

仮想コミュニティによる 電力融通ネットワークの電力マネジメント

吉村 卓也 金森 亮^{a)} 伊藤 孝行^{b)}

概要：本研究では仮想コミュニティによる電力融通ネットワークの電力マネジメントの有用性を示す。再生可能エネルギーを有効的に利用するために、複数家庭の蓄電池を集約し大規模蓄電池を管理する仮想的なコミュニティに基づく電力マネジメントモデルを提案する。提案手法では、家庭間の電力融通を効率化するための電力配分を行う。実験では、余剰電離を買い取る電力ネットワーク上の電力事業所とコミュニティのコストを従来の手法と比較し、再生可能エネルギーの有効利用の比較を行う。

キーワード：電力マネジメント 電力配分 大規模蓄電池 仮想コミュニティ マルチエージェント

1. はじめに

本研究では、電力ネットワーク上に複数家庭の蓄電池を共有化するコミュニティを導入した電力マネジメントのモデルを提案し、有効性について示す。再生可能エネルギーが導入された次世代電力ネットワーク注目を集めている。しかし、再生可能エネルギーの出力は不安定である。例えば、太陽光発電は、天候や時間帯によって発電量が大きく変動する。出力の大きな変動は、必要なときに電力が得られなかったり、必要でない時に大量の発電をしてしまうなど、電力の不足や余剰を発生させる事態を招きやすくする。特に、利用されない余剰電力は、熱となって放出されてしまい、無駄の多い発電をしてしまうため、再生可能エネルギーを十分に活かすことができない。

再生可能エネルギーの不安定性の問題を解決する方法として、蓄電池を導入する方法がある。余剰電力を受け入れられる大規模な蓄電池を設置することで、電力需要が高い時に蓄電した余剰電力を使いまわすことができる。しかし、大規模な蓄電池は導入コストがかかるため、容易に拡張することはできない。

本研究では、導入コストがかかる大規模蓄電池を用いずに、再生可能エネルギーの不安定性の問題を解決する。本研究では、特に太陽光発電の利用を想定する。本研究のアプローチでは、複数家庭の蓄電池を一つの大規模な蓄電池としてみなし、余剰電力の退避、または電力融通を行う

コミュニティを導入した電力マネジメントモデルを提案する。

また、各家庭で蓄電池を有効利用することで、多くの余剰電力を利用できる家庭エージェントの基づく電力マネジメントを提案する。家庭エージェントは、多くの余剰電力を利用するための蓄電計画を、最適化手法を用いて立てる。より蓄電計画に合わせた蓄電池管理を行うため、太陽光発電予測を行う。

評価実験では、エージェントシミュレーションを用いて行う。エージェントシミュレーションでは、1つ目に、二酸化炭素の排出量の低減効果を評価し、低炭素化社会の貢献について考察する。2つ目に、電力事業所とコミュニティのトータルコストを評価する。2つのコストを評価し、電力ネットワークの低コスト化について考察する。

2. 関連研究

文献 [4] では、コミュニティに大規模な蓄電池を導入し、余剰電力の有効利用を検証する電力マネジメントモデルを提案している。大規模蓄電池は余剰電力のバッファ機能として働き、電力が必要になった時に大規模蓄電池から電力が取り出せるようになっている。また、文献 [9] では、二酸化炭素の削減や経済的な利得にとって効果的なコミュニティの戦略について議論を行っている。文献 [9] でも、コミュニティには蓄電池を所有している。文献 [9] では、コミュニティには再生可能エネルギーの電源や蓄電池、揚水発電も導入されていることから、想定するコミュニティは建設費用や時間が多くかかる。しかし、文献 [4], [9] では、コミュニティ側の蓄電池の導入コストについては考慮され

¹ 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology, Japan

^{a)} kanamori.ryo@nitech.ac.jp

^{b)} ito.takayuki@nitech.ac.jp

ていない．本研究では大規模な蓄電池の導入コストを考慮する．

また，文献 [2] では，再生可能エネルギーによる発電設備と蓄電池を備えた，コミュニティ内での家庭の電力取引の交渉プロトコルを提案している．交渉のプロトコルは，複雑な相互依存する問題を一つに絞るための交渉に関する制限を課す．提案している交渉プロトコルに基づく電力取引を行うことで，蓄電池を有効利用できることを示している．

文献 [2] でも同様に，コミュニティとしての役割を担う要素には大容量の蓄電池を想定している．本研究で提案するモデルでは，コミュニティは大容量の蓄電池を持たずに，より効率的に蓄電池を利用し，余剰電力を有効活用する．

文献 [1] では，エージェント同士が協調的に電力融通するためのコミュニティを導入し，蓄電池の効率利用の実現させる方法について述べられている．[1] は電力取引は家庭間のみで閉じているネットワークによるシミュレーションを行っている．本研究では電力事業所を含めた電力網全体での電力取引におけるシミュレーションを行い評価する．

文献 [11] では，余剰電力の融通をエージェントの強化学習手法を用いて，自動化かつ効率化を実現している．家庭のエージェントは個々の環境に適応しながら，電力市場で利益最大化を学習する．

