4) 手順 (3) を繰り返し、あらかじめ規定した提携メンバー数の上限値に達するか、利得が増加する提携がない場

合、処理を終了する。

DNPk-CFM は計算の高速化のため、閉区間 $[K_1, K_2]$ に提携サイズを限定した超過要求のみを利用して利得ベクトルを計算している。本研究ではさらに近隣のコミュニティのみとの提携を考えることで実現する。本研究では送電ロスと考慮に入れ提携値を計算しているため、近隣のコミュニティのみに計算を絞るのは妥当な処理である。ここで、近隣のコミュニティとはあらかじめ定めた距離以内に存在するコミュニティを示す。

4.2 カーネルを用いた利得配分

1日の始まりにコミュニティの形成を行うことは4.1節で述べたが、1タイムステップにおける電力融通で得られる利得は、1タイムステップにおける電力融通が終了した後に家庭へと配分される。利得配分の方法としては提携ゲームにおけるカーネルを用いる。また、コミュニティ間での電力融通では、オークションにより確保した電力事業所からの送電を考えて提携値を計算し、利得を配分する必要がある。図2に利得配分の例を示す。

ここで、家庭A、家庭B、電力事業所Pがそれぞれ-30, 20, 10の電力供給を行う。オークションで決定した値段、電力事業所への売却値段および電力事業所からの購入値段はそれぞれ、23円/kWh, 20円/kWh および 24円/kWh とし、送電ロスは簡潔化するため無視した場合を想定する。

提携をせずに提携値を求めると、-720, 400, 230 となり全体の利得は-90となる。しかし、提携し電力融通を行うことで全体の利得を0とすることができる。すなわち、提携することで90の利得を増加できる。この90の利得を家庭Aがすべて受け取ったものとしてカーネルに含まれる利得ベクトルを求めるための利得の移動について説明する。現在家庭Aが90円の利得を得ているので-720円だった値は-630円となる。家庭Bは400円のままである。ここで家庭BからAへの要求関数の値を計算すると40となるので40円分利得が移動し、家庭Aは-670円、家庭Bは440円となる。この状態で最大超過要求を計算するとお互いに-40となり不満を持たない状態となる。一方、電力事

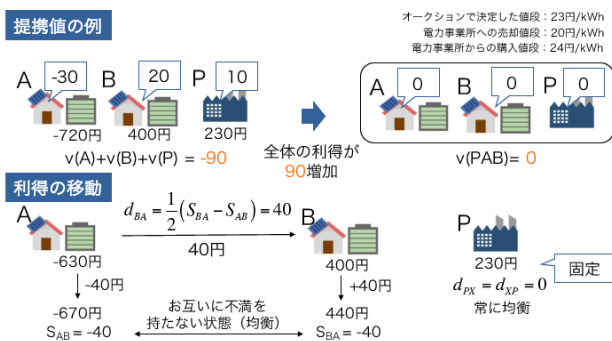


図2 カーネルを用いた利得配分

Fig. 2 Profit allocation using kernel.

業所にはオークションによって決定した金額が支払われるため、家庭と電力事業所間の不満は存在せずつねに均衡しているものとした。

図2による例から、電力事業所は電力供給可能であるコミュニティのメンバとして、式(1)を用いて提携値を求めることができる。利得を配分するとき、電力事業所はオークションで定められた価格で電力融通をするので、その価格を超えてコミュニティに対して利得の移動を求めることはできない。本研究では利得の移動を求めることができないことを、電力事業所への超過要求を0とすることで表している。

5. シミュレータの実装

5.1 エージェントの概要

電力マネジメントシミュレータを構成する家庭エージェント、コミュニティエージェント、電力事業所エージェント、市場エージェント、および同期エージェントについて述べる。まず、各エージェントの主な役割について述べる。

