

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ジメントモデルの有効性の検証

A Study on Community-based Electric Power Management with Agent-based Simulation

金森 亮*¹ 川口 将吾*¹ 伊藤 孝行*¹
Ryo Kanamori Shogo Kawaguchi Takayuki Ito

*¹名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

In this paper, we focus on community-based electricity markets. Community can be defined as a domestic group of individual homes. We assume a community can have a larger battery that can be shared by individual homes. In the real world, community-based battery sharing has been focused on as a useful electricity buffer in crisis situations and also for stabilizing usage of electricity in a domestic area. We build several domestic electric power management agent models by using Japanese power consumption data and meteorological data. And we evaluate community-based electricity markets by using agent-based simulation, in which the validity of the large-sized storage battery in a community is confirmed regarding the load mitigation to a power network.

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、大型蓄電池をコミュニティで運用・共用することで、各住宅では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できるとともに、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、本研究で提案す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有用性があることを示す。

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多岐に渡るが、エージェントに基づいたアプローチとしては、文献 [1]、文献 [2] がある。文献 [1] 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おり、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、再生可能エネルギーは想定されおらず、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。

文献 [2] は、文献 [1] を発展させたモデルに関する論文である。文献 [2] では家庭からの余剰電力の売却も扱っており、家庭だけでなく電力事業所にも戦略を定義し、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 [2] 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が、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 [2] 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。

2. コミュニティに基づく電力マネジメント

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会社であり、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 3.1 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に存在する。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 3.3 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 3.2 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 2 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る。コミュニティ

連絡先: 金森 亮, 名古屋工業大学しくみ領域, 名古屋市昭和区御器所町, 052-735-5278, kanamori.ryo@nitech.ac.jp



図 1: コミュニティに基づく電力マネジメントモデル



図 2: 比較モデル: コミュニティ無し

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。

さらに本研究では、コミュニティと各家庭に太陽光発電設備が存在しないケースも設定する。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。

3. エージェントモデル

3.1 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 (3.1.1)、太陽光発電の導入 (3.1.2)、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。

3.1.1 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 ([3]) を元に作成を行った。本資料 ([3]) 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ものである。

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 日の気象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

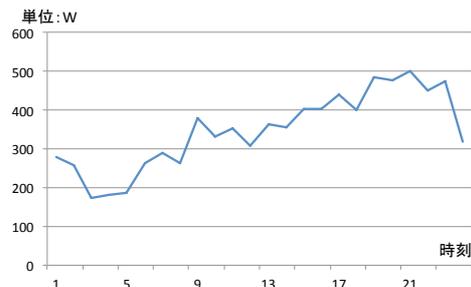


図 3: 電力消費モデル

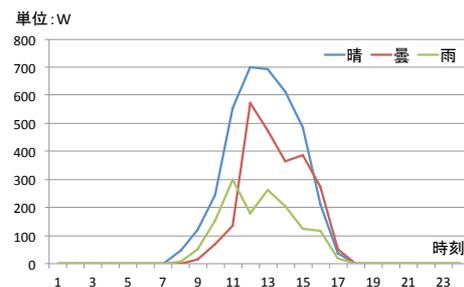


図 4: 太陽光発電モデル

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 3 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 3 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。

3.1.2 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準気象データ METPV-11[4] を用いて作成した。

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 4 は天候別の太陽光発電量の例であり、横軸に時刻を、縦軸に発電量を示している。図 4 は天候の変化によって太陽光発電量が大きく変わることを示している。図 4 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。

3.1.3 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 での蓄電池充電容量 $battery_t$ 、太陽光発電量 $solar_t$ 、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 α を用いて式(3)によって表現される。ここで α は正の値である。最低購入量の計算には時刻 $t+1$ での太陽光発電量 $solar_{t+1}$ が含まれていない。これは太陽光発電量が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 α については、時刻 $t+1$ での太陽光発電量 $solar_{t+1}$ 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、一時間あ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。

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

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

3.2 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、 γ 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、 γ を0.2 Q_{limit} を6000kWとした。

3.3 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パフアの役割を果たすことで、安定したピークカットの効果を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、コミュニティの蓄電池の充電量に基づいた価格決定を用いる。式(7)はコミュニティが価格決定を行う関数である。式(7)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 γ は変化率を表している。

$$\frac{P_d}{e^{\gamma(x-50)} + 1} + P_b \quad (7)$$

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 γ 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(8)によって決定する。

$$P_b^{sell} = P_m / Q_m - 5 \quad (8)$$

電力事業所の最低販売価格は20円のため、式(8)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. シミュレーション評価実験

4.1 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。

4.2 実験結果

はじめに、今後の日本の課題となるピークカットに関する有効性を検証する。図5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5はコミュニティが無い場合と、コミュニティを導入した

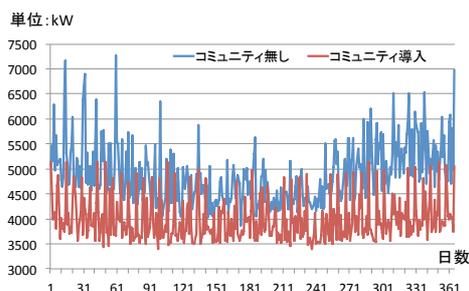


図 5: 実験結果：電力事業所の発電量

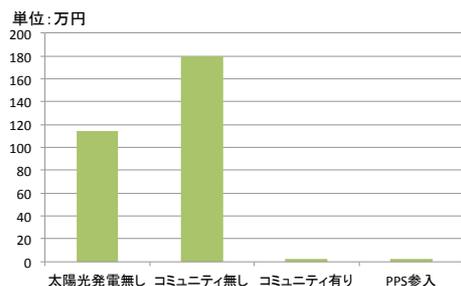


図 6: 実験結果：発電量調整コスト

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 6 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。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。

次に停電時のバックアップ対策としての有効性を確認すると、コミュニティの大型蓄電池の充電量は 1000kWh/day 以上を推移しており、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。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を確認した。

5. 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開発した。

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として 1) 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、2) 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、3) 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、ことが確認された。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] 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)
- [3] 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>
- [4] 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 年間時別日射量データベース (2012) <http://app7.infoc.nedo.go.jp/>