文献 [8] 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．しかし，文献 [8] で定義するモデルでは再生可能エネルギーが想定されておらず，リアルタイム料金制における経済的蓄電池の有効利用や電力購入の戦略のみに主眼が置かれている．本研究では，太陽光発電の安定利用を考慮しており，また，ネットワーク全体におけるコストも考慮する．

また，文献 [7] は，文献 [8] を発展させたモデルを提案している．文献 [8] では電力の経済的な購入戦略を提案していたが，文献 [7] では家庭からの余剰電力の売却も扱っている．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，及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 [7] 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 [7] 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 [7] は電力売買を主題とするが，電力網全体のマネジメントに着目している．

文献 [6] も同様に，多目的最適化により，分散協調的に最適解を求める電力マネジメントについて述べられている．

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 [6] 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．

また，文献 [10]，[6] の問題点として，分散協調最適化は電力ネットワークの規模が拡大すると，良好な解を求めることが困難となる．集中制御，分散制御，及び協調制御の最良の融合を考えることが現実的である．本研究では，個々の家庭の電力供給量を最適化し，電力融通の際に，電力分配量を計算し，エージェント間の最良の電力融通を行う．

3. 仮想コミュニティによる電力融通

3.1 蓄電池の空き容量に基づく電力配分

各家庭に対する電力配分は，次の 4 つ方針に基づいて行う．

- 蓄電池の空き容量が多い家庭は電力配分を多くする
- 電力分配の対象は購入する家庭に限る
- 電力を販売する家庭には電力配分対象外
- 家庭が販売する電力は電力を購入する家庭に電力融通される

電力を購入する家庭の蓄電池の集合を次の式 (1)

$$S = \{s | s_k, b_k > 0, k = 1, \dots, N\} \quad (1)$$

N は家庭数である． b_k は家庭 k の電力購入量である． s_k は家庭 k の蓄電池の空き容量である．式 (1) から，集合 S は，電力の購入量が 0 より大きい家庭を対象にし，家庭の蓄電池の空き容量を要素に持つ集合である．

次に，蓄電池の空き容量に基づく重み付け関数を式 (2) に示す．

$$w_n = \frac{s_n}{\sum_{s_l \in S} s_l} \quad (2)$$

式 (2) は，家庭 n に対する重み関数である．家庭 n の重み w_n は，家庭 n の蓄電池の空き容量 s_n を集合 S の総和で割った値である．コミュニティは，蓄電池の空き容量が多い家庭に対して，多くの電力を割り当てるように重み付けを行う．

次に，各家庭への電力配分を次の式 (3) に示す．

$$E_n = \begin{cases} s_n & (s_n < \hat{E}_n) \\ \hat{E}_n & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

\hat{E}_n は家庭 n への配分する予定の電力量である． $u(t)$ は時刻 t での，コミュニティが家庭へ送電できる電力供給量

である。

家庭 n の電力配分量 E_n は、蓄電池の空き容量 s_n が配分予定の電力量 \hat{E}_n よりも少ない場合は、空き容量分の電力を配分する。それ以外の場合は、予定する配分量 \hat{E}_n を配分する。

また、 \hat{E}_n は式 2 で求めた重み w_n を用いて、次の 4 で求める。

$$\hat{E}_n = w_n u(t) \quad (4)$$

条件式 (3) は、空き容量よりも送電量 \hat{E}_n が多い場合、送電する電力量を空き容量分を送るという制約条件である。式 (4), (3) から得られた送電量 E_n を全ての家庭に対して求めて電力の供給を行う。

3.2 電力事業所によるサポート

本研究では、コミュニティの供給力不足による家庭の停電、及び余剰電力が家庭の蓄電池に蓄電ができなくなって生じる停電を避けるために、直接、電力事業所がサポートする。電力事業所は、前者のコミュニティの供給力が不足する場合は、足りない分の電力を販売する。後者では、電力事業所は家庭の蓄電池容量を超えて発生した余剰電力を買い取る。

式 (5) と (6) にて、サポート時の購入量および販売量を求める式を示す。

$$b_{sp}(t) = \begin{cases} |B'(t) - D(t) + PV(t)| & (B'(t) + PV(t) < D(t)) \\ 0.0 & (otherwise) \end{cases} \quad (5)$$

$B'(t)$ は一度電力売買が行われた後の時刻 t の蓄電池状態を表す。 $D(t)$ は時刻 t の電力需要である。 $PV(t)$ は時刻 t の太陽光発電電量である。蓄電量 $B'(t)$ と太陽光発電電量 $PV(t)$ の和が、電力需要 $D(t)$ よりも小さい時、時刻 t の蓄電池の電力を利用しても需要に足りていないことを表している。従って、電力事業所から購入する。購入する電力量は $|B'(t) - D(t) + PV(t)|$ である。それ以外の場合は、蓄電池の蓄電量で需要を満たすことができたことを意味するため、電力事業所から電力を購入しない。

次に、式 6 はサポート時の電力事業所に販売する電力量を示す式である。

$$s_{sp}(t) = \begin{cases} PV(t) + B'(t) - e_{capa}, & (e_{capa} < PV(t) + B(t)) \\ 0.0, & (otherwise) \end{cases} \quad (6)$$

