

電力分け合いサービスの MAS モデルの設計と基礎評価

Design and Preliminary Evaluations of Multi-Agent Simulation Model for Electric Power Sharing among Households

西村 康孝^{*1}
Yasutaka Nishimura

志村 泰知^{*2}
Taichi Shimura

和泉 潔^{*3}
Kiyoshi Izumi

吉原 貴仁^{*1}
Kiyohito Yoshihara

^{*1} KDDI 総合研究所
KDDI Research Inc.

^{*2} 構造計画研究所
Kozo Keikaku Engineering Inc.

^{*3} 東京大学
The University of Tokyo

Abstract: Electric power sharing among households based on bidding method is studied as a future service. In order to verify the feasibility of the service, we newly designed a multi-agent simulation model. We validate this model through preliminary evaluations. For example, it is confirmed that the market price in this service stably changes according to the supply and demand balance between sold bid volume and purchased bid volume. In addition to that, results of household income and contract rate of this service showed that the design for bid strategies works as intended.

1. はじめに

太陽光発電(以下, PV)の余剰電力買取制度(以下, FIT)で設定された 10 年間の買取義務保証期間が終了する世帯(以下, 卒 FIT 世帯)が 2019 年から登場し始める. FIT 期間中は PV 発電量の内, 宅内消費で余った余剰電力は固定単価での買取が保証されていた. 10 年間保証される固定単価は 2009 年開始世帯の 48 円/kWh から年々低価格に推移し, 2018 年開始世帯は 26 円/kWh であった. 卒 FIT 世帯の余剰電力の買取単価は保証されていた固定単価から大きく低下すると言われており, いくつかの小売電気事業者から発表されている卒 FIT 世帯向け新買取サービスの水準は約 10 円/kWh である. このため, 卒 FIT 世帯の余剰電力の価値を高める手段として, 蓄電池導入による自家消費の促進や, 余剰電力を他世帯へ売電する電力分け合い[井上 11]などが検討されている.

電力分け合いでは, 余剰電力を小売電気事業者の買取単価より高く他世帯へ売電できると得をする. PV を保有していない世帯も, 宅内消費する電力を小売電気事業者からの買電単価より安く他世帯から買電できると得をする. 余剰電力の総量と宅内消費の総量は常には一致しないため, 売買相手を決定する取引方法が必要になる. 取引方法には日本卸電力取引所(以下, JEPX)で発電事業者と小売電気事業者との売買で用いられている入札方式などがある.

電力分け合いは既存サービスがほとんどなく, 世帯と小売電気事業者の利益や市場価格の安定性, 市場成立に必要なサービス加入世帯数など, サービスの実現性検証が課題である. しかしながら, 入札を想定した電力分け合いは, 世帯の入札行動が天気や季節などの環境により変化し, 他世帯の入札と相互作用する複雑系であり検証が困難であった. このような複雑系の解析には MAS(Multi-Agent Simulation)[和泉 17]が有望である. そこで本稿では, 電力分け合いの実現性検証のための電力分け合い MAS モデルを設計し, 基礎評価を通してモデルの妥当性を確認する.

2. 関連研究

電力・エネルギー分野への MAS の主な応用事例として, 電力市場と送配電システムに関する新制度を, 安定性や効率性, 有効性などの観点から評価検証する研究がある. 電力市場に関しては, 国内外の多くの研究でエージェントシミュレーションが使われ[渡邊 03][Ullah 13], 既に米国ではエージェントベースの大規模な電

力市場テストベッド AMES が構築されて電力市場制度の評価検証で利用されている[Sun 07]. 送配電システムに関して, 実際の宅内消費データや発電データを用いて電力消費エージェントの挙動を決定しスマートグリッドシステムの効率性を評価検証した研究[Vytelingum 10]がある. また, 世帯や企業, 小売電気事業者が入札方式で参加する電力市場を想定し, 分散した小規模な電力市場により電力価格と配電ネットワークを創発的に構築する新たな電力流通システムの有効性を分析する研究[井上 11]などがある.

以上のように, 入札方式による世帯間の電力売買を想定した MAS の応用事例は多くは知られていない. [井上 11]の研究では想定は類似しているが, 主な目的は電力流通システムの評価検証であった. 本稿では, 電力分け合いサービスの実現性検証を目的とし, 利益追求や再エネ由来の電力を使いたいエコ志向など, 世帯の異なる考え方をモデル化したり, 世帯利益を評価したりするなど, サービス観点での評価検証を重視する MAS モデルを設計する.

