

# エージェントシミュレーションによる コミュニティに基づく電力マネージメントに関する研究

川口 将吾<sup>1,a)</sup> 金森 亮<sup>1,b)</sup> 伊藤 孝行<sup>1,c)</sup>

## 概要：

本論文ではコミュニティに基づくマルチエージェント電力マネージメントモデルを提案する。提案したモデルではコミュニティを複数の家庭で形成し、コミュニティの単位で大型蓄電池を運用する。また、本論文では、家庭の太陽光発電や蓄電池について、エージェントに基づく電力マネージメントモデルを提案する。本論文で提案した家庭の電力マネージメントモデルの特徴は、日本の現実的な電力消費データ及び気象データを用い、再生可能エネルギーである太陽光発電の不安定さを考慮したマネージメントを行う点である。そして本論文では、マルチエージェントによる電力売買シミュレーションを行い、太陽光発電や蓄電池の導入とエージェントによるマネージメントの影響、コミュニティに基づく電力マネージメントモデルによる影響及びコミュニティの戦略による影響を評価する。評価実験では、提案手法であるコミュニティに基づくマルチエージェント電力マネージメントモデルの導入によるピークカット、停電時のバックアップ対策及び社会全体のコストに関して評価を行う。

**キーワード：**エージェント、マルチエージェントシミュレーション、スマートグリッド、電力マネージメント

## 1. はじめに

本論文では、コミュニティに基づくマルチエージェント電力マネージメントモデルを提案する。コミュニティとは複数の家庭から形成される集団であり、コミュニティで大型蓄電池を運用し、複数の家庭で大型蓄電池を共用することで、住宅で蓄電しきれない太陽光発電による余剰電力を蓄えることが出来るとともに、コミュニティの大型蓄電池をバッファとして考えることで電力事業所は安定した発送電を実現できる。また、エージェントシミュレーションによって、電力事業所が動的に電力の売買価格を変動させる環境において、提案手法であるコミュニティに基づくマルチエージェント電力マネージメントモデルが電力網への負荷平準化能力や、停電時のバックアップ対策としての機能に関して有用性がある事を示す。

日本では東日本大震災以降、特にピーク時において大幅に電力が不足する問題が顕在化した。そこで現在の日本ではピークカット及び停電時のバックアップ対策が大きな課題となっている。それらの課題に対しては、現在は揚水発

電、ガスタービン及びディーゼルエンジン等が用いられている。また、政府においては、新たなエネルギーの長期需給見通しの策定作業が行われているが、長期的には再生可能エネルギーの大幅導入拡大は不可欠と見込まれている。また再生可能エネルギーの固定価格買取制度が施行されるため、短中期的にも太陽光発電などの再生可能エネルギーの大幅導入拡大が想定される。このような大幅導入拡大を現状のまま進めた場合、発電量のコントロールがしにくい再生可能エネルギーを電力システムに入れることで、系統の安定性が損なわれる恐れがあるほか、系統で吸収できない電力が余剰となってしまう、活用できなくなる恐れもある。この再生可能エネルギー導入の問題に対しては、蓄電池を設置し、逆潮流電力量を調整することによって、余剰電力を無駄なく活用できる事が出来ると考えられている。蓄電池は現在用いられている揚水発電及びガスタービン、ディーゼルエンジンに対して、立地制約が少ない、建設のリードタイムが短い、燃料価格に依存しないと云った優位性がある。そこで本研究では蓄電池に着目し、コミュニティで大型蓄電池を運用し、課題であるピークカット及び停電時のバックアップ対策への問題解決を目指す。

現在、太陽光発電パネルや家庭用蓄電池の低価格化が進んでおり、今後も普及率は大きく増加すると予想される。従って、各家庭は太陽光発電パネルの発電状況、蓄電池の

<sup>1</sup> 名古屋工業大学  
Nagoya Institute Of Technology, Japan  
a) kawaguchi@itolab.nitech.ac.jp  
b) kanamori.ryo@nitech.ac.jp  
c) ito.takayuki@nitech.ac.jp

充電状況及び電力使用状況を考慮した電力売買を行う必要があり、電力売買は複雑化する事が考えられるためである。そこで本論文では、家庭の太陽光発電や蓄電池について、エージェントに基づく電力マネジメントモデルを提案する。

本論文で提案する家庭の電力マネジメントモデルでは、太陽光発電設備と蓄電池を備えた住宅を想定したマネジメントを行う。しかし、太陽光発電は天候に応じて発電量が大きく左右されるため、再生可能エネルギーの不安定さを考慮した電力マネジメントを考える必要がある。太陽光発電と併せて用いられる蓄電池は、発生した余剰電力の蓄電や悪天候時の使用など、効率的な電力マネジメントに有効な設備である。

本論文では、日本の現実的な電力消費データ及び気象データを用いて、太陽光発電及び蓄電池を有効的に活用する家庭の電力マネジメントエージェントモデルを構築する。家庭の電力消費は朝晩にピークを迎える傾向があるため、ピーク時の電力負荷の軽減や分散が重要である。また、太陽光発電は天候に応じて発電量が大きく変化する特徴があり、本論文では天候も日本の統計的な日照量データを用いる。再生可能エネルギーの不安定さを考慮した電力マネジメントを実現するために、本研究では学習を用いた電力マネジメントを行う。

また日本においては、平成 21 年より低炭素社会の実現に向けて太陽光発電の余剰電力買取制度が開始された。そこで本論文では余剰電力買取制度を考慮に入れ、家庭が電力会社から電力を買うだけでなく、家庭に設置された太陽光発電パネルを利用して得られた余剰電力を電力会社に売る事も想定する。