蓄電量 $B'(t)$ と太陽光発電電量 $PV(t)$ の和が、蓄電池容量 e_{capa} よりも大きい時、蓄電池容量を越える余剰電力が発生したことを表している。従って、電力事業所に電力を販売する。販売する電力量は $PV(t) + B'(t) - e_{capa}$ である。

それ以外の場合は、蓄電池の蓄電容量範囲内に余剰電力を蓄電できたことを意味するため、電力事業所に電力は販売しない。

4. 家庭の電力マネジメント

4.1 最適化による蓄電計画

蓄電池利用を効率化するために、1日の蓄電池利用を最適化し、蓄電計画を立てる。蓄電計画は、過去の購入量、蓄電池状況、電力価格、及び電力需要を用いて、最適な放電量（蓄電量）を算出する。

最適化問題で用いる目的関数は次の式 (7) で定義する。

$$\arg \min \sum_{t=1}^T \left(\{\hat{D}(t) - (\hat{b}(t) + v(t) + \hat{P}\hat{V}(t))\}^2 + \hat{b}(t)\hat{p}(t) \right) \quad (7)$$

変数 t は分単位のタイムステップを表し、 T は 60×24 の1日の時間を表す。

$\hat{D}(t)$, $\hat{b}(t)$, $v(t)$, $\hat{P}\hat{V}(t)$, 及び $\hat{p}(t)$ は、それぞれ時刻 t での電力需要、時刻 t での電力購入量、時刻 t での蓄電池からの放電量、時刻 t での太陽光発電電量、及び時刻 t での電力価格を表す。ただし、 $\hat{b}(t)$, PV , 及び $\hat{p}(t)$ は過去数日分の実績値の平均値として与えられる。式 (7) は、時刻 t で必要な電力から得られる供給量 $\hat{b}(t) + v(t) + \hat{P}\hat{V}(t)$ を引いた値をコストとして、コストが最小となる $v(t)$ を求める目的関数である。目的関数は、必要な電力需要に対して、どの程度蓄電または放電するかの量を、過去の発電量及び購入量を参考にして求めていく。求めた蓄電計画に沿って、家庭は電力の購入または販売の行動選択し、販売量及び購入量を決定する。また、最適化手法を適用する際に、蓄電池容量の制約条件がある。 $v(t)$ はその蓄電池容量の制約条件上で与えられる必要がある。制約条件式は次の式 (8) で与えられる。

$$-\left(e(0) + \sum_{i=1}^{t-1} v(t)\right) < v(t) < e_{capa} - \left(e(0) + \sum_{i=1}^{t-1} v(t)\right) \quad (8)$$

$e(0)$, 及び e_{capa} はそれぞれ、時刻 0 での蓄電池の蓄電量、及び蓄電池容量を表す。 $e(0) - \sum_{i=1}^{t-1} v(t)$ は時刻 $t-1$ のときの蓄電池の蓄電量である。式 (8) から、放電量 $v(t)$ は負の値を取ることがあり、負の放電量とは、すなわち蓄電量のことを示している。つまり、 $v(t)$ が負の時は蓄電池へ蓄電することを表し、蓄電池に出入りする電力量の値 $v(t)$ を最適化する。

また、家庭が決定する販売及び購入量は次の式 (9) で与えられる。

$$buy(t) = \hat{D}(t) - v(t) - \hat{P}\hat{V}(t) \quad (9)$$

$\hat{D}(t)$ は時刻 t の家庭の電力需要の推定値である。 $v(t)$ は

時刻 t の蓄電池からの放電量である． $\hat{P}V(t)$ は時刻 t の電力発電量の推定値である．式 (9) は，各時刻での蓄電計画に基づく購入量 $\hat{buy}(t)$ を決定する． $\hat{buy}(t)$ の値は，蓄電計画に基づいて決定された，時刻 t で予定する電力購入量を表す．時刻 t の電力需要推定値 $\hat{D}(t)$ から，太陽光発電の推定値 $\hat{P}V$ ，及び放電量 $v(t)$ を引いて得られる．つまり，太陽光発電，及び蓄電池の蓄電量だけでは電力需要を賅えない電力量を購入予定とする．

また，家庭とコミュニティの間での電力送電量には制限がある．本研究では，タイムステップ t (単位は分) に対して，1時間の電気自動車の充電速度の限界値が $2kW$ という事実を基準に， $2000/(60/t) = 500(W/15分)$ と設定する．

4.2 太陽光発電予測

太陽光発電は，天候に大きく左右されることや，時間帯によって発電出力が大きく変化する．また，季節によって発電量も変わるため，これらの天候及び季節の特性を考慮する必要がある．本論文で設計する予測モデルでは先に述べた3つの特性を考慮して以下の (1)，(2)，及び (3) の処理を行う．

- (1). 天候毎によるパターンの識別
- (2). 過去のデータから類似性の高いパターンを検索
- (3). 蓄積データの周期性による季節変動の考慮

(1) では，家庭のエージェントが保持している蓄積データとして天気予報別に分けて記憶する．(2) では，追跡してきた発電量の推移を特徴ベクトルとみなして，過去の履歴のデータから類似した波形を検索して調整していく．(3) では，過去の履歴から検索するデータの範囲を指定する．現在追跡している時期が何時の季節かによって検索場所を動的に変動させ，季節による変動影響を考慮する．