家庭エージェント

- Differential Evolution (DE) [19] による蓄電計画と売買計画の計算

- Memory Based Particle Filter (M-PF) [20] を用いた太陽光発電量の予測による追加電力要求の計算

コミュニティエージェント

- 市場エージェントを介した電力事業所との電力オークション
- コミュニティに所属する家庭エージェント間での電力融通の調整と利得の配分

電力事業所エージェント

- 市場エージェントを介したコミュニティとの電力オークション
- 家庭エージェントの電力不足または電力余剰に対する電力融通

市場エージェント

- 電力事業所とコミュニティ間の電力オークションに対する仲介

同期エージェント

- シミュレーション実行の制御

家庭エージェントは1日の始まりに Differential Evolution (DE) を用いて蓄電計画と売買計画を計算し電力のマネジメントを行う。また、Memory Based Particle Filter (M-PF) を用いることで太陽光発電量を予測し、蓄電計画に沿った蓄電池のマネジメントを行う。コミュニティエージェントは、家庭エージェントからの売買計画を受け、電力融通を行う。また、各家庭エージェントに利得を割り振る。電力事業所エージェントは家庭エージェント間のやりとりにおいて電力余剰または電力不足が発生した場合に電力融通を行う。市場エージェントはコミュニティエージェ

ントと電力エージェント間の電力オークションを仲介する。電力オークションはダブルオークション [21] によって行われる。プロトコルは、PMD プロトコルである。買い手はコミュニティ、売り手は電力事業所、財は電力である。入札方法としては、500 W あたりの電力の購入値段を送信する。同期エージェントはシミュレーション全体の処理の制御を行う。

5.2 家庭エージェントの電力マネジメント

家庭エージェントは、以下の2つの手法により効率的な蓄電池の運用を行う。

- DE による蓄電池運用に関する目的関数の最適化
- M-PF を用いた発電量予測による追加電力要求の計算

DE による蓄電池運用に関する目的関数の最適化では、電力の需要量と供給量の乖離度合いおよび電力購入金額を目的関数の項として扱い、蓄電池の運用に最適となる蓄電池からの放電量を決定することで、蓄電計画を作成する。M-PF を用いた発電量予測による追加電力要求では、M-PF を用いた太陽光発電量の予測によって、次ステップの蓄電量と蓄電計画との差異を予測し、追加電力要求を計算する。追加電力要求は売買計画の電力量に対して修正したい量を表し、可能であれば融通してほしい電力量を意味している。売買計画に合わせて追加電力要求をコミュニティに送ることで可能な限り蓄電計画に沿った蓄電池運用を可能とする。

蓄電計画の計算

蓄電計画の目的関数には以下の式 (5) を用いる。

$$\arg \min_{v,b} \sum_{t=1}^T (\{D(t) - (b(t) + v(t) + \hat{P}V(t))\}^2 + b(t)\hat{p}(t)) \quad (5)$$

ここで放電量のベクトル v と購入量のベクトル b は最適化する変数である。放電量 $v(t)$ が負の値をとる場合、蓄電量を示す。 $D(t)$, $\hat{P}V(t)$, および $\hat{p}(t)$ はそれぞれ時刻 t の電力需要量、太陽光発電量、および電力価格である。式 (5) におけるハット付きの変数 $\hat{P}V(t)$, および $\hat{p}(t)$ は過去数日分の実績値の平均値として与えられる。 $b(t) + v(t) + \hat{P}V(t)$ で示される供給電力と需要量 $D(t)$ との差の二乗をとることで、各ステップにおいて需要を満たす蓄電池運用ができているかを評価できる。また、電力売買量 $b(t)$ と電力価格 $\hat{p}(t)$ をかけた値を加算することで、電力購入による金銭的なコスト $b(t)\hat{p}(t)$ を評価に含めている。

追加電力要求の計算

太陽光発電量は天候や時間帯によって発電量が大きく変動するため、蓄電計画に対して蓄電量の差異が発生し、式 (5) で計算した売買計画の修正が必要になる。しかし売買計画をもとに動的なコミュニティ形成を行うための提携値を計算するため、できる限り売買計画に沿った電力融通を

