

# エージェントベースゲーミングを用いた 電力市場メカニズムの研究

## A Study of An Electricity Market Mechanism Using Agent-based Gaming

倉橋節也<sup>1\*</sup> Setsuya KURAHASHI

<sup>1</sup> 筑波大学大学院ビジネス科学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Business Sciences, University of Tsukuba

**Abstract:** Two-sided markets can be found in many industries such as online consumer markets. The markets are economic platforms having two user groups of providers and consumers with network benefits. The platforms are in the face of fierce competition to provide attractive services, prices, supplies. The two-sided markets have been researched using mathematical economics models recent years. The model, however, can only deal with one or two players on a market, therefore it has limitations to analyse more various players. On the other hand, many research projects of dynamic pricing and incentive mechanisms have been carried out on power markets. Some of the studies use agent-based modelling to analyse them as autonomous agents and optimised decision making algorithms. These studies have shown interesting results, but they also have limitations to analyse further more complex markets and decision making processes of market players taking managing conditions into consideration. In this study, we adopt Agent-based gaming to analyse them on a two-sided power market.

## 1 はじめに

電力市場で検討されている発送電分離政策は、多様な企業の参入を促す反面、小売自由化などによる市場の不安定性や独占などのリスクを伴う。本研究は、電力市場自由化を踏まえ、効率的市場を実現するとともに、化石エネルギーから再生可能エネルギーへ転換するための競争的電力市場のインセンティブ・メカニズム研究を目的とする。これらを実現するための社会制度および社会基盤を「電力市場プラットフォーム」と呼ぶこととし、コミュニティとしての電力需要者を束ねるアグリゲータと、送配電事業者～発電・小売事業者間で再生可能エネルギーなどの需給調整のために行われるインバランス精算に着目する。エージェント・ベース・ゲーミング手法を用いて、需要家や発電事業者を含めた市場参加者の自由な意思決定を通じて、電力需給調整・安定的供給・再生可能エネルギーの普及などのイノベーションが促進されるインセンティブ設計を目指す。

## 2 背景

理想的な電力市場の姿は、需要家の自由な参加・選択、企業の自由な経済行為によってイノベーションが促進され、自然に全体の電力供給と需要がバランスする集合知としての電力市場である。しかし、震災による電力需給の逼迫は、これまでの電力システムでは、低廉で安全・安定な電力供給を維持できないことを明らかにした。こうした問題を受け、政府は家庭等の小口部門への参入自由化、2018～20年には発送電分離に踏み切ることを明らかにしている。これらの政策は、多様な企業の参入によるイノベーションの進展、再生可能エネルギーの利用拡大をもたらす可能性がある。

参入の自由化は市場を創造し、事業機会、サービスの多様化、料金の低廉化といった恩恵がもたらされることは、通信やインターネット市場の例を見ても明らかである。反面、全てを自由な市場競争に委ねると、取引コストの高い財・サービスが市場で取引されず、所謂市場の失敗が生じる。再生可能エネルギーは自然環境の影響を受けやすく、需給バランスの調整が困難であり、発電コストも高いため、取引コストが高くなる。このため、市場における価格メカニズムに委ねれば、これらの多様な電源の普及が進むとの予想は楽観的すぎる。

---

\*連絡先：筑波大学大学院ビジネス科学研究科  
〒112-0012 東京都文京区大塚 3-29-1  
E-mail: kurahashi.setsuya.gf@u.tsukuba.ac.jp

一方、消費者と供給者の両面性を有する ICT 市場では、価格面・供給面・サービス面で魅力的な世界規模のプラットフォーム競争が行われており、この両面性市場メカニズムが数理モデルで分析されてきた [1, 2]。また、近年エージェントモデリングによるリアルタイムダイナミックプライシングの研究やインセンティブ・メカニズム [3] などの研究も進められている。スマートグリッドにおいては、ユーザと電力会社両方がデマンドサイドに卸売り価格の変動を反映することができるリアルタイムダイナミックプライシングから利益を得ることができることが期待されている [4]。一方では、オークションによる電力価格決定という発想も珍しいものではない。しかし、オークションに参加するデマンドサイドは、太陽光等の再生可能エネルギーをベースとするため、発電量が非常に変動的である [5]。