3. 電力分け合いサービス

3.1 サービス概要

世帯間で入札を通して電力を売買する. PV, 定置用蓄電池, EV(Electric Vehicle)の内 1 つ以上保有する世帯が電力分け合いで売り手になれる. PV 保有世帯は PV 発電量から宅内消費量を引いた余剰電力を売電できる. PV に加えて, 定置用蓄電池や EV などの蓄電池を保有する世帯は, 余剰電力を蓄電して好きなタイミングに売電することもできる. 蓄電池のみを保有する世帯は, 夜間に小売電気事業者から買電した電力を蓄電し, 昼間に売電することができる.

全世帯が電力分け合いで買い手になれる. 宅内消費する電力を他世帯から買電できる.

3.2 想定環境

(1) 小売電気事業者との契約

PV 発電が無い夜間など, 電力分け合いだけで各世帯の宅内消費を賄うことはできない点を考慮して, 各世帯は電力分け合いサービスに加えて, 従来の買電を小売電気事業者と契約していることを想定する. また, 入札により全ての売電入札が約定しない点を考慮して, 売り手になれる世帯は小売電気事業者の定価買取を契約していることを想定する.

連絡先: 西村 康孝, KDDI 総合研究所, 埼玉県ふじみ野市
大原 2-1-15, yu-nishimura@kddi-research.jp

(2) 電力分け合いに対する世帯の考え方

利益追求, エコ志向, 無関心の 3 つを想定する. 利益追求は電力分け合いを通じた利益増を追求する. エコ志向は電力分け合いを通し, 小売電気事業者との定価売買と比較して損をしない範囲で, 自世帯の宅内消費電力に占める再エネ由来電力の比率向上を志向する. 無関心は小売電気事業者との定価売買と比較して損をしない範囲であれば満足し, 利益増や再エネ由来電力の比率の向上に関心が低い.

(3) 約定方式

約定方式として, JEPX のスポット市場などで用いられているブラインド・シングルプライスオークションを想定する.

(4) 電力の流れ

電力分け合いの売買取引と合わせて電力も世帯間で直接流す方法と, 既存の電力の流れは変えず, 売買取引のみ仮想的に世帯間で実施する方法が考えられる. 前者は既存の電力インフラに大規模な改修が必要になるため, 広範囲な電力分け合いを想定すると非現実的である. 本稿では後者を想定する.

3.3 取引イメージ

30 分を 1 コマとした 1 日 48 コマについて電力分け合いの売買取引を実施する. 各コマはコマ ID(1~48)で表す. 約定した世帯間では, 約定価格で電力を売買する. 約定しなかった世帯は, 小売電気事業者と定価で電力を売買する.

ある日のコマ ID=20(9:30 から 10:00 のコマ)を例に, 入札から約定までの流れを図 1 に示す. 売電世帯 S1, S2 と買電世帯 B1, B2 はコマ ID=20 が始まる 9:30 より前に入札価格を決定する(図 1(1)). 各世帯の入札量は 9:30 から 10:00 の PV 発電や宅内消費の実績に基づき事後に確定する(図 1(2)). 入札価格と入札量の情報を突き合わせて約定計算する(図 1(3)). ブラインド・シングルプライスオークションの価格優先の原理に基づき, 売電世帯 S1 の売電入札 10kWh と買電世帯 B1 の買電入札 10kWh が約定する. 残った売電世帯 S2 の売電入札と, 買電世帯 B2 の買電入札は, 入札価格が合致しないため約定しない. 売電世帯 S2 の入札量 10kWh は小売電気事業者が定価で買い取る. 買電世帯 B2 の入札量 5kWh は小売電気事業者から買電単価で買電する.

4. 電力分け合い MAS モデルの設計

電力分け合いサービスとその取引を模擬する電力分け合い MAS モデルを設計する. モデルは世帯エージェントと小売電気事業者エージェントから構成する.

4.1 世帯エージェント

世帯エージェントの属性情報として, 保有設備, 小売電気事業者との契約情報, 入札戦略を設定できる.

(1) 保有設備

PV や定置用蓄電池, EV の有無を設定する. 有りの場合は, PV の定格出力値[kW]や蓄電池の蓄電容量[kWh]などの保有設備のスペック情報を合わせて設定する.

(2) 小売電気事業者との契約情報

小売電気事業者からの買電単価[kWh/円]と, 小売電気事業者の買取単価[kWh/円]の情報を設定する. これらの単価はコマ毎に設定でき, 時間帯に依らず固定値としたり, 日中と夜間で異なる単価としたりすることができる.