行うことが望ましい。そのため、家庭エージェントは電力融通時にコミュニティエージェントに対して、売買計画の値を伝えるとともに、可能であれば融通してほしい電力量（追加電力要求）を伝える。売買計画にのっとった電力融通を行うことで、不足する電力または余る電力が発生するのであれば、追加電力要求に基づき家庭エージェントの売買計画を修正し電力融通を行う。追加電力要求は式 (6) で定義する。

$$AP_i(t) = \frac{\dot{B}_i(t) - \tilde{B}_i(t)}{2} \quad (6)$$

ここで $AP_i(t)$, $\dot{B}_i(t)$, および $\tilde{B}_i(t)$ はそれぞれ家庭 i の追加電力要求、蓄電計画における時刻 t の蓄電量、および時刻 t の予測蓄電量である。蓄電計画と予測される蓄電量との差異を修正するために、ある程度の補正を行いたいということを示している。蓄電計画と予測される蓄電量との差異はさらなる太陽光発電予測の差異によって変動するため、予測される差異の半分を追加要求電力として定義している。追加電力要求を用いた売買計画の修正の詳細は 5.3 節で述べる。

式 (6) における時刻 t の蓄電池の予測蓄電量 $\tilde{B}(t)$ は以下の式 (7) と式 (8) で定義する。

$$\tilde{B}'(t) = B(t-1) - D(t) + b(t) + \tilde{P}V(t) \quad (7)$$

$$\tilde{B}(t) = \begin{cases} 0 & (\tilde{B}'(t) < 0) \\ e_{capa} & (\tilde{B}'(t) > e_{capa}) \\ \tilde{B}'(t) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $B(t-1)$, $D(t)$, $b(t)$, e_{capa} , および $\tilde{P}V(t)$ はそれぞれ時刻 $t-1$ の実際の蓄電量、時刻 t の需要量、時刻 t の売買量、蓄電池の容量、および時刻 t の太陽光発電量の予測値である。式 (7) は単純な蓄電量の更新式であり、蓄電量は最大蓄電容量 e_{capa} 以下かつ 0 以上であるという制約を考慮していないので、式 (8) で修正する。また、時刻 t の太陽光発電量の予測値は文献 [3] と同じように M-PF で求める。

時刻 t における実際の蓄電量 $B(t)$ は以下の式 (9) と式 (10) によって求められる。

$$B'(t) = B(t-1) - D(t) + b(t) + PV(t) \quad (9)$$

$$B(t) = \begin{cases} 0 & (B'(t) < 0) \\ e_{capa} & (B'(t) > e_{capa}) \\ B'(t) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 $B(t-1)$, $D(t)$, $b(t)$, および $PV(t)$ はそれぞれ時刻 $t-1$ の実際の蓄電量、時刻 t の需要量、時刻 t の売買量、および時刻 t の太陽光発電量である。式 (8) で示される時刻 t の蓄電池の予測蓄電量 $\tilde{B}(t)$ との違いは、時刻 t の太陽光発電量の予測値 $\tilde{P}V(t)$ が時刻 t の太陽光発電量 $PV(t)$ に置き換わっている点である。

なお、蓄電池の更新式である式 (9) および式 (10) を実行したとき、蓄電可能量を越えた電力がある場合、または需要量に対して電力が足りていない場合は電力事業所と電力をやりとりすることで電力不足または電力余剰に対応する。

5.3 追加電力要求を用いた電力融通量の修正

コミュニティエージェントは所属する家庭エージェントの売買計画を受けとり電力融通を行うが、5.2 節で述べたように太陽光発電量予測の誤差によって売買計画の修正が必要となる。

時刻 t における家庭 i の売買計画の値を b_{it} とする。なお、 $b_{it} \geq 0$ は購入したい電力量を表し、 $b_{it} < 0$ は販売したい電力量を表すものとする。コミュニティエージェントに所属する家庭の集合を C とすると、電力融通によって余る電力または足りない電力 $M(t)$ は以下の式 (11) で定義される。

$$M(t) = \sum_{i \in C} b_{it} \quad (11)$$

ここで、式 (6) で示される家庭 i の追加電力要求 $AP_i(t)$ を用いて、供給可能電力量 $SP(t)$ 、および需要電力量 $DP(t)$ をそれぞれ式 (12) および式 (13) で定義する。