電力市場を両面性市場として捉えて、社会的厚生を最大化する電力プラットフォームデザインの研究や、単一市場ではなく競争的な複数の電力市場を対象とした研究が求められる。そのような環境下での参入インセンティブを最適化するには、ダイナミカルシステムにおけるメカニズムデザインおよびエージェントベース・ゲーミングのモデルが最適であると考えられる。

一方、ゲーミングの研究においては、シリアスゲームを用いたアプローチが注目されており、社会シミュレーションの会議でもシリアスゲームのセッションが開かれるようになってきている [6][7]。しかし、従来のシリアスゲームのアプローチは、背景となる社会や環境はゲームの設計者によって定義されたものであり、決定論的な性質を持つ場合が多い。現実の社会では、参加する主体は他の主体との相互作用や非線形な過程の中に放り込まれており、複雑適応系の性質を持っている。電力市場は、まさにこのような状況となると予想され、複雑適応系を前提としたゲーミングが必要になる。

消費者と供給者の両面性を有する市場においては、価格面・供給面・サービス面で魅力的な世界規模でのプラットフォーム競争が行われている。この両面性市場メカニズムが数理モデルで分析されてきた。しかし、プレイヤーが 1 ~ 2 までの分析が行われてきたに過ぎず、複数の多様なプレイヤーでの分析は数理モデルでは限界があった。また、ABM によるダイナミックプライシングの研究や、インセンティブメカニズムの研究も進められている。しかし、これらの研究は、エージェントの意思決定がアルゴリズムによって行われているため、実際の環境や市場の動き、経営状態を考慮した複雑な意思決定を分析するには限界があった。本研究では、これらのモデルをベースに、電力市場における両面性市場モデルをエージェントベース・ゲーミングで構築する。従来の数的手法では解くことができなかった複数の競争的な両面性市場メカニズムを対象として、多様な電源での安定供給を実現するためのイン

センティブ・メカニズムの設計を目標とする。現実の電力市場は、複数の卸供給事業者や PPS が競合し、これらプレイヤーも多種多目的であり、単一のインセンティブでは対処できない。そこで、インバランス調整に着目し、多主体のプリンシパル-エージェント問題を包含した両面性市場を記述可能な、インタラクティブなエージェントベース・メカニズムデザインを目指す。

### 3 研究目的

第 1 の研究目的は、電力市場の中で、どのプレイヤーがどのような条件において市場支配力を得るのか、を分析することである。社会的厚生を最大化する電力プラットフォームデザインを実現するために、アグリゲータとインバランス調整に着目する。現在、電力需給調整にかかる市場機能の活用が検討されており、新たに 1 時間前市場・リアルタイム市場を創設し、送配電事業者や発電・小売事業者が最も効率的な調整電源をこれらの市場から調達することが提案されている (経済産業省 2013)。この市場価格を再生可能エネルギーなどのインバランス精算に用いることで、透明性や公平性が確保され、電力市場の効率性や再生可能エネルギーの普及促進に影響を及ぼすことになる (図 1)。市場参加者

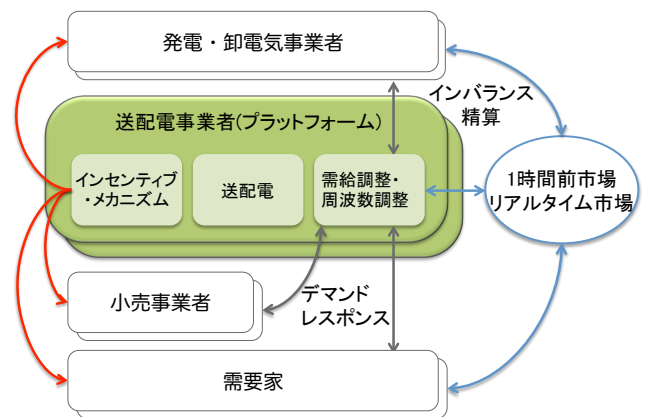


図 1: インバランス精算と電力市場。

は多主体であるのみならず、市場そのものも競争的な複数のプラットフォームであるため、これらは多主体多目的最適化問題となる。このような問題の解法には、需要・供給予測を正直に申告するための多主体のインセンティブ・メカニズムが必要となり、エージェントベース・モデリング (ABM) での取り組みが適切である。一方、電力供給者やアグリゲータの意思決定をマシンエージェントに一任するのでは、アルゴリズムの良し悪しが結果を左右してしまうおそれがある。それに対し、シリアスゲームで用いられてきた人参加型のゲーミング手法は、プレイヤーとしての人がモデルか