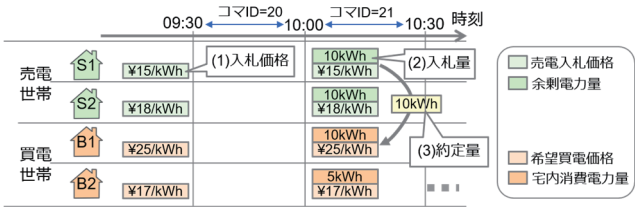


図 1: 入札と約定の処理イメージ(コマ ID=20 の場合)

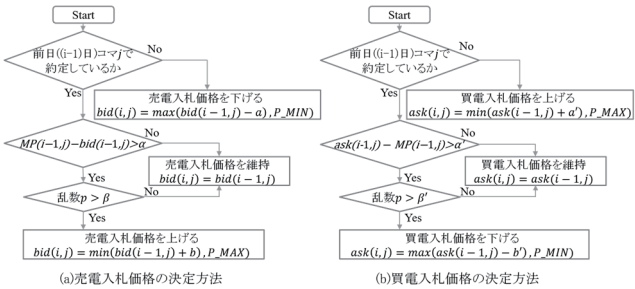


図 2: 利益追求戦略の入札価格の決定方法

(3) 入札戦略

電力分け合いに対する世帯の考え方に対応する入札戦略として, 利益追求, エコ志向, 無関心の中から 1 つを選択する. 選択した入札戦略に応じて世帯は入札価格を決定する. 小売電気事業者からの買電単価より高い買電入札価格や, 小売電気事業者の買取単価より安い売電入札価格は非合理的であるため, 全入札戦略に共通して, 入札価格の上限 P_MAX は小売電気事業者からの買電単価, 下限 P_MIN は小売電気事業者の買取単価とする.

利益追求戦略は, 過去の約定結果と市場価格に基づいて, 適宜入札価格を変更する. i 日のコマ ID = j ($j = 1, 2, \dots, 48$)において, ある世帯の売電入札価格 $bid(i, j)$ は, 前日 $((i - 1)$ 日)のコマ ID = j における同世帯の売電入札価格 $bid(i - 1, j)$ と, そのコマの市場価格 $MP(i - 1, j)$, 同世帯の約定結果の 3 点の情報により図 2(a)の通り算出する. 前日同コマで約定していない場合は, 入札し易くなるよう入札価格をパラメータ a [円/kWh] 下げる. 前日同コマで約定している場合, 市場価格と前日同コマの入札価格の差が閾値 α 以下の場合は, 入札価格を上げると約定しなくなる可能性が比較的高いため入札価格を維持する. 一方, 閾値 α より大きい場合は, 乱数 p ($0 \sim 1$) を用いて $p > \text{閾値}\beta$ の場合に確率的に入札価格を b [円/kWh] 上げて利益増加を図る. ここで, a, b, α, β は 0 以上の実数のパラメータである.

利益追求戦略の買電入札価格も同様に変更する. i 日のコマ ID = j において, ある世帯の買電入札価格 $ask(i, j)$ は前日 $((i - 1)$ 日)のコマ ID = j の同世帯の買電入札価格 $ask(i - 1, j)$ と, そのコマの市場価格 $MP(i - 1, j)$, 同世帯の約定結果により図 2(b)の通り算出する. 前日同コマで約定していない場合は, 入札し易くなるよう入札価格をパラメータ a' [円/kWh] 上げる. 前日同コマで約定している場合, 市場価格と前日同コマの入札価格の差が閾値 α' 以下の場合は, 入札価格を下げると約定しなくなる可能性が比較的高いため入札価格を維持する. 一方, 閾値 α' より大きい場合は, 乱数 p ($0 \sim 1$) を用いて $p > \text{閾値}\beta'$ の場合に確率的に入札価格を b' [円/kWh] 下げて利益増加を図る. ここで, a', b', α', β' は 0 以上の実数のパラメータである.

エコ志向戦略は約定率を高めるため, 常に成り行き注文を実行する. 無関心戦略は常に同じ入札価格での入札を実行する.

なお, 各世帯の入札価格の初期値は小売電気事業者からの買電単価と小売電気事業者の買取単価との間の一様分布で与える.