$$SP(t) = \sum_{i \in C} \max(0, AP_i(t)) \quad (12)$$

$$DP(t) = \sum_{i \in C} \min(0, AP_i(t)) \quad (13)$$

式 (12) および式 (13) は追加で供給可能なコミュニティ内の総電力量、およびコミュニティ内で追加で受け入れ可能なコミュニティ内の総電力量を示している。Algorithm 1 に示す方法によって、電力融通量の修正が行われる。Algorithm 1 の N はコミュニティに所属する家庭の数を示す。追加電力要求を用いた電力融通量の修正によって、コミュニティ内の電力不足または電力余剰に対応しつつ、家庭エージェントの電力融通量の修正を行うことが可能である。

6. シミュレータによる評価実験

6.1 評価実験の設定

本研究では動的なコミュニティ形成による電力融通手法の有用性を示すため、以下の3つの点について評価を行う。

オークションによる電力事業所に対する電力要求量

コミュニティがオークションで電力事業所に要求する電力量について考察する。動的なコミュニティの形成によって家庭間の電力需給バランスをうまく調整し、無駄な電力を抑制していることを示す。

コミュニティ内の余剰電力量と不足電力量

コミュニティ内での電力融通時に発生する余剰電力量と不足電力量について考察する。余剰電力と不足電力は電力事業所に対して売却または購入されるので、余

Algorithm 1 電力融通量の修正方法

```

if  $M(t) > 0$  and  $SP(t) > 0$  then
  if  $SP(t) > M(t)$  then
    for  $i = 1$  to  $N$  do
      if  $AP_i(t) < 0$  then { 供給可能な家庭 }
        { 全体の供給可能量に対する割合を利用 }
         $b_{it} \leftarrow b_{it} + M(t) \times AP_i(t)/SP(t)$ 
      end if
    end for
  else { 供給可能な電力が不足電力より少ない }
    for  $i = 1$  to  $N$  do
      if  $AP_i(t) < 0$  then { 供給可能な家庭 }
        { 供給可能量をそのまま利用 }
         $b_{it} \leftarrow b_{it} + M(t)$ 
      end if
    end for
  end if
else if  $M(t) < 0$  and  $DP(t) > 0$  then
  if  $DP(t) > -1 \times M(t)$  then
    for  $i = 1$  to  $N$  do
      if  $AP_i(t) > 0$  then { 受け入れ可能な家庭 }
        { 全体の受け入れ可能量に対する割合を利用 }
         $b_{it} \leftarrow b_{it} - M(t) \times AP_i(t)/DP(t)$ 
      end if
    end for
  else { 電力が受け入れ可能な電力が余剰電力より少ない }
    for  $i = 1$  to  $N$  do
      if  $AP_i(t) > 0$  then { 受け入れ可能な家庭 }
        { 受け入れ可能量をそのまま利用 }
         $b_{it} \leftarrow b_{it} - M(t)$ 
      end if
    end for
  end if
end if

```

剰電力と不足電力が少ないほど電力事業所に対する負担が抑えられる。

家庭の利得

コミュニティを形成し、電力融通することによる家庭の利得について考察する。家庭が利得を多く得られるほど、提携を組むことに対するインセンティブとなる。

本研究の提案手法の比較対象として、コミュニティ形成を行わず電力融通を行う手法（比較手法1）、および1日の始まりに提携を行わず固定のコミュニティで電力融通を行う手法（比較手法2）を用いる。ここで、固定のコミュニティでは、2行4列の8家庭エージェントを1つのコミュニティとし、そのコミュニティを4行2列に並べている。オークションによる電力事業所に対する電力要求量、コミュニティ内の余剰電力量と不足電力量、および家庭の利得に関する比較を、提案手法、比較手法1、および比較手法2の間で行うことで動的なコミュニティ形成の有用性を確認できる。

本シミュレーションでは家庭数を64、家庭の持つ蓄電池容量を5kWhと定めた。電力事業所の数は1とし、電力事業所への購入値段および売却値段はそれぞれ $\alpha = 24$