ら得られる情報を有機的に結合し勘案することで、実際の意思決定に近い結果が得られる可能性が高い。しかし、従来のシリアスゲームは、背景と成る環境変化が決定論的に決められているため、複雑な電力市場の動きを再現することが難しい。

そこで、本研究では ABM とシリアスゲームを結合させ、複雑適応系としての多主体多目的モデル設計が可能となるエージェントベース・ゲーミング手法を導入し、次の2点で研究を進める。

- 1) エネルギー転換をもたらす市場の構造分析  
これまでの研究 [2] により、既に単一のインターネット両面性市場を事例としたプラットフォーム設計は完了している。これを、事業者が多主体で複数の市場が競争的な関係にあるケースに拡張できるモデルの設計を行う。電力市場における制度設計は、市場支配者の発生に大きな影響を及ぼす。また、再生可能エネルギーへのエネルギー転換に有効な制度設計も重要な目標となる。多様なエネルギー源を活用しながら、エネルギー転換に向かって安定的な電力需給均衡を達成するためのメカニズムデザインは、電力供給者並びに需要家双方の効用を最大化するためのプラットフォームの役割を果たす必要がある。これらの構造を分析するために、エージェントベースモデリングを用いる。
- 2) 意思決定構造の比較分析  
電力需要家・発電事業者を多主体に拡張し、それらの振舞いをマルチエージェントモデルで表現するとともに、人参加型のエージェントベース・ゲーミングを導入することで得られる意思決定の結果を比較分析する。それぞれの異なるエージェントによって達成される違いを解析することで、電力のインバランス調整インセンティブ戦略や政府による補助金支出・税率政策などを評価する。また、対象とする現象を一つの視点ではなく、複数の視点から観察し、それぞれを一つのモデルで正確に表現できるようにする必要があるのである [8]。

## 4 エネルギー転換ゲーミングモデル

エージェントベース・ゲーミングモデルによるエネルギー転換ゲーミングモデル (図 2) では、電力事業者プレイヤーとアグリゲータプレイヤーが参加する電力市場において、電力販売価格、広告投資と、発電設備投資計画によって、電力事業者の意思決定が行われる。販売価格は、送配電事業者との需要・供給におけるインバランス精算によって価格調整が行われる。

一方で、小売プレイヤーと家庭・事業者などつなぐアグリゲータとして、需要家の電力需要を束ねて効果

的にエネルギーマネジメントサービスを提供するメーカー、ブローカー、地方公共団体、非営利団体などが電力市場に参入してくることが予想される。アグリゲータは、デマンド・レスポンスやネガワット事業なども行い、スマートメーターなどを利用した先進的なエネルギー管理システムによる、さまざまなサービスを提供することが見込まれる。その結果、アグリゲータが両面性市場として市場流通を独占し、価格の決定権のみならず、利益配分の決定権を持つ可能性がある。これは、現在における音楽配信やアプリ市場などの IT 市場と同じ構図となり、苛烈な市場競争が発生することとなり、どのような市場制度設計によって、再生可能エネルギーの発達が促され、かつ健全な市場競争が行われるかを研究することが極めて重要となる。

このゲーミングモデルでは、実際の参加者が発電事業者、電力小売、アグリゲータの各プレイヤーとしてゲームに参加するとともに、コンピュータ上のエージェントが多数の需要家エージェントとして自律的に市場に参加する。加えて、政府エージェントが、予め与えられた市場ルールに基いてインバランス精算を行なう。このゲーミングモデルによって、ゲーム参加者はこの市場の複雑性を体験するとともに、市場制度の設計を立案し効果を検証することができる。最終的に、実際の気象データに基づくシミュレーションによって、リアルタイム特性も満足することを検証し、更なる有用性の検証を行うことを検討している。

### 4.1 モデルの概要

ODD プロトコルに従って、モデルの概要を記述する。

#### 4.1.1 Entities

電力供給者、アグリゲータ、政府、消費者をエンティティとする。

#### 4.1.2 State variables

電力供給者 販売価格、大口割引率、投資 ( 広告、火力、原子力、再生エネルギー )、コスト ( 火力、原子力、再生エネルギー )、炭素発生率 ( 火力、原子力、再生エネルギー )、発電量 ( 火力、原子力、再生エネルギー )、事業者魅力度、炭酸ガス発生量、停電発生率