さらに、学習により太陽光及び蓄電池のマネジメントを行う家庭エージェント、コミュニティ蓄電池エージェント、及び電力事業所エージェントによる電力売買シミュレーションを行い、太陽光発電や蓄電池の導入とエージェントによるマネジメントの影響、コミュニティ導入による影響及びコミュニティの戦略による影響を評価する。評価実験では、提案手法であるコミュニティに基づくマルチエージェント電力マネジメントモデルの導入によるピークカット、停電時のバックアップ対策及び社会全体のコストに関して評価を行い、スマートグリッドにおける提案手法の有効性について議論する。

## 2. エージェントに基づく電力マネジメントの関連研究

スマートグリッドにおける電力マネジメントに関する関連研究は電力売買や価格決定に対するアプローチ ([3], [4]), 多目的最適化によるアプローチ ([5]), 経済分野に近いアプローチ ([6]) など多岐に渡る。本論文では、情報分野の技術の中からエージェントに基づいたアプローチの有効性

に注目した。

文献 [1] では、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。文献 [1] では、電力の自由化の進んだイギリスの実際の電力消費データや、リアルタイムで変化する電気料金モデルを用いてシミュレーションが行われている点の特徴である。しかし、文献 [1] のモデルでは再生可能エネルギーは想定されておらず、リアルタイム料金制におけるより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。本論文は、文献 [1] と同様にエージェントに基づく電力マネジメントを扱うが、太陽光発電の安定利用を考慮している点や日本のデータを扱う点、さらに複数の家庭でコミュニティを形成し、大型蓄電池を共用する点が大きく異なる。

文献 [2] では、住宅内部の需要コントロールに関して述べられている。文献 [2] は、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している。本論文は文献 [2] とは異なり住宅内部の重要なコントロールによる電力負荷分散ではなく、コミュニティ運用による負荷平準化を目指している。

文献 [3] は、文献 [1] を発展させたモデルに関する論文である。文献 [1] では電力の経済的な購入戦略を提案していたが、文献 [3] では家庭からの余剰電力の売却も扱っている。そのため、家庭だけでなく電力事業所にも戦略を定義して、家庭、電力事業所および市場における電力の価格決定モデルを提案している。文献 [3] は、スマートグリッドの主要な課題の 1 つである電力の価格決定を扱う点が優れている。しかし、文献 [3] の家庭側の設定は本論文よりも簡略化されており、再生可能エネルギーの導入も行われていない。また、文献 [3] は電力売買を主題としており、コミュニティを運用し、負荷平準化も含めた電力網全体のマネジメントを扱う本論文とは目的が異なる。

文献 [4] は、ブローカーエージェントによる電力売買モデルを提案しており、家庭と電力事業所の両者が電力の購入も売却も出来る。そして家庭と電力事業所間に、Tariff Market と呼ばれる関税を用いた市場を定義して、市場においてブローカーエージェントが電力の売買を仲介している。文献 [4] は、電力売買に対して市場やブローカーエージェントを定義したメカニズムを提案している。しかし、文献 [4] は Power TAC と呼ばれるブローカーエージェントの競技会向けの論文であるため、電力の消費傾向や再生可能エネルギーの有無などの現実的な設定が不十分である。

文献 [5] は多目的最適化による電力マネジメントに関する論文である。多目的最適化分野のノウハウをスマートグリッドに適用するための基本的なアプローチがまとめられており、多目的最適化分野からの電力マネジメントに対する関連研究も豊富に調査されている。また、多目的最適化分野の技術を使うことで、最適化の結果に対してパレート最適性を保証できる手法を提案している。文献 [5] は、多

目的最適化の成熟した技術をスマートグリッドに上手く適用している点が優れているが、再生可能エネルギーの不安定さに対する対策や電力消費モデルなど問題設定が不十分である。

文献 [6] は、分散した小型蓄電池の需給バランス調整のためのオークションに基づくメカニズムを提案している。文献 [6] では、Continuous Double Auction (CDA) を用いて市場において異なるエージェント同士のバランス調整を行ない、電力の需給バランスを適切に整えている。CDA を用いて市場でバランス調整を行う部分は本論文と同様のアプローチだが、文献 [6] は、個々の住宅での電力マネジメントや再生可能エネルギーの不安定さへの対策は不十分である。

文献 [9] は、仮想の電気市場環境下におけるプラグイン電気自動車の市場規則と振る舞いの間の相互作用のモデリングを行っている。文献 [9] は、市場関係者および電気自動車所有者の振る舞いに対する市場規則の影響のシミュレーションを行いプラグイン電気自動車のための詳細な確率モデルを開発している点が特徴であるが、文献 [9] の焦点は市場の効率性を改善することであり、本論文は電力マネジメントに注目する点が異なる。

文献 [10] は、規制緩和された市場の中期的な電力立案のために、確率的な価格ベースの混合整数線形計画法を提案している。文献 [10] では、電力網内の様々な地域の違いをモデル化した点及びテイクオアペイ契約や燃料キャップアンドトレードの排出規制がモデル化されている点が特徴である。しかし文献 [10] は規制緩和された市場の中期的な電力立案が目的であるため本論文とは焦点が異なる。

文献 [12] ではマルチエージェント電力市場シミュレータである MASCEM を使用してイバリアの電力市場をモデル化し、VPP (仮想発電事業者) の提携形成の分析を行っている。文献 [12] は電力市場のマルチエージェント提携形成を扱う点が複数の家庭でコミュニティを形成する本研究と類似している点だが、文献 [12] は電力料金に着目している点が本論文と異なる。