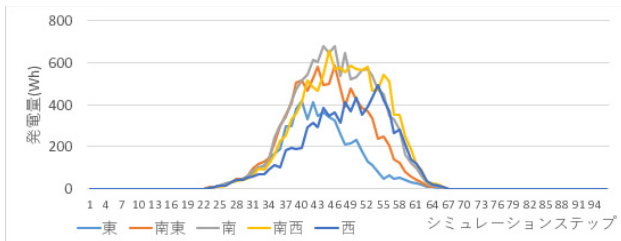


図 3 太陽光発電パネルの向きによる発電曲線の違い

Fig. 3 Curve which meaning electric power generation based on angle of solar panel.

円/kWh, および $\beta = 20$ 円/kWh とした. この価格はオークションを介さないときの価格であり, 提案手法においては, 提携値のパラメータとして用いられる. オークションによって決定された価格は, 提携の形成がなされた後に使用される. シミュレーションの 1 タイムステップは 15 分であり, 1 日を 96 タイムステップとした. 提携計算手法である DNP-K-CFM における超過要求計算を行う提携サイズの範囲は 7 から 8 とし, コミュニティに所属できる家庭数の上限は 8 とした. 家庭エージェントの配置については 7km 四方の正方形に 1km 間隔で配置している. ここで, 近隣のコミュニティとはある家庭エージェントと他の家庭エージェントの距離が半径 1.5 km 以内となるコミュニティである. 初期状態では, 周囲の 8 家庭エージェントが近隣のコミュニティとなる. また, 各家庭エージェントの太陽光発電パネルの方向を西, 南西, 南, 南東, および東向きの 5 種類の中から設定している. 方向の違いにより発電量のピーク時間や総発電量が異なる. 各方向における発電曲線の例を図 3 に示す. 図 3 は METPV-11 [22] の日射量データをもとに算出した東 (270 度), 南東 (315 度), 南 (0 度), 南西 (45 度), および西 (90 度) の方位角に対する太陽光発電量の曲線である. Kernel Polynomial-K- ϵ -Stability を求めるためのパラメータ ϵ は, 0.01 とした.

6.2 オークションによる電力事業所に対する電力要求量

コミュニティは電力事業所に対してオークションを 1 日に 4 回行い, コミュニティ内の供給だけでは足りない場合に備え, 電力を購入する. 足りない電力量は各家庭の売買計画に基づき計算されるため, 売買計画がうまく噛み合った家庭どうしでコミュニティを形成することで, 足りない電力量を少なく抑えることができる.

表 1 に提案手法と比較手法 2 のオークションによる電力事業所に対する電力要求量を示す. 比較手法 1 はオークションを行わないため, 表から除いている. 提案手法が約 700 kWh であるのに対し, 比較手法 2 では約 950 kWh であり, 提案手法は比較手法 2 に対して約 27% 程要求量を抑えることができている. よって提案手法を用いることで需給バランスをうまく調整し, コミュニティ内の需要量を抑制できることを示した.

表 1 電力事業所に対するオークションでの電力要求量

Table 1 The amount of power requested of power company at auction.

提案手法	比較手法 2
696.93 kWh	951.94 kWh

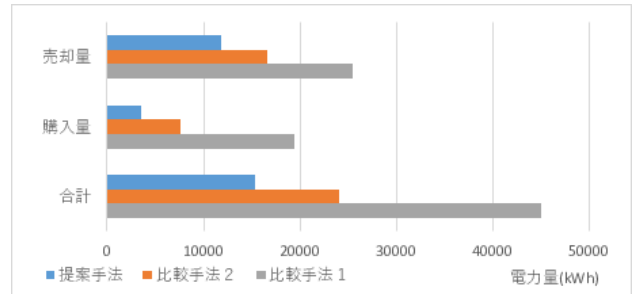


図 4 余剰電力と不足電力に対する電力事業所との電力融通量

Fig. 4 The amount of trading power with power company in terms of surplus and shortage powers.