アグリゲータ 販売価格、広告投資、電力購入事業者数、エネルギー比率 ( 火力、原子力、再生エネルギー )

政府 インバランス価格、事業税率、炭素税率、再生エネルギー投資

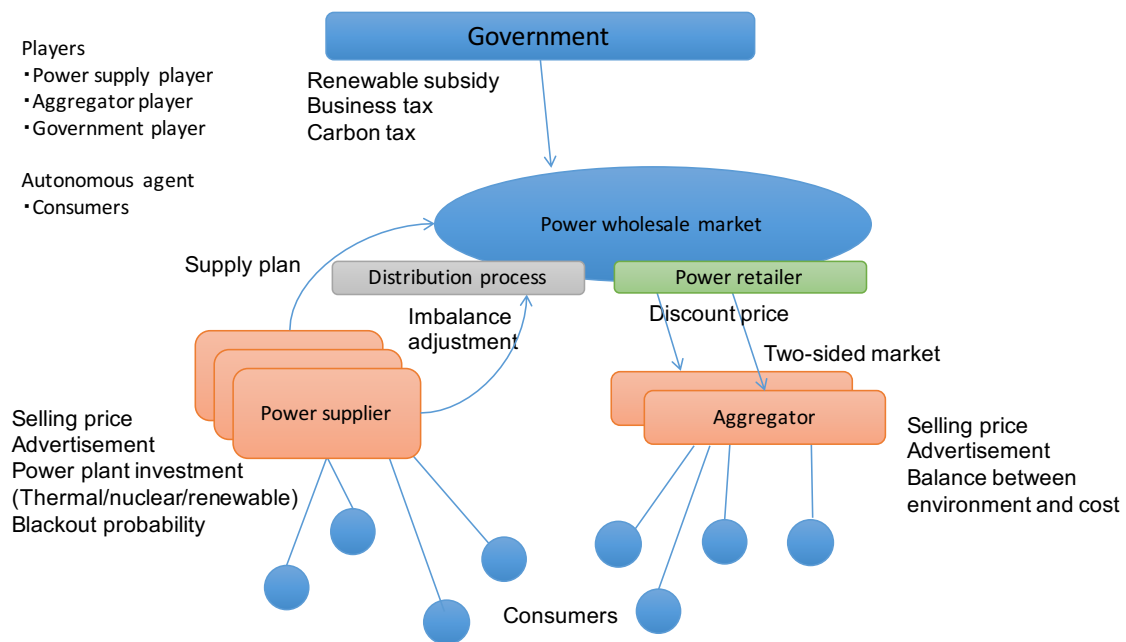


図 2: エネルギー転換ゲーミングモデル.

消費者 規範効果パラメータ、情報効果パラメータ、ネットワーク生成パラメータ、需要家数

#### 4.1.3 Process overview and scheduling

供給者は発電し、消費者およびアグリゲータへ電力を販売する。消費者の環境や価格への意向を考慮しながら、自社の利益を最大化するために火力・原子力・再エネ発電比率、電力料金（一般・大口割引）、広告投資を決定する。再エネ比率が高くなると、停電確率が増加し、インバランス費用を支払うことになる。また、停電確率に比例して自社の競争力が低下する。

アグリゲータは、供給者から大口割引電力を購入し、消費者へ再販する。消費者の環境や価格への意向を考慮しながら、自社の利益を最大化するために火力・原子力・再エネ購入比率と購入価格との意思決定比率、電力料金（一般）、広告投資を決定する。

消費者は各自の電力選好と電力料金を考慮して、適した供給者  $r$  から電力を購入する。消費者はネットワークで知人とつながっており、規範効果を受ける。

政府は、インバランス価格、事業税、炭素税、再エネ補助金を決定する。これによって税収、炭酸ガス発生総量、全体停電確率が決定し、これらを最適にすることが政府の目標となる。

#### 4.1.4 Emergence

プレイヤーによる市場の占有度、近隣ネットワーク上の消費者意思決定、再エネ比率が創発する。

#### 4.1.5 Adaptation

自律モデルでは、供給者・アグリゲータエージェントは自身の利益を最大化するように意思決定を行う。ゲーミングモデルでは、供給者・アグリゲータエージェントは上記に加えて、他の参加者の意思決定を参照しながら、意思決定を行う。あるいは、各自の環境に対する姿勢が反映することもあり得る。政府エージェントは、市場全体で発生する CO2 量を抑えながら、税収を保ち、停電確率を低くするように意思決定する。