文献 [13] では 2008 年 11 月に日本卸電力取引所 (JEPX) 内で開始されたパイロット取引をマルチエージェントシミュレーションで分析を行っている。文献 [13] ではシミュレーション結果から、厳密な CO2 排ガス規制の下で、市場の価格が通常の電力為替市場よりも高いにもかかわらず、新たな自由市場からより多くの電力を購入する傾向があることを明らかにした。文献 [13] は日本の取引市場を扱っている点が特徴だが、電力のマネジメントには触れておらず、マルチエージェントシミュレーションでコミュニティでの蓄電池運用の有効性を検証し、電力網全体のマネジメントを扱う本論文とは目的が異なる。

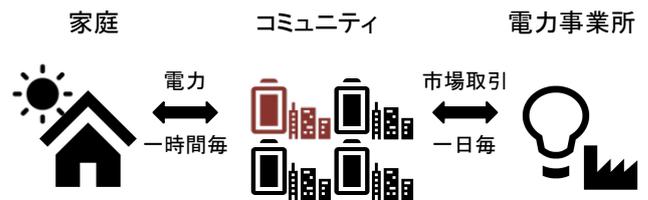


図 1 コミュニティに基づく電力マネジメントモデル

### 3. コミュニティに基づく電力マネジメントモデル

コミュニティに基づく電力マネジメントシミュレーションのシナリオについて述べる。シミュレーションではコミュニティに基づく電力マネジメントモデルの有効性を検証する。シミュレーションで用いるエージェントは家庭、コミュニティ及び電力事業所が存在する。家庭エージェントは一つ一つの家庭に存在し、太陽光発電量及び蓄電池充電量を考慮し、電力事業所から購入する電力量を調整しマネジメントを行う。コミュニティとは複数の家庭で大型蓄電池を共用し電力を融通し合う単位である。コミュニティエージェントは各家庭との電力売買及び電力事業所との市場取引を行い、大型蓄電池の運用を司っている。電力事業所は電力の供給事業者であり、それらのエージェントは家庭エージェント及びコミュニティエージェントと電力の売買を行う。

次に各エージェントの関係を述べる。図 1 にエージェントの関係を図示した。全ての家庭は太陽光発電パネル及び蓄電池を装備している。従って各家庭は太陽光発電によって得た電力を、蓄電池を用いてマネジメントを行う。詳細な家庭エージェントモデルについては 4.1 で述べる。コミュニティでは複数の家庭で利用する大型蓄電池を運用し、電力融通においては家庭と電力事業所の間が存在する。家庭は電力事業所と直接の売買するわけではなく、コミュニティと電力売買を行うことになる。コミュニティが家庭と電力売買を行う価格は、コミュニティの大型蓄電池の充電容量によって決定する。詳細なコミュニティエージェントモデルについては 4.4 で述べる。コミュニティは動的に変更可能で有り、各家庭は一週間に一度所属するコミュニティを変更することが可能である。コミュニティと電力事業所は、市場によって電力価格と電力量の割り当てを決定する。市場での決定は一日に一度であり、供給量の決定後は、電力事業所は毎時間一定の電力をコミュニティに送電する。電力事業所が市場に入札する際は、電力事業所は一日の販売量の上限を定め、販売量の上限に近づくにつれて入札価格を上昇させる。詳細な電力事業所エージェントモデルについては 4.2 で述べる。

次にコミュニティに基づく電力マネジメントモデルの有効性検証の為に比較ケースについて述べる。図 ?? はコミュニティが存在しないシミュレーションを図示してい



図 2 比較モデル：コミュニティ無し



図 3 比較モデル：太陽光発電無し

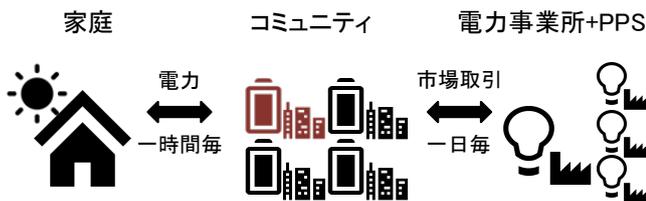


図 4 比較モデル：PPS 参入

る。コミュニティが存在しない場合、各家庭は電力事業所を直接の電力売買を行う。各家庭は太陽光発電によって得た電力を、蓄電池を用いてマネジメントを行い、発生した余剰電力を電力事業所に販売することも可能である。電力事業所の電力販売価格及び余剰電力買取価格は固定されており、それぞれの価格は現在の日本の制度に合わせて 20 円/kWh, 40 円/kWh とする。

図 3 は家庭に太陽光発電設備が存在しないシミュレーションを図示している。各家庭が太陽光発電設備を持っていない場合、各家庭は自身の需要を直接電力事業所に要求する。また余剰電力が発生しないため、電力事業所に売電することは無い。また電力事業所が家庭に電力を販売する場合の価格は固定されており、販売価格は 20 円/kWh とする。

図 4 は PPS の参入を想定したシミュレーションの概要を示している。図 4 は市場に複数の PPS が参入することの影響を明らかにする。PPS (Power Producer and Supplier) とは特定規模電気事業者であり、小規模な電力事業所である。詳細な PPS エージェントモデルについては 4.3 で述べる。コミュニティと電力事業所及び PPS は市場で一日に一度、電力価格と電力料の割り当ての決定を行い、コミュニティは電力事業所と PPS それぞれから、毎時間一定の電力が送電される。