6.3 コミュニティ内の余剰電力量と不足電力量

1 タイムステップにおけるコミュニティ内での家庭間の電力融通では, 余った電力または不足した電力は電力事業所と取引される. コミュニティ内での家庭間の電力融通においては, できるだけ家庭間で電力融通を行い, コミュニティ内の需給を満たすことで電力事業所への負担の軽減および家庭の利得の増加を達成できる.

図 4 に余剰電力と不足電力に対する電力事業所との電力融通量を示す. 図 4 には提案手法, 比較手法 2, および比較手法 1 の電力事業所に対する電力売却量, 電力購入量, および電力売却量と電力購入量の合計値を示している. 提案手法は比較手法 1 および比較手法 2 に対して売却量と購入量のどちらも抑制することができていることが分かる. 家庭間の電力融通により, 電力事業所との電力融通量を抑えている. また, 比較手法 1 に対して比較手法 2 の方が売却量と購入量のどちらも削減できており, コミュニティ形成による効果を示されている.

図 5 に提案手法と比較手法 2 の日ごとの家庭間の電力融通量を示す. 比較手法 1 は家庭間で電力融通を行わないため図から除いている. 図 5 から提案手法が比較手法 2 に比べ, 多くの場合において家庭間での電力融通量が多いことが分かる. 家庭間での電力融通量が多いことで, 電力事業所との無駄な電力融通を抑制できる. 唯一, 14 日に融通量が比較手法 2 に比べ少なくなっているが, コミュニティ内の電力量が少なくなっていることに起因している. 晴天時の太陽光発電量が約 11 kWh であるのに対し, 13 日と 14 日の天候は悪く, 13 日と 14 日の太陽光発電量はそれぞれ約 2.2 kWh と約 0.6 kWh となっており発電量が少ない. 2 日連続で発電量が少ないことで, 電力事業所との電力融通を抑えられている提案手法ではコミュニティ内に存在する融通可能な電力がなくなり, 14 日の家庭間の融通量が少な

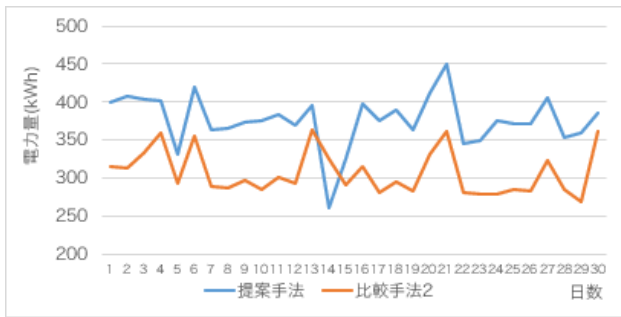


図 5 コミュニティ内での電力融通量

Fig. 5 The amount of power trading in community.

表 2 家庭エージェントの利得合計
Table 2 Total profit of home agents.

提案手法	比較手法 2	比較手法 1
102,219.42 円	82,260.23 円	43,785.79 円

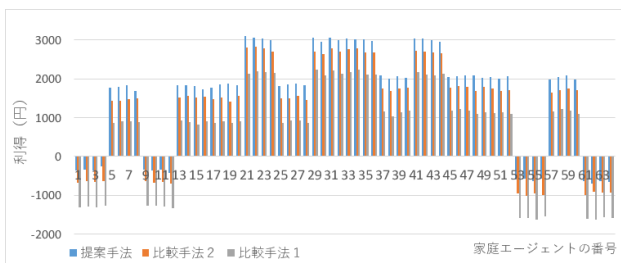


図 6 家庭エージェントの利得

Fig. 6 Each profit of home agents.