(4) 世帯エージェントの動作

各コマでの宅内消費電力やPV 発電量から売電と買電のポジションが決定する。ポジション決定後、入札戦略に基づいて入札価格を算出して入札する。

4.2 事業者エージェント

事業者エージェントは世帯の売買入札を集約し、約定計算を実施して約定結果を当該世帯エージェントに通知する。市場価格の情報は全世帯エージェントに公開する。約定結果に応じて電力分け合いの売買と小売電気事業者との売買を集計し、買電による世帯支出と売電による世帯収入を計算する。

5. 電力分け合い MAS モデルの基礎評価

5.1 評価方針

電力分け合いサービスの実現性検証に電力分け合い MAS モデルを活用することを目標に、基礎評価を通して同モデルの妥当性を確認する。具体的には以下の2点を確認する。

- 電力分け合いの市場価格が売電入札量と買電入札量の需給バランスに応じて安定的に形成される点
- 利益追求やエコ志向、無関心の入札戦略毎の世帯利益や約定率が設計(4.1 章(3))通りになる点

5.2 評価指標

市場価格推移と需給バランス、世帯利益、約定率を評価指標に用いる。市場価格は各コマでの買電入札と売電入札を突き合わせて約定計算により算出される。需給バランスは(売電入札量[kWh]/買電入札量[kWh])で計算する。夜間は0 になり、日中はPV 発電量の増加に伴い増加する。

世帯利益については、小売電気事業者と電力売買した場合の収支を起点とし、電力分け合いにより得た金額として集計する。これより世帯利益は0 円以上になる。電力分け合いによる売買が無い世帯の利益は0 円になる。電力分け合いにより、小売り電気事業者からの買電単価や、買取単価と比較して得する価格で売電できると世帯利益が0 円より大きくなる。約定率は約定量[kWh]/入札量[kWh]として集計する。

5.3 入力データ

宅内消費電力データの例を図3 に示す。ある電気サービスの宅内消費電力データを基に統計的に加工して作成した。平日は起床後(コマ ID=15~17(7 時~8 時 30 分))にピークがあり、外出後(コマ ID=18(8 時 30 分~9 時))以降に宅内消費が低下するのに対し、土日祝日は起床時間が平日と比較して遅い点や日中も宅内消費電力が平日と比較して高い傾向など、平日と土日祝日の宅内消費パターンの違いを模擬している。

PV 発電量データの例を図4 に示す。PV 発電量データは東京都の7 月1 日~7 月31 日を対象とし、日の出と日の入りの時間や太陽高度の情報をを用いて数値シミュレーションで作成した。PV の定格出力は一般的な水準である4kW とし、夏至の正午をピークに、その他の日や時間帯は太陽高度に応じて減少する形で作成した。PV 発電量への天候や日照量、発電ロスの反映は今後の課題である。

5.4 評価条件

基礎評価のための評価条件を表1 に示す。シミュレーション期間は7 月1 日~7 月31 日の1 か月間で世帯数は10,000 世帯とする。小売電気事業者からの買電単価は26 円/kWh、小売電気事業者の買取単価は5 円/kWh とする。これらの単価は1 日48 コマ共通の固定値とする。

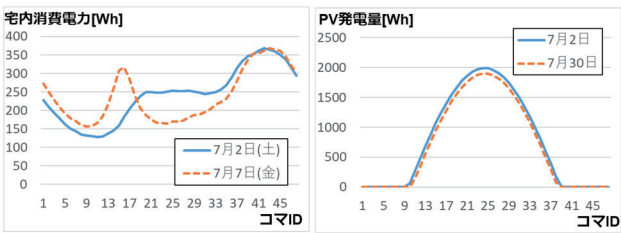


図3：宅内消費電力データ

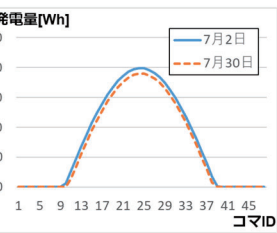


図4：PV 発電量データ

表1：評価条件

シミュレーション期間	7 月 1 日~7 月 31 日
世帯数	10,000
小売電気事業者からの買電単価	26 円/kWh
小売電気事業者の買取単価	5 円/kWh
PV 保有率	2%, 10%, 20%
入札戦略の比率 (利益追求：エコ志向：無関心)	10:10:80