## 4. エージェントモデル

### 4.1 家庭エージェント

開発したエージェントの特徴としては、日本の現実的な消費電力データの利用 (4.1.1)、太陽光発電の導入 (4.1.2)、

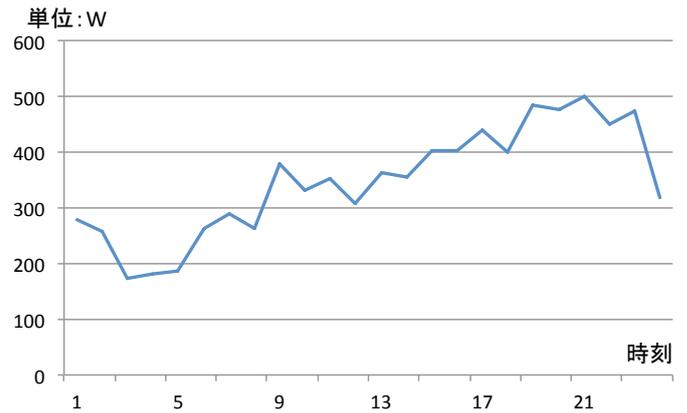


図 5 電力消費モデル

学習による電力マネジメントである。エージェントの基本的な動作は、太陽光発電の利用により電力購入を抑制し、電力負荷の軽減や分散を目指す。太陽光発電による余剰電力が発生した場合には蓄電池に蓄電し、消費電力の増加する時間帯や天候の悪い日に利用する。

#### 4.1.1 電力消費モデル

各家庭の電力消費モデルは、経済産業省資源エネルギー庁が公表している東京電力管内の夏期最大電力使用日の需要構造推計 ([14]) を元に作成を行った。本資料 ([14]) は平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により、電力の供給力が大幅に減少したため、政府が電力需給緊急対策本部にて、東京電力管内の産業・業務・家庭の各部門において、夏期電力需要がピークを迎える場合の需要構造について推定を行った物である。

家庭の需要カーブの推計の前提として、世帯数は東京電力管内の 1900 万世帯、世帯類型によって家電機器の保有率やライフスタイルが異なることから、一人世帯、二人世帯、三人以上世帯に分けて推計が行われている。また気象条件については 2010 年の最大ピーク需要 5999 万 kW を記録した 7 月 23 日の気温条件を想定されている。さらに時間毎の気温変化によるエアコン、冷蔵庫の負荷率変化を考慮し、各機器の世帯保有台数は内閣府の消費動向調査等をもとに想定が行われており、世帯類型別の在宅率やテレビ視聴、家事などの生活時間をもとに、時間別の機器使用率が推計されている。

本シミュレーションでは東京電力管内の夏期最大電力使用日の需要構造推計の中から特に家庭部門の需要カーブからモデルを作成した。

図 5 は電力消費モデルを示している。横軸に時刻を、縦軸に消費電力量を示している。図 5 は深夜の時間帯に消費電力が少なくなり、住人の帰宅後に消費のピークが訪れるという特徴を持つ。本シミュレーションでは基本の電力消費モデルにノイズを加えて使用した。

#### 4.1.2 太陽光発電モデル

太陽光発電量のモデルは日本気象協会の太陽光発電用標

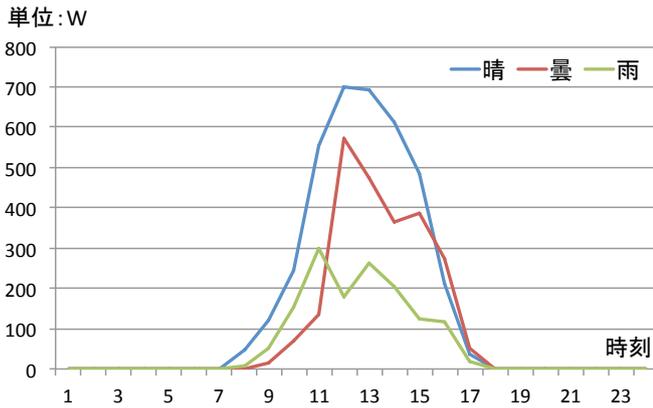


図 6 太陽光発電モデル

準気象データ METPV-11[15] を用いて作成した。

日射関連資料は太陽エネルギー利用技術の開発、計画、立地、設計等の基礎資料として欠かすことが出来ず、日本気象協会は 1974 年以降、通商産業省のサンシャイン計画の開始当初から各種の気象調査研究を実施しており毎時の気象データを収録した METPV (MEteorological Test data for PhotoVoltaic system) シリーズについては関係機関で広く利用されている。

METPV-11 は、太陽光発電システムの時刻別運転状況シミュレーション用に整備された 1990 年から 2009 年の全国 837 地点の特別の標準気象・日射量データベースである。本シミュレーション実験では、METPV-11 から愛知県内の名古屋・岡崎・豊田・東海の 4 つの地域における日射量が平均的であった月のデータを一年分並べた平均年データを利用した。

図 6 は天候別の太陽光発電電量の例であり、横軸に時刻を、縦軸に発電量を示している。図 6 は天候の変化によって太陽光発電電量が大きく変わることを示している。図 6 は例であり、本シミュレーションでは METPV11 の 4 地域のデータを用いて、さらに細かな地域の天候の違いを再現するためにノイズを加えて使用している。

#### 4.1.3 エージェントが扱う環境

家庭用エージェントが扱う変数を以下に示す。

- 電力需要 ( $demand$ )
- 太陽光発電状態 ( $solar$ )
- 蓄電池の充電容量 ( $battery$ )
- 電力購入量 ( $buy$ )

家庭のエージェントは以上の 4 つの変数を扱い、状態の更新は式 (1) で表す。

式 (1) は時刻  $t + 1$  の蓄電池充電容量  $battery_{t+1}$  は時刻  $t$  の蓄電池充電容量  $battery_t$ 、太陽光発電電量  $solar_t$ 、電力消費量  $demand_t$ 、電力購入量  $buy_t$  によって計算される事を示している。この変数の中で、太陽光発電電量  $solar_t$  と電力消費量  $demand_t$  は観測によって決定される為、エージェントが各時間帯で決定しなければならない変数は電力