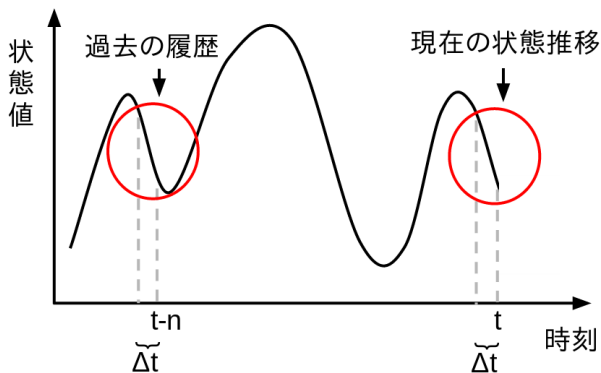


図 1 履歴から類似の状態変化のパターンを検索

図 2 に，本論文で提案する予測モデルを用いたときの実測値，予測値及び平均的な発電モデルを示したある1日のグラフである．グラフは天候が晴れの時の発電量の推移を示しており，横軸は1目盛15分のタイムステップの時間

軸を表し，縦軸は太陽光発電によって発電される電力ワット数である．

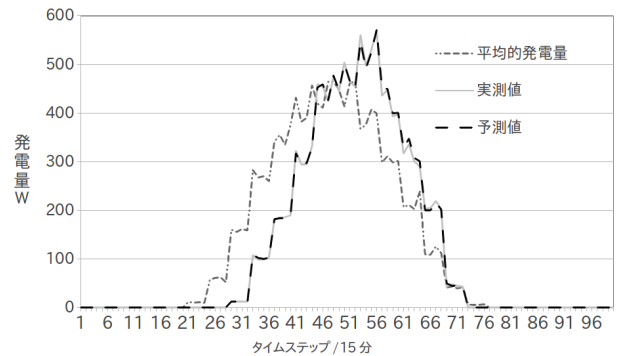


図 2 メモリベースパーティクルフィルタによる太陽光発電量予測結果

平均的な天候の発電曲線のモデルは，気象庁が提供する晴れ日数，曇り日数，及び雨日数から定義する．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[3] を用いている．グラフから，本研究で提案する予測モデルのグラフと実測値の予測値が近い値を示している．従って，太陽光発電予測モデルとして利用できる．

5. 家庭エージェントの電力購入量決定戦略

家庭エージェントは実際に電力購入を行う場合，最適化問題によって求めた蓄電計画に従って電力の購入量または販売量を決定する．家庭エージェントが電力を購入する行動を取る時とは，電力需要に対して得られる家庭内電力供給量が少ない時である．家庭内電力供給量とは，蓄電池から得られる電力と太陽光発電から得られる電力のことをいう．また，最適化手法で求めた蓄電計画に従って蓄電池状態を維持することが望ましいため，蓄電池の蓄電量が蓄電計画の値を満たさないときには，多めに電力を購入する．式 10 に購入量の決定式を示す．

$$buy(t) = \begin{cases} \hat{buy}(t) + \left| \frac{B_{opt}(t) - B(t)}{2} \right| & (B_{opt}(t) > B(t)) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (10)$$

$buy(t)$ は時刻 t で購入する電力量である． $B(t)$ は時刻 t の蓄電池の蓄電量である． $B_{opt}(t)$ 蓄電計画で求めた時刻 t での目標蓄電量を表す．

目標蓄電量 $B_{opt}(t)$ よりも実際の蓄電量 $B(t)$ のほうが少ない場合，計画していた蓄電量よりも少ないため，予定の購入量よりも多めに購入する．追加で購入する量は， $\left| \frac{B_{opt}(t) - B(t)}{2} \right|$ である．式 (9) で求めた，購入する予定の電力量 $\hat{buy}(t)$ に加えた電力量が家庭の購入する電力量になる．

また，目標蓄電量 $B_{opt}(t)$ よりも実際の蓄電量 $B(t)$ の

ほうが大きい, または等しい場合, 予定する蓄電計画よりも蓄電池に電力が蓄えられている状態は, 電力を購入しない.

次に, 家庭エージェントが電力を販売するケースについて述べる. 家庭エージェントが電力を販売するときは, 家庭内供給量が電力需要よりも上回る時である. さらに, 目標蓄電量よりも現在の蓄電量が多い場合, 多く電力を販売することができる. 電力の販売量は次の式 (11) で定義する.

$$\hat{sell}(t) = \begin{cases} |\hat{buy}(t)| & (\hat{buy}(t) < 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (11)$$

式 (9) で求める, 購入する予定の電力量 $\hat{buy}(t)$ が負の値を取るとき, 予定する販売量 $\hat{sell}(t)$ は $|\hat{buy}(t)|$ である. それ以外の場合は, 予定する販売量は 0 である.