#### 4.1.6 Learning

自律モデルでは学習はしない、ゲーミングモデルでは、参加プレイヤーは、チーム内で議論し学習することが期待される。

#### 4.1.7 Interaction

エージェント・プレイヤーは、市場を通して次の点で他の供給者・消費者・政府と相互作用する。消費者

からの受注獲得競争、政府との炭素税を介したCO<sub>2</sub>排出制約、政府との再エネ補助金を介した環境対策、政府とのインバランス調整価格による再エネ制約、消費者との安定供給（停電確率）を介した他社との魅力度競争、アグリゲータとの割引価格を通じた利益確保と受注競争を行う。

#### 4.1.8 Stochasticity

消費者の初期電力選好は、一様分布で確率的に決定し、各期で環境選好が確率的に変化する。消費者の意思決定は、近隣の市場シェアで確率的に決定（規範効果）する。供給者の電力比率は、ベース比率に $\pm 10\%$ の一様乱数で決定する。価格と電力選好の合成魅力度に基いて供給者とアグリゲータをルーレット選択で決定する。再エネ比率に基いて指数関数で停電確率を決定する。

#### 4.1.9 Collectives

消費者の規範効果は、近隣の市場シェアに影響を受ける閾値モデルを採用する。

#### 4.1.10 Observation

消費者ネットワークと市場シェアをグラフィックで観察する。他プレイヤーの意思決定と経営状態、消費者選好をパネルで観察する。毎期の他プレイヤーの意思決定と経営状態、消費者の電力選好をパネルおよびExcelファイルで観察する。

#### 4.1.11 Sub models

ルーレット選択アルゴリズム、規範効果関数、情報効果関数、消費者ネットワークモデル、広告イメージ効果関数、インバランス精算アルゴリズムをサブモデルとする。

## 5 まとめ

本研究は、エージェントベース・モデル、エージェントベース・ゲーミング、電力両面性市場におけるプラットフォーム設計、パターン指向逆シミュレーション、社会ネットワークモデルを研究基盤とし、以下の項目から構成される。1) 新たな制度設計のための電力インバランス調整の特徴分析 2) 競争的電力市場プラットフォームの設計 3) インバランス調整インセンティブ・メカニズムの設計 4) エージェントベース・ゲーミングモデルによるメカニズムデザインの評価・検討これら

によって、人や事業者の意思決定構造を分析することが可能となり、再生可能エネルギーなどの普及を促す社会エコシステムと適応行動に関する有用な知見を得ることを目的とする。

## 参考文献

- [1] K.J.Boudreau, A.Hagiu: Platform rules: multi-sided platforms as regulations, *Platform, Markets and Innovation*, UK (2009)
- [2] 海野, 徐, スマートフォン市場における最適プラットフォーム戦略, 電気学会論文誌 C, Vol. 132, No. 3, pp. 467-476 (2012)
- [3] Bacon,D.F. , et.al.: Predicting Your Own Effort, *International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems (AAMAS'12)*, Vol. 2, pp. 695-702 (2012)
- [4] P .Samadi ,R .Schober and V .W.S.Wong: Optimal energy consumption scheduling using mechanism design for the future smart grid, *2011 IEEE Int . Conf . Smart Grid Communications*, pp. 369-374, Oct (2011)
- [5] 高橋: 北欧から考えるスマートグリッド~再生可能エネルギーと電力市場自由化~, 富士通総研 (FRI) 経済研究所: 研究レポート, No. 366 (2011)
- [6] <http://www.essa2015.org>
- [7] W. Jager, and G. Van Der.V egt, Management of complex systems: towards agent based gaming for policy (2015)
- [8] V. Grimm: Pattern-Oriented Modeling of Agent-Based ComplexSystems: Lessons from Ecology, *Science*, Vol. 310, pp. 987-991 (2005)
- [9] C. Yang, S. Kurahashi, I. Ono, T. Terano: Pattern-Oriented Inverse Simulation for Analyzing Social Problems: Family Strategies in Civil Service Examination in Imperial China, *Advances in Complex Systems*, Vol. 15, Issue 07 (2012)