購入量 ( $buy$ ) である。

$$battery_{t+1} = battery_t + solar_t - demand_t + buy_t \quad (1)$$

電力購入量  $buy_t$  は、式 (2) と式 (3) によって定義される。式 (2) は次の時間帯に必要な電力量  $demand_{t+1}$  と蓄電池の充電容量との差、つまり最低限の購入量  $buy_{min}$  を示しており、時刻  $t$  においてエージェントが決定しなければならない電力購入量 ( $buy_t$ ) は最低購入量  $buy_{min}$  と購入量調整変数  $\alpha$  を用いて式 (3) によって表現される。ここで  $\alpha$  は正の値である。最低購入量の計算には時刻  $t + 1$  の太陽光発電電量  $solar_{t+1}$  が含まれていない。これは太陽光発電電量が 0 であったとしても需要を満たすことが出来るように行動することを示している。

$$buy_{min} = demand_{t+1} - (battery_t + solar_t - demand_t) \quad (2)$$

$$buy_t = buy_{min} + \alpha \quad (3)$$

ただし、購入量調整変数  $\alpha$  については、時刻  $t + 1$  の太陽光発電電量  $solar_{t+1}$  を考慮し、式 (4) 及び式 (5) で表される制約を満たさなければならない。これは蓄電池容量の最大値を超えてはならないことと、一時間当たりに充電できる最大を 1kWh と定め、それらを超えてはいけないことを意味している。

$$battery_{t+1} < battery_{max} \quad (4)$$

$$\alpha < 1000 \quad (5)$$

## 4.2 電力事業所エージェント

電力事業所の電力販売価格は、コミュニティが無しの場合は電力販売価格を 1kW あたり 20 円で固定とするが、コミュニティを導入するケースでは電力販売価格が動的に変動する環境を考慮する。また、家庭に電力を販売するだけで無く、家庭で発生した余剰電力を買い取る事も行う。コミュニティによる電力マネジメントを導入したケースでは電力事業所はコミュニティと市場によって電力売買を行う。電力販売価格が変動する方式は、電力事業所は日ごとの販売量に制限を定め、販売量が制限値に近づくにつれて販売価格を増加させていく物で有り、式 (6) は電力販売価格の決定方式を示した物である。式 (6) において、 $P_b$  は最低販売価格を、 $Q_c$  は現在の電力販売量を、 $Q_{limit}$  は販売量の制限値を示しており、 $\gamma$  は変化率を調節する。

$$P_b \left( 1 + \gamma \left( \frac{Q_c}{Q_{limit} - Q_c} \right) \right) \quad (6)$$

シミュレーションに用いる電力事業所モデルは最低販売価格  $P_b$  を 20 円、 $\gamma$  を 0.2  $Q_{limit}$  を 6000kW とした。

### 4.3 PPS エージェント

PPS (Power Producer and Supplier) とは特定規模電気事業者を指し、電気事業制度改革に伴う電力の小売りの自由化において、一定以上の電力量を使う需要家への電力販売が認められた事業者である。本シミュレーションにおいては、ケース5がPPSの参入を想定した物である。ケース3以降では家庭との直接の売買では無く、電力事業所はコミュニティと市場によって電力売買を行う。ケース5において市場にPPSが参加することの影響を明らかにする。PPSの電力販売価格が変動する方式は、日ごとの販売量に制限を定め、販売量が制限値に近づくにつれて販売価格を増加させていく物である。式(7)は電力販売価格の決定方式を示している。式(7)において、 $P_b$ は最低販売価格を、 $Q_c$ は現在の電力販売量を、 $Q_{limit}$ は販売量の制限値を示しており、 $\gamma$ 及び $\delta$ は変化率を調節する物である。電力事業所の価格決定関数との差異は、 $\delta$ であり、 $\delta$ によって販売量の制限値に達したときに、価格が無限に発散しないようしている。

$$P_b \left( 1 + \gamma \left( \frac{Q_c}{\delta Q_{limit} - Q_c} \right) \right) \quad (7)$$

シミュレーションに用いるPPSモデルは最低販売価格  $P_b$  を15円、 $\gamma$ を1.5、 $\delta$ を1.5、 $Q_{limit}$ を1000kWとした。

### 4.4 コミュニティエージェント

本項では複数の家庭がコミュニティを形成し、共用で利用する大型蓄電池のモデルについて述べる。本シミュレーションにおいて、コミュニティは負荷平準化を目的として設置する。

本シミュレーションで用いるコミュニティの運用は、家庭の太陽光発電と併せて負荷平準化の中でピークカットに効果がある。家庭と電気事業所が直接の電力売買を行う場合、昼間に多く発電する太陽光発電は、晴天時にはピークカットに似た効果を持つが、曇や雨天時といった太陽光パネルが発電しないときには、この負荷平準化の効果は期待できない。しかしコミュニティによって大型蓄電池を運用し、家庭で消費しきれない余剰電力を蓄え、不足時に供給するといった電力網全体で見たときにバッファの役割を果たすことで、安定したピークカットの効果が得られるからである。また本シミュレーションでは、電力事業所とコミュニティが事前に市場によって電力供給量と価格を決定し、電力事業所は決定された電力量を常に一定の割合でコミュニティに供給する環境を想定している。電力事業所と家庭が直接の売買をしている場合は、時々刻々と変化する家庭の需要に応じて発電量をコントロールしなければならなかったのに対し、コミュニティとの電力売買時は常に一定の発電量で運転すれば良い為、コミュニティは負荷平準化として機能する。