販売量の決定は式 (12) で定義する.

$$sell(t) = \begin{cases} \hat{sell}(t) + \left| \frac{B_{opt}(t) - B(t)}{2} \right| & (B_{opt}(t) < B(t)) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (12)$$

時刻 t の販売量 $sell(t)$ は, 目標蓄電池 $B_{opt}(t)$ が現在の蓄電量 $B(t)$ より小さい時, 予定の販売量 $\hat{sell}(t)$ に目標蓄電量と蓄電量の差の半分値 $\left| \frac{B_{opt}(t) - B(t)}{2} \right|$ を加える. 蓄電計画の蓄電量 $B_{opt}(t)$ よりも現在時刻 t の蓄電量のほうが多いため, より多く電力を販売するよう行動する. また, 蓄電量 $B(t)$ より, 目標蓄電量 $B_{opt}(t)$ が大きい場合, 販売量は 0 とする.

家庭は購入または販売する電力を決定し, 取引相手から電力を購入または販売した後に, 蓄電池の状態を更新する. 蓄電池の更新式は次の式 (13) に示す.

$$B'(t) = B(t) - sell(t) + buy(t) \quad (13)$$

$B'(t)$ は電力売買が終わった後の蓄電池の状態である. $B'(t)$ の状態は, 実際の時刻 t の太陽光発電, 及び電力需要は反映されていない. 従って, 時刻 $t+1$ の蓄電池状態は次の式 14 で与えられる.

$$B(t+1) = \begin{cases} 0.0 & (B'(t) + PV(t) < D(t)) \\ e_{capa} & (B'(t) + PV(t) > e_{capa}) \\ B'(t) - D(t) + PV(t) & (otherwise) \end{cases} \quad (14)$$

蓄電量 $B'(t)$ と発電量 $PV(t)$ の和が電力需要 $D(t)$ よりも小さい時, 蓄電池は 0.0 である. 蓄電量 $B'(t)$ と発電量 $PV(t)$ の和が蓄電池容量 e_{capa} よりも大きい時, 蓄電池は e_{capa} である. それ以外の時は, $B'(t) - D(t) + PV(t)$ である.

6. シミュレーション実験

評価実験では, 低炭素化社会の実現に対する有効性として, 二酸化炭素の排出量の低減に対する効果について評価する. また, 太陽光発電から発生する余剰電力の有効活用について評価する. 有効活用の評価では, 電力ネットワーク全体にかかるコストを, 電力事業所及びコミュニティのコストを比較する.

本研究で提案する手法の有用性を示すために, 大きく分けて次の 3 つの Case で比較実験を行う.

Case 0: 電力事業所と家庭のみで形成される電力ネットワーク

Case 1: 大型蓄電池を所有するコミュニティが導入された電力ネットワーク

Case 2: 家庭用蓄電池を集約し共有化するコミュニティが導入されたネットワーク

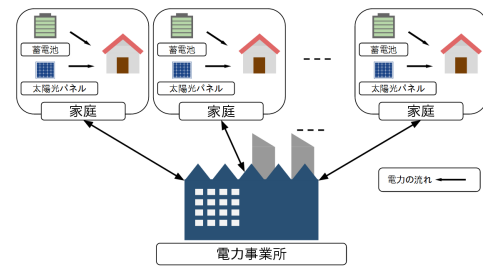


図 3 Case 0: 電力事業所と家庭からなる電力ネットワーク

Case 0 のコミュニティ無しでは, エージェント間の相互接続が電力事業所と一家庭からなる従来の電力網のモデルを示している. Case 0 のモデルを図 3 に示す.

Case 1 は, コミュニティと家庭, コミュニティと電力事業所, 及び家庭と電力事業所の間で電力のやりとりが行われ, コミュニティは大型蓄電池を所有し, 大型蓄電池に蓄電された電力を供給力として, 家庭に電力を配分する. Case 1 のモデルを図 4 に示す.

Case 2 では, 複数家庭の蓄電池を共有化するためのコミュニティで, 本研究で提案する手法である. Case 2 のモデルを図 5 に示す.

また, Case 1 及び Case 2 では, 家庭が太陽光発電及びコミュニティから得られる供給量だけでは需要を満たすことができない場合, またはコミュニティ内で収まりきれない余剰電力が発生した場合, 電力事業所が過不足分を保証する. 電力事業所のサポート時は, 買い取り価格, 及び販売価格は, それぞれ 20(円/kW), 及び 24(円/kW) とする.

コミュニティの所有する大型蓄電池の容量における評価を行うために, Case 1 では, コミュニティが所有する蓄電池の容量を 5kW, 10kW, 15kW, 20kW, 25kW, 及び 30kW の 6 つの場合に分けて比較する. 1 世帯の蓄電容