くなっている。つまり、電力事業所とのやりとりを抑えた結果の現象であり、提案手法は家庭間の融通を促進し、余剰電力と不足電力を抑制しているといえる。

6.4 家庭の獲得利得

コミュニティの動的な形成を行うには、各家庭エージェントが相互に提案を行いコミュニティを形成する必要がある。よって、各家庭エージェントが動的にコミュニティを組み替えることに対してインセンティブが必要となる。本節では家庭が得る利得に着目し、動的なコミュニティ形成によって固定されたコミュニティよりも利得を獲得できることを示す。

表 2 に提案手法、比較手法 2、および比較手法 1 における全家庭エージェントの利得合計を示す。提案手法が比較手法 1、および比較手法 2 に対し、それぞれ約 1.2 倍、および約 2.3 倍の利得を獲得している。理由としては、動的なコミュニティ形成によって家庭間の電力融通量が増加し、電力事業所からの無駄な電力購入が抑制されることがあげられる。また、図 6 に提案手法、比較手法 2、および比較手法 1 における各家庭エージェントの利得を示す。比較手法 2 および比較手法 1 に対して提案手法の全エージェントの利得が増加していることが分かる。よって、固定された

コミュニティよりも動的なコミュニティ形成の方がより多くの利得を得ることが可能であり、各家庭が動的にコミュニティを形成することに対するインセンティブとなる。

7. まとめ

本論文では提携ゲームを用いて動的にコミュニティを形成することで、効率的な電力融通が可能であることを明らかにした。家庭間の電力融通の効率化による電力事業所との無駄な電力融通の抑制、およびカーネルに所属する利得構成の計算による利得分配を達成した。

動的なコミュニティ形成を行うために、電力の需供バランスと送電ロスを用いて提携値を定義した。その後、DNP-CFM を用いて提携を行う方法を提案した。DNP-CFM は提携どうしが提携形成の提案を送り合うことで提携を大きくしていく交渉ベースの提携手法である。規定したサイズの提携のみを考慮した超過要求を利用することで計算の高速化を行っている。本研究では、近隣のコミュニティのみを考慮することで実現した。コミュニティが獲得した利得はカーネルの考えを用いて分配を行った。

実験結果から、本研究の提案手法は家庭の需給バランスをうまく調整し、無駄な電力を抑制していることを確認した。また、コミュニティ内の余剰電力量と不足電力量の抑制によって電力事業所への負担を軽減していることを確認した。さらに、コミュニティ形成により家庭の利得が増加することを示し、提携を組むことに対するインセンティブを示した。以上の結果から本研究の提案手法である動的なコミュニティの形成が効率的な電力融通に有用であることを示した。

実験では各家庭が他のすべての家庭に対して送電可能なネットワークで評価を行ったが、各エッジで送電可能量が異なるネットワークや送電可能な家庭が制限されるネットワークなどネットワークの特性によってどのような影響が起きるかを考察する必要がある。また、64 件の家庭エージェントを用いて評価実験を行ったが、さらに多くの家庭エージェントを用いた評価が今後の課題としてあげられる。

参考文献

- [1] Ramchurn, S.D., Vytelingum, P., Rogers, A. and Jennings, N.R.: Putting the ‘smarts’ into the smart grid: A grand challenge for artificial intelligence, *Comm. ACM*, Vol.55, No.4, pp.86–97 (2012).
- [2] Ito, T., Otsuka, T., et al.: 未来の社会システムを支えるマルチエージェントシステム研究 (2), *人工知能学会誌*, Vol.28, No.3 (2013).
- [3] 吉村卓也, 金森 亮, 伊藤孝行: 複数の家庭用蓄電池の共有化によるコミュニティ型電力マネジメントの提案, *人工知能学会全国大会論文集*, Vol.28, pp.1–4 (2014).
- [4] Chakraborty, S., Nakamura, S. and Okabe, T.: Real-time energy exchange strategy of optimally cooperative microgrids for scale-flexible distribution system, *Expert Systems with Applications*, Vol.42, No.10, pp.4643–4652

(2015).

[5] Mihailescu, R.C., Vasirani, M. and Ossowski, S.: Dynamic Coalition Adaptation for Efficient Agent-Based Virtual Power Plants, *Multiagent System Technologies*, pp.101–112, Springer (2011).

[6] Shehory, O. and Kraus, S.: Feasible formation of coalitions among autonomous agents in nonsuperadditive environments, *Computational Intelligence*, Vol.15, No.3, pp.218–251 (1999).