コミュニティと家庭の電力売買では、コミュニティの

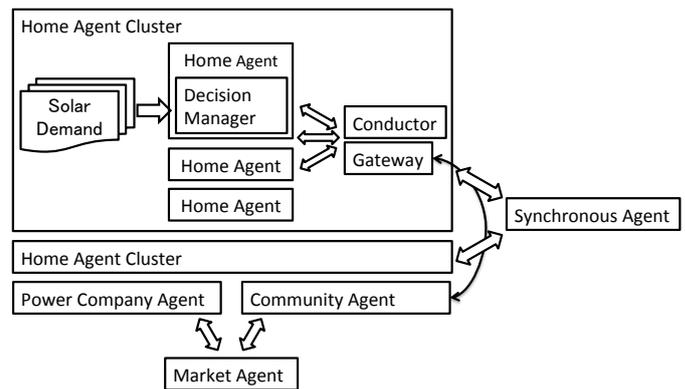


図7 電力市場シミュレーター

蓄電池の充電量に基づいた価格決定を用いる。式(8)はコミュニティが価格決定を行う関数である。式(8)において、 $P_b$ は最も安価な場合の価格を、 $P_d$ は最低価格と最高価格の差を $\gamma$ は変化率を表している。

$$\frac{P_d}{e^{\gamma(x-50)} + 1} + P_b \quad (8)$$

シミュレーションでは、コミュニティが家庭から余剰電力を買取する場合は最低価格  $P_b$  を10、価格差  $P_d$  を25、変化率  $\gamma$  は0.1に設定している。

またコミュニティが家庭に対して電力を販売する場合、電力事業所との市場での取引で決定した電力供給量を  $Q_m$ 、市場で消費した金額を  $P_m$  としたとき、販売最低価格  $P_b^{sell}$  を式(9)によって決定する。

$$P_b^{sell} = P_m / Q_m - 5 \quad (9)$$

電力事業所の最低販売価格は20円のため、式(9)はコミュニティが家庭に電力を販売する際の最低価格は15円であることを示しており、市場価格が高くなった場合はコミュニティが家庭に販売する価格も上昇する。

### 4.5 電力市場シミュレーター

本研究では、家庭エージェント(4.1)、電力事業所エージェント(4.2)及びコミュニティエージェント(4.4)を用いて電力市場シミュレーターの構築を行った。図7は電力市場シミュレーターのモデルである。本研究で開発したシミュレーターは以下の特徴を持つ。

- MPIを用いて分散環境で実行可能
- データ部分、機能部分、戦略部分をぶんどりしたため、異なるシナリオを容易に実行可能

本研究では、ネットワークで接続された4台の計算機でシミュレーションを実行した。

図7の中のHome Agent Clusterとは、本研究で行ったシミュレーションは世帯数が1000と多いため、複数の家庭エージェントをまとめて管理するための機構である。Home Agent Clusterは内部に複数の家庭エージェントを持ち、また複数の家庭エージェントの行動を制御するため

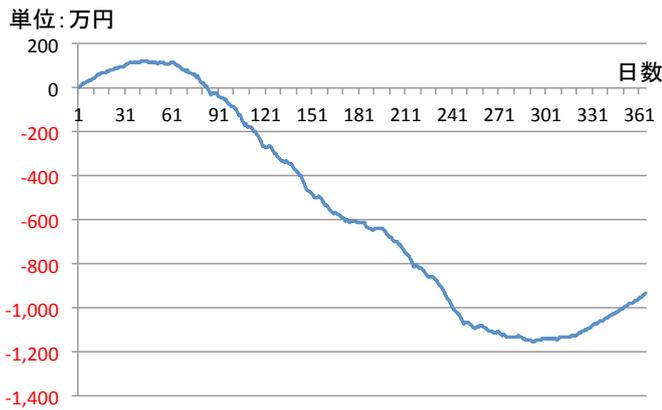


図 8 電力事業所の利益の推移

の Conductor 及び、通信を制御するための Gateway を持つ。多くの数の家庭エージェントは、Home Agent Cluster の単位で複数の計算機上で実行可能である。

電力事業所エージェントとコミュニティエージェントは市場によって電力の量及び価格の決定を行うため、市場を管理する市場エージェントの開発も行った。市場は売り手と買い手の双方が価格の提示を行うダブルオークションの実装を行った。市場エージェントは電力事業所エージェントとコミュニティエージェントから、入札情報を受け取り、約定した情報を電力事業所エージェント及びコミュニティエージェントに到達する。

さらに複数計算機上で実行されている Home Agent Cluster、電力事業所エージェント及びコミュニティエージェントの行動の同期を行うための同期エージェントが存在する。同期エージェントは他の各エージェントに行動の開始を通知し、それらのエージェントの行動を監視する。

## 5. シミュレーション評価実験

### 5.1 シミュレーションの設定

本シミュレーションでは家庭数を 1000、家庭の持つ太陽光発電の規模を 4kW システム、家庭の持つ蓄電池容量を 5kWh と定めている。家庭は電力売買及び消費の行動間隔を 1 時間とする。また電力事業所数は 1、コミュニティ数は 4 とし、電力事業所とコミュニティは一日に一度市場で電力の量及び価格の決定を行う。シミュレーションの実行期間は 1 年とする。

### 5.2 実験結果

まず、既存の制度の問題点を明らかにする。図 8 はコミュニティが存在しない場合の電力事業所の利益の推移であり、横軸にシミュレーション中の日数を、縦軸に累積利益を示している。図 8 では電力事業所の利益が最終的にマイナスであり、全ての家庭が太陽光発電を備えた場合、既存の余剰電力買取制度は破綻することが明らかになった。従って余剰電力のマネジメントにコミュニティによる大型

