

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 29 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330356

研究課題名(和文) 逆シミュレーション法による競争的電力市場のインセンティブ・メカニズム研究

研究課題名(英文) Incentive mechanism study of competitive electricity market by inverse simulation method

研究代表者

倉橋 節也 (Kurahashi, Setsuya)

筑波大学・ビジネスサイエンス系・教授

研究者番号：40431663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：再生可能エネルギーを含む多様なエネルギー源を活用して、安定した電力需給均衡を達成するための電力市場メカニズムを設計するために、エージェントと人間がプレイヤーとして参加するエージェントベースゲーミングを提案し、開発を行った。自律的に意思決定する電力需要家(消費者)エージェントと、電力供給者としての人間プレイヤーが投資意思決定行動を行い、それらの意思決定データを分析することで、メカニズムの検証を行った。その結果、消費者のエネルギー志向が、電力供給者の発電投資に大きな影響を与えること、また電力供給者の原子力エネルギーへのリスク認知が高くないことなどが見出された。

研究成果の概要(英文)：In order to design a power market mechanism for achieving a stable power supply and demand balance by utilizing diverse energy sources including renewable energy, we proposed agent-based gaming where agents and humans participate as players. We verified the mechanism by electric power consumer agents who autonomously make decisions and human players as electric power suppliers perform investment decision-making behaviors. As a result, it was found that consumers' energy consciousness has a great influence on electricity supply investment by electric power suppliers, and their power suppliers' risk perception of nuclear energy is not high.

研究分野：社会シミュレーション

キーワード：社会シミュレーション 電力市場 メカニズム・デザイン ゲーミング

1. 研究開始当初の背景

理想的な電力市場の姿は、需要家の自由な電力購入先の選択と供給側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、発送電分離に踏み切ることを明らかにしていた。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。

市場への参入の自由化によって、新たな市場が創造され、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。一方で、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。しかしながら、国内における電力市場研究は、電力自由化の問題を電力供給者側の電力制御問題としてのみ扱い、市場メカニズムとしての取り組みは不十分であった。

2. 研究の目的

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。しかし、電力市場を両面性市場として捉えて(図1)、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はこれまでになく、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ための取り組みは限られていた。そこで、本研究では、社会シミュレーションや社会ネットワークにおけるこれまでの研究成果を基礎に、従来の数理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、デマンドレスポンスを含む需給調整並びに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。そのために、電力の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、多主体多目的エージェントベース・メカニズムデザインを目指すこととした。

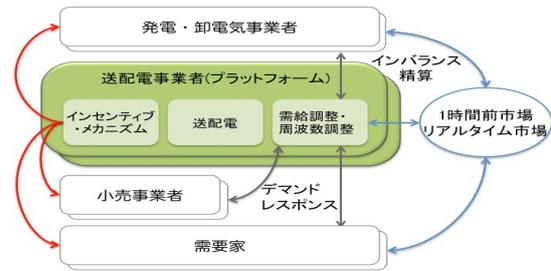


図1 電力両面性市場

3. 研究の方法

研究目的は、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であるが、これを実現するために、電力供給者間の競争と、市場調整メカニズムとしてのインバランス調整に着目した。電力需給調整にかかる市場機能として、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取り組みが行われている。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。

一方で、電力供給者は競争的な多主体であるのみならず、電力需要家も価格と品質に基づく合理的な判断に加えて、規範的な行動をとる多目的な意思決定主体であるため、これらは多主体多目的問題となる。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。そこで、本研究ではABMをベースに、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、電力需給均衡問題と環境配慮行動の基礎的な意思決定メカニズムを分析するために、次の3点で研究を進めた。

1) 多様なエネルギー源を活用して、電力需給均衡を達するためのメカニズムデザインを行った。このメカニズム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ものであり、電力需要家・発電事業者の振舞いをマルチエージェントモデルで表現し、投資意思決定行動として、電力のインバランス調整インセンティブを含めたプラットフォームの構築を行った。

2) マルチエージェントモデルをベースに、人間がプレイヤーとして参加するエージェントベースゲーミングによるメカニズムデザインの評価・検討を行った。自律的に意思決定する多数の電力需要家(消費者)エージェントと、電力供給を行うサプライヤーエージェントおよび参加者プレイヤーによるゲーミング環境を開発し、各プレイヤーの意思決定データを取得し、メカニズムの検証を行った。

3) 国際的な共同研究プロジェクトとして、オランダのフローニンゲン大学と共同で、電力市場ゲームを設計開発し、2カ国での実験を行った。オランダ側の提案により、電力政策を立案執行する与党・野党エージェントを実装し、供給者と需要家に及ぼす影響を含めた実験を行った。

4. 研究成果

1) 電力市場の特徴分析

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。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。

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。

また、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。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。

2) モデル設計

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。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。