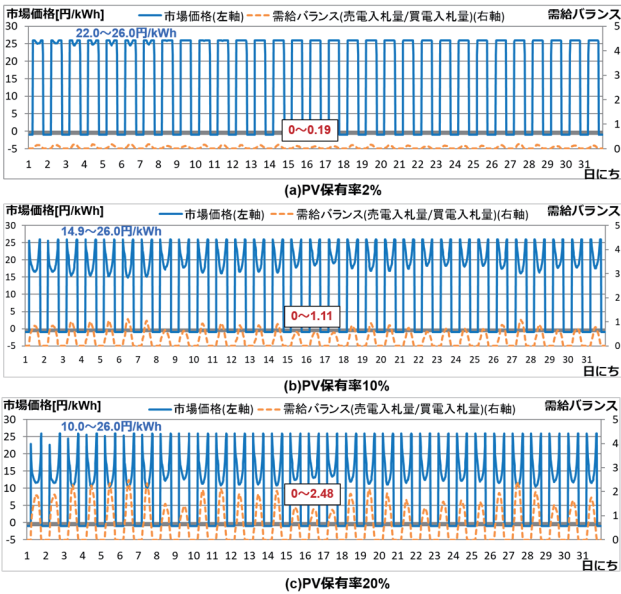


図5：コマ毎の市場価格推移と需給バランス

入札戦略の比率は、利益追求戦略、エコ指向戦略、無関心戦略を10:10:80 とする。PV 保有率2%、10%、20%の3 通りについて、需給バランスが異なる場合の市場価格推移や世帯利益の変化を見る。定置用蓄電池やEV の保有率は0%とする。

利益追求戦略のパラメータについて、 $a = 1$ 円/kWh、 $b = 1$ 円/kWh、 $\alpha = 3$ 円/kWh、 $\beta = 0.3$ 。 $a' = 1$ 円/kWh、 $b' = 1$ 円/kWh、 $\alpha' = 3$ 円/kWh、 $\beta' = 0.3$ とする。

5.5 市場価格推移と需給バランス

PV 保有率が2%、10%、20%の場合の1 か月間のコマ毎の市場価格推移と需給バランスを図5(a)(b)(c)にそれぞれ示す。約定しなかったコマの市場価格は便宜上1 円/kWh としている。PV 保有率に依らず、PV 発電が無い夜間は需給バランスが0 で約定していない。一方、PV 発電が有る日の出5 時30 分頃から日の入り18 時頃の間は、需給バランスが0 より大きくなり、約定していることが分かる。

PV 保有率が2%の場合(図5(a))、需給バランスは0~0.19 の範囲で売電入札量は買電入札量に対して高々1/5 と極端に少ない。

市場価格は 22.0～26.0 円/kWh と比較的高い価格帯を推移している。

PV 保有率が 10% の場合(図 5(b)), 需給バランスは 0～1.11 の範囲であり, 売電入札量が買電入札量を上回るコマが出てくる。市場価格は 14.9～26.0 円/kWh と広範囲を推移している。

PV 保有率が 20% の場合(図 5(c)), 需給バランスは 0～2.48 の範囲であり, 売電入札量が買電入札量の 2.48 倍と大きく上回るコマが有る。市場価格は 10.0～26.0 円/kWh と PV10% の時よりも広範囲を推移している。

続いて PV 保有率 20% の場合におけるコマ別の日毎の市場価格推移を図 6 に示す。日の出(コマ ID=11)や日の入り(コマ ID=36)は PV 発電量と需給バランスが共に小さいため, 20 円/kWh 以上の高い市場価格で推移している。その間の時間帯(コマ ID=18, 24, 30)は PV 発電量と需給バランスが共に大きいため, 10～15 円/kWh 程度の市場価格で推移している。

以上のように, 需給バランスが低いと市場価格は高く, 需給バランスが高いと市場価格は低価格帯を推移するなど, 需給バランスに応じて市場価格が形成されている。また, PV 保有率 20% の場合など, 1 日の中で市場価格はコマ ID に応じて 10 円～26 円/kWh のように大きく変動するが, コマ別での日毎の市場価格は安定的に推移している。同じコマで見た場合, 日毎の需給バランスは大きく変わらないことから, 需給バランスにより安定的に価格形成されていると言える。

5.6 世帯利益

売電世帯と買電世帯の入札戦略毎の利益[円/月]の箱ひげグラフを図 7, 図 8 にそれぞれ示す。PV 保有率が 2%, 10%, 20% の全の場合において, 利益追求の利益が最も大きくなっており設計通りの結果になっている。利益追求と無関心について, 利益の最大値と最小値に差異があるが, 利益追求の方が無関心と比較して差異が小さい。この点について, 利益追求は入札価格を市場価格に近づける方向に毎日変更するため, 全世帯に近い入札価格に推移しているためと考えられる。