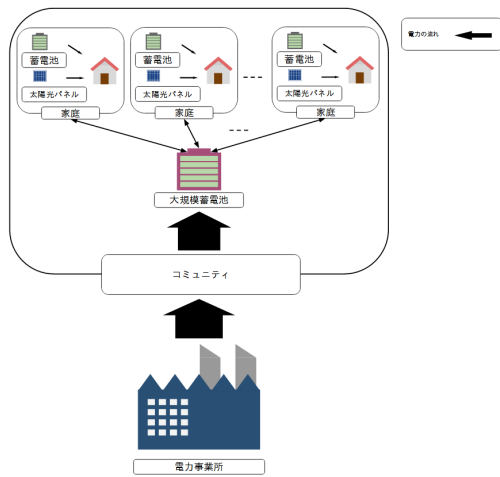


図 4 Case 1: 電力事業所, 大型蓄電池を所有したコミュニティ, 及び家庭からなる電力ネットワーク

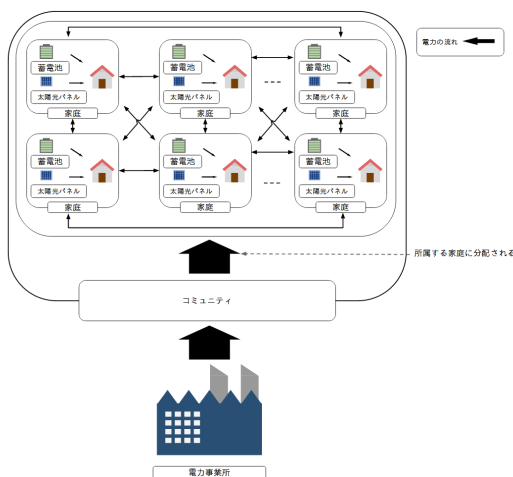


図 5 Case 2: 電力事業所, 家庭蓄電池を共有化するコミュニティ, 及び家庭からなる電力ネットワーク

量^{*1}を基準として, 1 世帯から 6 世帯分の蓄電池を設置したコミュニティである. 大型蓄電池を所有するコミュニティの比較 Case 1-1, Case1-2, Case1-3, Case1-4, Case1-5, 及び Case1-6 を以下に示す.

- Case 1-1: 5kW (1 世帯分の蓄電池容量)
- Case 1-2: 10kW (2 世帯分の蓄電池容量)
- Case 1-3: 15kW (3 世帯分の蓄電池容量)
- Case 1-4: 20kW (4 世帯分の蓄電池容量)
- Case 1-5: 25kW (5 世帯分の蓄電池容量)
- Case 1-6: 30kW (6 世帯分の蓄電池容量)

次に, 家庭の蓄電池容量を家庭毎で変更するために Case 2 を 2 つの Case に分ける. 家庭の蓄電池の容量を均一または不均衡での影響を検証する.

Case 2-1: コミュニティに属する家庭エージェントの蓄電池容量を均一にする.

*1 ONE エネルギーのレンタル蓄電池は 5.53kW

家庭の蓄電池容量はすべて 5kW とする.

Case 2-2: コミュニティに属する家庭エージェントの蓄電池容量に偏りを与える.

家庭の蓄電池容量は 2kW, 4kW, 5kW, 6kW, そして 8kW の 5 種類設定する.

Case 2-2 では, 各家庭の蓄電池は 2kW, 4kW, 5kW, 6kW, そして 8kW の 5 種類の蓄電池を設定し, 各コミュニティが管理する家庭の蓄電池総容量は同じにする.

導入する蓄電池はリチウム電池を想定し, リチウム電池の蓄電池価格は 20 万/kW で耐用年数はおよそ 8 年とされる^{*2}ため, 単位 kW あたりの蓄電池価格を耐用年数で割った値と年間費用として計算する. 従って, リチウム電池の年間費用は 25,000 円となる.

次に, エージェントシミュレーションの詳細設定について以下に示す.

- シミュレーション日数: 365 日
- 家庭エージェント数: 15 (世帯)
- 電力事業所エージェント数: 1
- 電力事業所エージェントの発電計画: 124(kW/日)
- コミュニティエージェント数: 3
- コミュニティに所属する家庭数: 5 (世帯)
- コミュニティの蓄電池容量 (Case 1): 5kW, 10kW, 15kW, 20kW, 25kW, または 30kW
- 家庭エージェントの蓄電池: 2kW, 4kW, 5kW, 6kW, または 8kW

シミュレーションは 1 年間の 365 日で行う. 家庭エージェント数は 15 世帯である. 電力事業所エージェントは 1 件設置する. また, 電力事業所エージェントの発電計画は 1 日に 124kW とする. 発電計画は, 家庭の 1 日の平均的な電力需要は 8.3kW であり, 15 世帯分で 124kW と設定する. コミュニティエージェントの数は 3 件である. コミュニティに所属する家庭数は 5 世帯で固定する. Case 1-1, Case 1-2, Case1-3, Case1-4, Case1-5, 及び Case1-6 のモデルとして, コミュニティの蓄電容量を, それぞれ, 5kW, 10kW, 15kW, 20kW, 25kW, 及び 30kW と設定する. Case 1 は, 1 世帯の蓄電容量が 5kW であるため, コミュニティの蓄電容量を 5kW 間隔で設定している. また, 家庭の蓄電容量は Case 2-2 以外では 5kW で固定する. Case 2-2 の場合は 2kW, 4kW, 5kW, 6kW, 及び 8kW で設定する. 家庭用蓄電池の容量に偏りを与えたときの影響を分析する. ただし, コミュニティに所属する家庭の蓄電容量の和は, どのコミュニティも等しくなるようにする.