[7] Vytelingum, P., Voice, T.D., Ramchurn, S.D., Rogers, A. and Jennings, N.R.: Agent-based micro-storage management for the smart grid, *Proc. 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: volume 1-Volume 1*, pp.39–46 International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems (2010).

[8] Ramchurn, S.D., Vytelingum, P., Rogers, A. and Jennings, N.: Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid, *The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1*, pp.5–12, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems (2011).

[9] Ketter, W., Collins, J., Reddy, P.P. and Weerdt, M.D.: The 2015 Power Trading Agent Competition, *ERIM Report Series Reference No.ERS-2015-001-LIS* (2015).

[10] Wang, X., Zhang, M., Ren, F. and Ito, T.: Gong-Broker: A Broker Model for Power Trading in Smart Grid Markets, *IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT '15)* (2015).

[11] Urieli, D. and Stone, P.: Tactex '13: A champion adaptive power trading agent, *Proc. 2014 International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, pp.1447–1448, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems (2014).

[12] Houthakker, H.S.: Electricity tariffs in theory and practice, *The Economic Journal*, Vol.61, No.241, pp.1–25 (1951).

[13] Reiss, P.C. and White, M.W.: Household electricity demand, revisited, *The Review of Economic Studies*, Vol.72, No.3, pp.853–883 (2005).

[14] Mohsenian-Rad, A.-H., Wong, V.W., Jatskevich, J. and Schober, R.: Optimal and autonomous incentive-based energy consumption scheduling algorithm for smart grid, *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp.1–6, IEEE (2010).

[15] Mohsenian-Rad, A.-H., Wong, V.W., Jatskevich, J., Schober, R. and Leon-Garcia, A.: Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid, *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol.1, No.3, pp.320–331 (2010).

[16] Boutilier, C.: Eliciting forecasts from self-interested experts: Scoring rules for decision makers, *Proc. 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2*, pp.737–744, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems (2012).

[17] Saad, W., Han, Z., Poor, H.V. and Başar, T.: Game-theoretic methods for the smart grid: An overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol.29, No.5, pp.86–105 (2012).

[18] 鈴木光男：新装版ゲーム理論入門，共立出版 (2003)。

[19] Storn, R. and Price, K.: Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *Journal of Global Optimization*, Vol.11,

No.4, pp.341–359 (1997).

[20] 三上 弾，大塚和弘，大和淳司：姿勢とアピランスの変化に頑健な対象追跡を実現するアピランス統合メモリベースパーティクルフィルタ，電子情報通信学会論文誌 D，Vol.94, No.8, pp.1194–1205 (2011)。

[21] McAfee, R.P.: A dominant strategy double auction, *Journal of Economic Theory*, Vol.56, No.2, pp.434–450 (1992)。

[22] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：日射量データベース。



新美 真 (学生会員)

平成 27 年名古屋工業大学大学院情報工学専攻入学。同大学院在学中。



榎 優一

平成 26 年名古屋工業大学大学院情報工学専攻入学。平成 28 年株式会社エヌ・ティ・ティ・データ入社。同社所属中。



伊藤 孝行 (正会員)

平成 12 年名古屋工業大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。平成 11 年 JSPS 特別研究員。平成 13 年北陸先端科学技術大学院大学助教授。平成 15 年名古屋工業大学助教授。平成 18 年同大学大学院産業戦略工学専攻准教授。平成 23 年内閣府最先端・次世代研究開発プロジェクト PI。平成 26 年より同大学教授。その間、JST さきがけ研究員。JST CREST 代表研究者。USC，ハーバード，MIT，東京大学客員研究員。JSAI 業績賞。ITS シンポジウム最優秀論文賞。JSSST 基礎研究賞。JSPS 賞。文部科学大臣表彰科学技術賞。AAMAS2013 PC Chair。IFAAMAS 国際財団理事。文部科学大臣表彰若手科学者賞。IPSJ 長尾真記念特別賞受賞。AAMAS2006 最優秀論文賞。JSSST 論文賞。IPA 未踏ソフトスーパークリエイター。