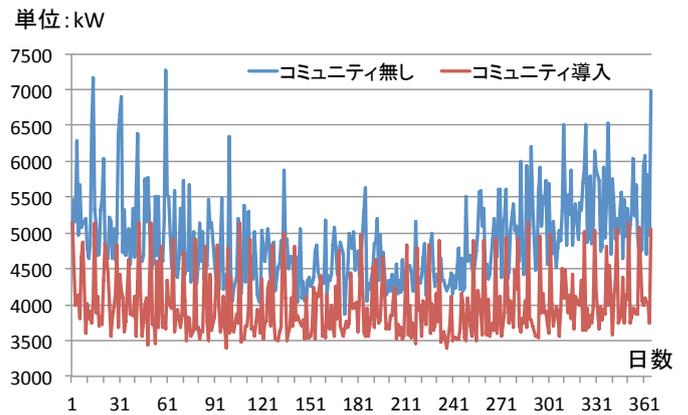


図 9 実験結果：電力事業所の発電量

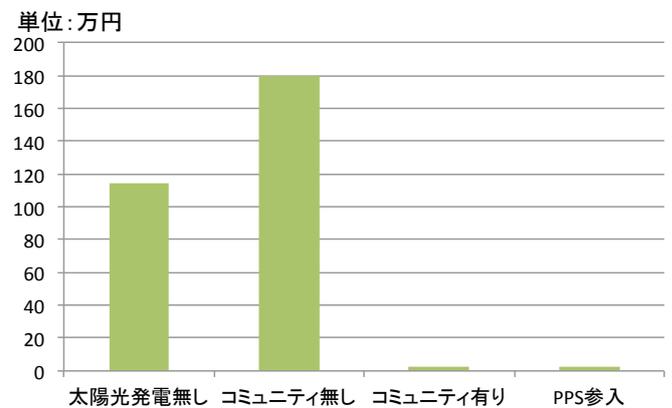


図 10 実験結果：発電量調整コスト

蓄電池運用が必要となる。

次に日本の課題として掲げられているピークカットに関して有効性を検証する。図 9 は提案手法であるコミュニティによる電力マネジメントがピークカットに有効である事を示している。図 9 はコミュニティが無い場合と、コミュニティを導入した場合の発電量の推移であり、横軸にシミュレーション中の日数を、縦軸に発電量を示している。コミュニティを導入しなかった場合の発電量のピーク値は 7000kW を超えている。対してコミュニティによる電力マネジメントを導入した場合、発電量のピーク値は約 5000kW まで低下している。発電量のピーク値が減少した原因は、コミュニティの大型蓄電池がバッファとして機能したためである。

次に発電量の調整コストについてコミュニティの有効性を検証する。図 10 は提案手法であるコミュニティによる電力マネジメントが発電量調整コストの削減に有効である事を示している。図 10 は発電量調整のコストである。ここで発電量調整のコストとは、電力事業所が電力需要の変動に応じて発電所の出力を変動させる際のコストである。本シミュレーションでは発電所の出力変動の際にかかる費用を、1 時間に 1kW 当たりの変動につき 5 円と設定している。発電量のコントロールが出来ない再生可能エネルギー

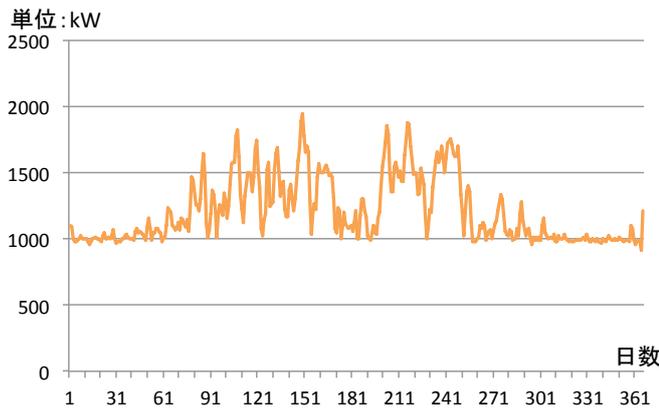


図 11 実験結果：停電時のバックアップ対策

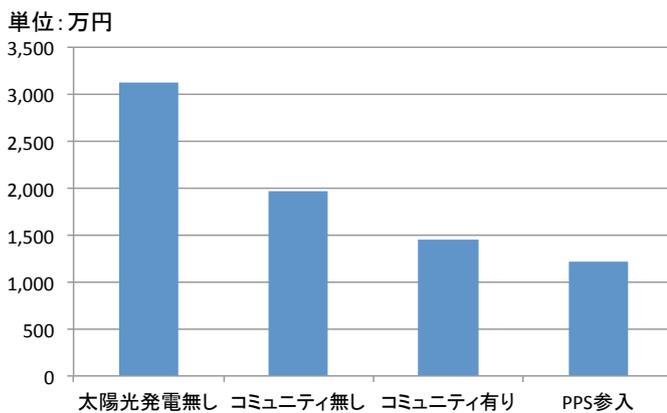


図 12 実験結果：社会全体のコスト

を大量に導入する場合、再生可能エネルギーの発電量が電力需要の変動に影響を与えるため、発電量調整コストは重要な指標である。本シミュレーションでも、コミュニティを導入していないケースでは、太陽光発電の影響により発電量調整コストが増加したことが示されている。コミュニティを導入した場合、市場によって事前に電力の割り当てを決定するため、電力事業所は発電量の決定が容易になり、発電量調整コストが大幅に減少している。また、コミュニティ導入による発電量調整コストの減少効果は PPS 参入時でも変化せず、今後 PPS が電力市場に参入する環境においても提案手法であるコミュニティによる電力マネジメントモデルが有効である事が示されている。

次に停電時のバックアップ対策に関してコミュニティの有効性を検証する。図 11 は提案手法であるコミュニティによる電力マネジメントが停電時のバックアップ対策に有効である事を示している。図 11 はコミュニティの大型蓄電池の充電量の推移の平均であり、横軸にシミュレーション中の日数を、縦軸に充電量を示している。図 11 では、シミュレーション実行期間である 1 年間を通して充電量が落ち込む期間が無く、安定している。