6.1 実験結果

本研究では, 石炭火力発電による発電を想定しており, 二酸化炭素の排出量を, 電力事業所の総発電量と比較し考

*2 経済産業省がの蓄電池戦略に関する資料より

察する．図 6 は，電力発電所の総発電量を示したグラフである．図 6 から，Case 0 の家庭と電力事業所が直接電力取引を行う時が最も総発電量が多く，Case 2-6 のコミュニティが 30kW の蓄電池を所有した時が最も総発電量が小さいことが分かる．Case 1 と Case 2 を比較すると，Case 2 の総発電量は，コミュニティの蓄電池容量がおよそ 4 世帯分の規模である Case 1-4 のときと同程度の発電量を示している．Case 1 の蓄電池規模が拡大するに連れて，総発電量が減少していく原因は，コミュニティに設置する蓄電池から供給される電力量が，家庭の電力需要に対してどの程度割り当てられているかに応じて，電力事業所の発電量が変動するからである．従って，蓄電池容量の規模を拡大することで，総発電量は減少する．図 6 の結果から，我々が提案するコミュニティを導入することで，電力系統に蓄電池を設置することなく，二酸化炭素の排出量を低減できる．

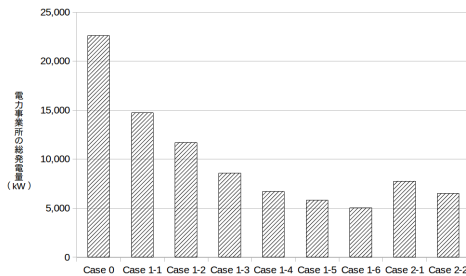


図 6 電力事業所の総発電量 (kW)

次に，電力ネットワークのコストを，電力事業所の損失とコミュニティの損失で示す．電力事業所の損失は，電力の販売量及び買い取り量から計算する．コミュニティの損失は，電力の販売量と買い取り量に加え，蓄電池の導入コストも損失として考慮する．

Case 1 の電力事業コストが負の値を示すのは，電力事業所が利益を得ているためである．Case 1 の特徴として，電力事業所は利益を得ている傾向がある．また，コミュニティコストは，Case 1 の結果を見ると，蓄電池規模が大きくなるに連れて高くなる傾向がある．Case 2 の電力事業所コスト及びコミュニティコストは，家庭別で蓄電容量が異なるときのほうがコストは高くなる．トータルコストを比較すると，Case 2-1 が最小値を示し，Case 1-6 が最大値を示す．また，図 7 にトータルコストをグラフで示す．

図 7 から，Case 0 が最もコストが高く，Case 2-1 のコストが最も低い値を示した．図 7 の結果から，本研究で提案する家庭用蓄電池を共有化するコミュニティを導入した電力マネジメントは，トータルコストを低減することができ，社会的コストの低減にとっての有効性を示した．

しかし，Case 2-1 と Case 2-2 を比較すると，Case 2-2 の損失のほうが高くなる．従って，蓄電池の規模が大きければ電力の購入量が少なくなり，余剰電力の融通機会が増えること示唆する．つまり，家庭の蓄電池規模は，家庭の販

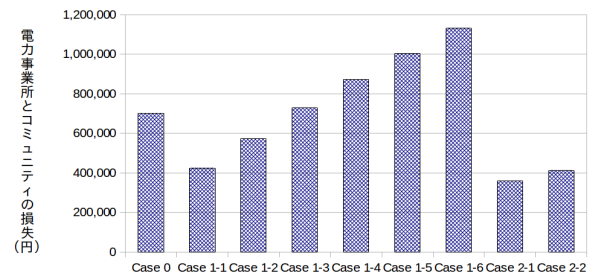


図 7 電力事業所及びコミュニティのトータルコスト

売できる電力量や購入する電力量に影響が出る．家庭用の蓄電池容量の違いにどのような影響が及ぼされるかを，家庭の収支を比較して考察する．

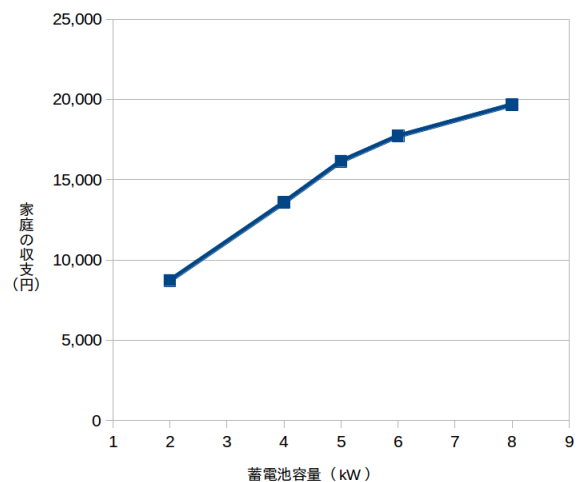


図 8 家庭用蓄電池の規模による家庭の利益の傾向

図 8 は，家庭の蓄電池規模に伴う家庭の利益の傾向を示す散布図である．家庭の損失には蓄電池の導入コストを考慮する．蓄電池の導入コストは，ONE エネルギー株式会社での蓄電池レンタル料金を基準としている [5]．ONE エネルギーが設定する月額料金は，5.53kW の蓄電池に対して，3,045 円である．