売電世帯の利益について, PV 保有率が高くなる程小さくなっている。買電世帯の利益については PV 保有率が低くなる程大きくなっている。この点について, PV 保有率が高くなる程, 市場価格が低価格帯に推移している結果(図 5)と合致している。

5.7 約定率

売電世帯と買電世帯の入札戦略毎の約定率を図 9 に示す。PV 保有率 2%, 10%, 20% の全の場合において, エコ志向の約定率が最も大きくなっており, 設計通りの結果になっている。

売電世帯の約定率について, PV 保有率が高くなる程低くなっている。買電世帯の約定率については PV 保有率が低くなる程高くなっている。この点について, PV 保有率が高くなる程, 需給バランスが大きくなる点(図 5)と合致している。

6. まとめ

世帯の余剰電力を世帯間で入札により売買する電力分け合いサービスを対象とした電力分け合い MAS モデルを設計した。基礎評価を通して同モデルの妥当性を確認した。具体的には, 売電入札量と買電入札量の需給バランスに応じて市場価格が安定的に推移していた。また, 入札戦略毎の世帯利益や約定率について, 利益追求戦略の世帯利益が高く, エコ志向戦略の約定率が高くなるなど, 設計通りの結果が得られる点を確認した。

今後は, 入札戦略の比率を変えた場合の評価や, JEPX 市場での価格高騰などの事例を参考に, 異常状態に対する市場価格推移の安定性などを評価する。

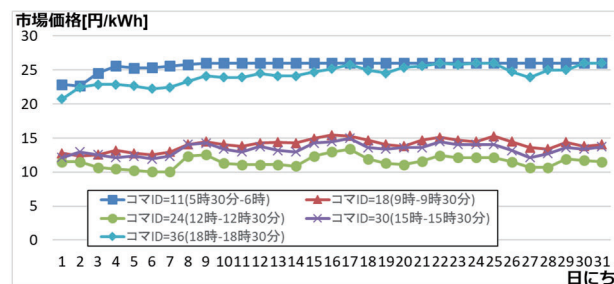


図 6: PV 保有率 20% の場合のコマ別日毎の市場価格推移

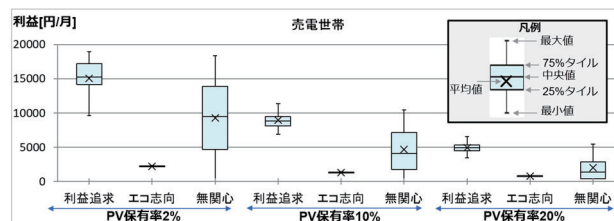


図 7: 入札戦略毎の売電世帯の利益

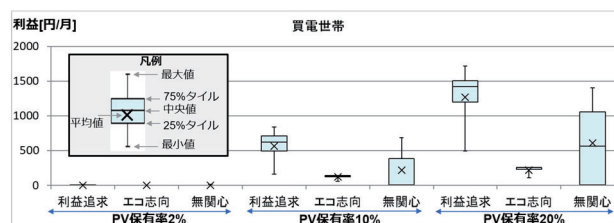


図 8: 入札戦略毎の買電世帯の利益



図 9: 入札戦略毎の約定率

参考文献

- [井上 11] 井上淳, 藤井康正. パケット電力取引に基づく革新的配電システムの提案. 電気学会論文誌 B, Vol. 131, No. 2, pp. 143-150, 2011.
- [和泉 17] 和泉潔, 斎藤 正也, 山田 健太. マルチエージェントのためのデータ解析, コロナ社, 2017.
- [渡邊 03] 渡邊勇, 岡田健司, 栗原郁夫, 永田真幸. 電力市場のシミュレーション—市場シミュレータの開発とエージェントモデルの分析. 電力中央研究所報告, R02022, 2003.
- [Ullah 13] Qudrat-Ullah, H. Energy Policy Modeling in the 21st Century. Springer, 2013.
- [Sun 07] Sun, J. and Tesfatsion, L. Dynamic testing of whole-sale power market designs: An opensource agent-based framework. Computational Economics, Vol. 30, No. 3, pp. 291-327, 2007.
- [Vytelingum 10] Vytelingum, P., Voice, T. D., Ramchurn, S., Rogers, A., and Jennings, N. Agent-based Micro- Storage Management for the Smart Grid. In Proc. Autonomous agents and multiagent systems, pp. 39-46, 2010.