最後に社会全体のコストに関してコミュニティ導入の有効性を検証する。図 12 は社会全体のコストを示している。

ここで社会全体のコストとは、電力事業所が発電に要したコスト及び発電量調整に要したコストの合計である。この社会全体のコストが小さい程、環境負荷が小さいことを表しており、提案手法であるコミュニティによる電力マネジメントの導入が環境負荷の低減に繋がることが示されている。また社会全体のコストに関する比較では、PPS が電力市場に参入した場合の方が全体のコストが減少することを明らかにした。

## 6. まとめと今後の課題

現在日本ではピーク時において電力が不足する問題が顕在化し、ピークカット及び停電時のバックアップ対策が課題となっている。それらの課題に対し蓄電池の運用が着目されており、本論文ではコミュニティによって大型蓄電池の運用を行うマルチエージェント電力マネジメントモデルを提案した。

本研究では家庭エージェント、コミュニティエージェント、電力事業所エージェント及び PPS エージェントを作成し、そして、マルチエージェントによる電力売買シミュレーションを行い、現在日本で課題として掲げられているピークカット及び停電時のバックアップ対策、さらに社会全体のコストに関して評価を行った。

マルチエージェントによる電力売買シミュレーション実験の結果からコミュニティに基づくマルチエージェント電力マネジメントモデルの有効性に関して以下の知見が得られた。

- コミュニティと家庭間で電力を融通することでピークカットに効果がある
- コミュニティ運用は負荷平準化対策となり発電量調整コストを削減
- コミュニティでの大型蓄電池に蓄えることで停電時のバックアップ対策になる

そして、シミュレーション全体の比較では、社会全体のコストを評価指標とし、提案手法の有効性を示した。

今後の課題としては、各家庭の構成やライフスタイルを異なる設定にするなど、さらに詳細な設定でのシミュレーションを行うことである。また、電力事業所に関するモデルについても、発電方法毎に異なる詳細なモデル等を考慮することが必要である。さらに、コミュニティの戦略が家庭及び電力事業所との電力売買にもたらす影響の調査が重要な課題である。例えばコミュニティ毎に家庭との電力売買に用いる価格決定関数を変化させる事や、コミュニティの形成手法に様々なバリエーションを持たせる等である。コミュニティの戦略が電力融通全体がどの様に影響するかを調査することで、社会全体で環境負荷をより低減出来るかを明らかにしたい。

参考文献

- [1] Perukrishnen V, Thomas D. Voice, Sar vapali D. Ramchurn, Alex Rogers, and Nicholas R. Jennings: Agent-based Micro-Storage Management for the Smart Grid, *Proc. of the 9th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2010)* (2010)
- [2] Perukrishnen V, Thomas D. Voice, Sar vapali D. Ramchurn, Alex Rogers, and Nicholas R. Jennings: Agent-Based Control for Decentralised Demand Side Management in the Smart Grid, *Proc. of the 10th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2011)* (2011)
- [3] Thomas D. Voice, Perukrishnen Vytelingum, Sarvapali D. Ramchurn, Alex Rogers and Nicholas R. Jennings: Decentralized Control of Micro-Storage in the Smart Grid, *Proc of the Twenty-Fifth Conference on Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI-2011)* (2011)
- [4] Prashant P. Reddy, Manuela M. Veloso: Learned Behavior of Multiple Autonomous Agents in Smart Grid Markets, *Proc of the Twenty-Fifth Conference on Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI-2011)* (2011)
- [5] Bharadwaj R. Sathyanarayana and Gerald T. Heydt: A Roadmap for Distribution Energy Management via Multiobjective Optimization, *Power and Energy Society General Meeting* (2010)
- [6] Perukrishnen Vytelingum, Sarvapali D. Ramchurn, Thomas D. Voice, Alex Rogers, and Nicholas R. Jennings: Trading Agents for the Smart Electricity Grid, *The 9th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2010)* (2010)
- [7] D.Friedman,J.: The Double Auction Market: Institutions, Theories, and Evidence, *Addison-Wesley* (1991)
- [8] P.R.Wurman,W.W. and Wellman,M.: Flexible double auctions for electronic commerce: theory and implementation, *Decision Support Systems*, Vol.24, pp. 17-27 (1998)
- [9] Miadreza Shafie-khah and Mohsen Parsa Moghaddam and Mohamad Kazem Sheikh-El-Eslami and Mehdi Rahmani-Andebili: Modeling of interactions between market regulations and behavior of plug-in electric vehicle aggregators in a virtual power market environment, *Energy*, Vol.40, pp. 139-150 (2012)
- [10] M.M. Lotfi and S.F. Ghaderi: Possibilistic programming approach for mid-term electric power planning in deregulated markets, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 34, pp. 161-170 (2012)
- [11] Derek W. Bunn and Fernando S. Oliveira: Agent-based analysis of technological diversification and specialization in electricity markets, *European Journal of Operational Research*, Vol. 181, pp. 1265-1278 (2007)
- [12] T. Pinto and H. Morais and P. Oliveira and Z. Vale and I. Praca and C. Ramos: A new approach for multi-agent coalition formation and management in the scope of electricity markets, *Energy*, Vol. 36, pp. 5004-5015 (2011)
- [13] Kan Sichao and Hiromi Yamamoto and Kenji Yamaji: Evaluation of CO2 free electricity trading market in Japan by multi-agent simulations, *Energy Policy*, Vol. 38, pp. 3309-3319 (2010)
- [14] 経済産業省資源エネルギー庁: 夏期最大電力使用日の需要構造推計 (東京電力管内) (2011), <http://www.meti.go.jp/setsuden/20110513taisaku/16.pdf>
- [15] 日本気象協会: 太陽光発電用標準気象データ METPV-11, 独立行政法人新エネルギー産業技術総合開発機構 年間特別日射量データベース (2012) <http://app7.infoc.nedo.go.jp/>