図 8 の結果から，蓄電池規模が大きくなるほど家庭の利益は上昇している．しかし，家庭の蓄電規模が大きくなるに連れて，上昇率が逡減していることが分かる．家庭の蓄電池規模が大きくなるほど，上昇率は 0 に近づき，家庭の電力購入量もそれに伴い 0 に近づく．本傾向の理由として，家庭の太陽光発電が蓄電池容量を超えて発電していることが主な原因としてあげられる．容量を超えた発電量は，電力事業所に買い取ってもらうため，結果的に電力事業所の買い取り量が増え，電力事業所とコミュニティのトータルコストが増加する．需要家にとっては蓄電池を拡張することで電力販売の機会が増えるため利益につながるため，容量の大きい蓄電池を使うほど得をする．しかし，図 8 で示す傾向として，利益の上昇率は容量の増加と共に減少するため，ある一定の蓄電容量からは殆ど利益が変わらなく

なる。

Case 2-1 と Case 2-2 の結果からは、家庭の蓄電池に偏りを与えると、全体のネットワークにとっては損失が大きくなる。そのため、ネットワーク全体のコストが増加させないための電力マネジメントモデルが必要である。

以上の結果から、本研究で提案する複数家庭の蓄電池を共有化するためのコミュニティを導入することで、二酸化炭素の排出量を低減することができ、かつ、有効的に余剰電力を利用することができることを示し、有効性を示した。また、家庭用蓄電池の規模が各家庭で異なる場合も、全体のコストが増加しない電力マネジメントモデルが必要である。

7. まとめ

本研究では、再生可能エネルギーの不安定性について蓄電池の利用の他に、コミュニティに基づく電力融通を取り入れた電力ネットワークモデルを提案した。蓄電池の空き容量が多い家庭に対してより多くの電力を配分することによって、発生する余剰電力を有効利用する。また、コミュニティ間の電力融通を活かすために、家庭における電力マネジメントの利用効率を向上させた。家庭では、最適化による蓄電池計画を行い、不確実性に適応するための太陽光発電予測モデルを提案した。実験では、コミュニティ及び電力事業所の2つのトータルコストから電力の効率利用を評価した。また、家庭の蓄電池容量のバラつきによる影響について評価した。実験結果から、提案手法のコミュニティが最も低いコストを示し、再生可能エネルギーの効率的な利用において有用であることを示した。また、蓄電池のバラつきの評価では、コミュニティ及び電力事業所のコストは、バラつきがあると高くなることが分かった。家庭間の利益を比較した時、取引におけるコストが原因で不平等が起こることがわかった。従って、蓄電池容量にバラつきを与えない方が、太陽光発電を効率的に利用できることを示した。

参考文献

- [1] Alam, M., Ramchurn, S. D. and Rogers, A.: Cooperative Energy Exchange for the Efficient Use of Energy and Resources in Remote Communities, *Proceedings of the 2013 International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, AAMAS '13, Richland, SC, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp. 731–738 (2013).
- [2] Alam, M., Rogers, A. and Ramchurn, S.: Interdependent multi-issue negotiation for energy exchange in remote communities, *Twenty-Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-13)*, pp. 25–31 (online), available from <http://eprints.soton.ac.uk/350941/> (2013).
- [3] Association, J. W.: Standard weather data for solar photovoltaics: METPV-11 (in Japanese), New Energy and Industrial Technology Development Organization: Annual hourly sunshine amount DB (2012).

- [4] Kanamori, R., Yoshimura, T., Kawaguchi, S. and Ito, T.: Evaluation of Community-Based Electric Power Market with Agent-Based Simulation, *Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, IEEE/WIC/ACM International Conference on*, Vol. 2, pp. 108–113 (2013).
- [5] One エネルギー株式会社: (2013).
- [6] Sathyanarayana, B. and Heydt, G.: A roadmap for distribution energy management via multiobjective optimization, *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp. 1–8 (2010).
- [7] Voice, T., Vytelingum, P., Ramchurn, S., Rogers, A. and Jennings, N.: Decentralised Control of Micro-Storage in the Smart Grid, *AAAI-11: Twenty-Fifth Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1421–1426 (2011).
- [8] Vytelingum, P., Voice, T. D., Ramchurn, S. D., Rogers, A. and Jennings, N. R.: Agent-based Micro-storage Management for the Smart Grid, *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Volume 1 - Volume 1*, AAMAS '10, Richland, SC, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp. 39–46 (2010).
- [9] Yasir, M., Purvis, Martin K. and Purvis, M. a. S. B.: Agent-based community coordination of local energy distribution, *AI & SOCIETY*, pp. 1–13 (2013).
- [10] 畑中健志, 藤田政之: Distributed Cooperative Multi-agent Optimization and Potential Game for Systems Science and Technology, *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 51, No. 1, pp. 49–54 (2012).
- [11] 谷口忠大, 高木圭太, 榎原一紀, 西川郁子: 地産地消型電力ネットワークの為に Natural Actor-Critic を用いた自動取引エージェントの構築, *日本知能情報ファジィ学会ファジィシステムシンポジウム 講演論文集*, Vol. 25, pp. 229–229 (2009).