市場参加者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点で研究を進めた。

-1. エネルギー転換を促す市場の構造分析
単一のインターネット両面性市場モデル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ようにした。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た。

-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した。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した。

3) 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。

4) モデル概要

<エンティティ>

電力供給者、アグリゲータ、政府、消費者を
<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

<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

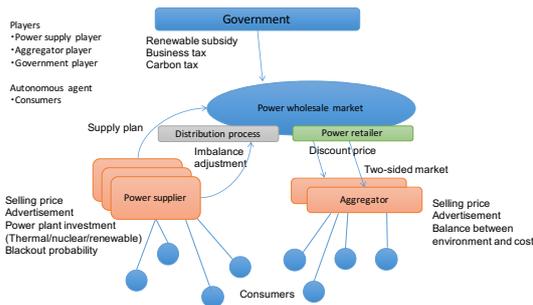


図2 エネルギー転換ゲームモデル

<プロセスとスケジューリング>

供給者は消費者およびアグリゲータへ電力を供給する。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。

<創発現象>

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

<適応行動>

供給者・アグリゲータエージェントは自身の利益を最大にするように意思決定を行う。また、ゲーミングモデルでは、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。

<学習>

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。

<相互作用>

エージェントは、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CO2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。

<確率過程>

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。

<集団効果>

消費者の規範効果は、近隣の市場シェアに影響

響を受ける閾値モデルを採用する。

〈観測〉

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ファイルで観察する。

〈サブモデル〉

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) 結果

電力市場ゲーミングモデルは、エージェントプログラミング環境 NetLogo および HubNet によって実装され、ローカルネットワーク上に接続された各端末から操作される。プレイヤーの画面を図3に、オペレータの画面を図4示す。

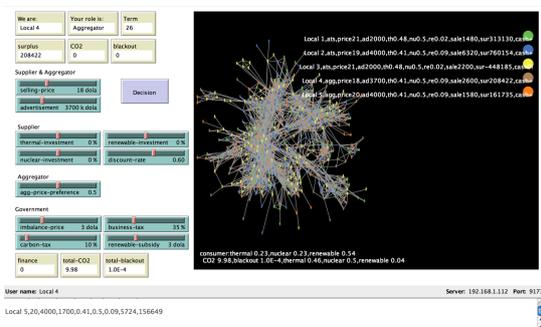


図3 プレイヤーパネル

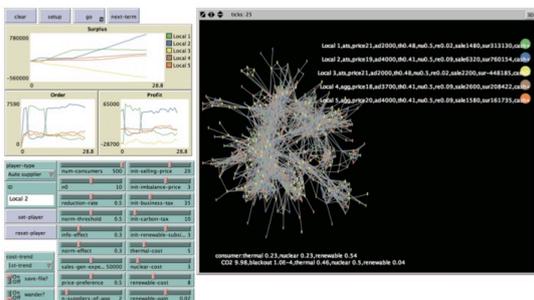


図4 オペレータパネル

どちらの画面からも、ネットワーク上に配置された需要家の状態と供給者の状態が確認できる。需要家は発注先を色によって識別できるため、現在の供給者のシェア状況が直感的に把握できる。供給者の状態は、電力価格や発電設備投資、剰余金などの経営情報が確認できる。供給者プレイヤーは、このプレイヤー画面を通して、電力価格、広告投資、火力発電投資、原子力発電投資、再生エネルギー発電投資、大口顧客への割引率を入力する。アグリゲータプレイヤーは、発注先を決定する意思決定要因として、電力価格、広告投資に加えて、価格とエネルギーソースのウェイトを決定する。実験では、各プレイヤーが18期に渡る意思決定を行った。図5に、

各エネルギーソースの比率とCO2排出量および停電確率の推移を示す。初期には、火力発電の比率が60%を超えていたが、徐々に低下をしていき、最終的には40%以下となった。そのことによって炭酸ガス排出量も減少している(図6)

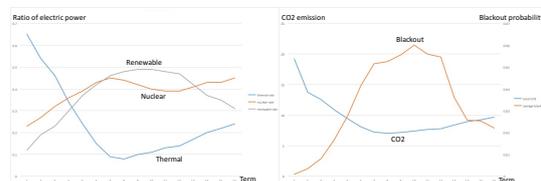


図6 炭酸ガス排出量と停電確率の変化

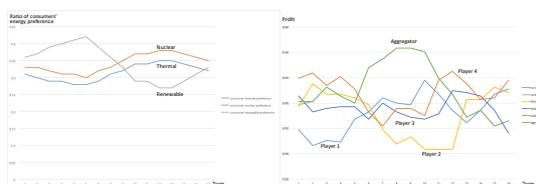


図5 エネルギーソースと営業利益の変化

一方、原子力発電と再生可能エネルギー発電の比率が上昇している。これは、消費者のエネルギー志向性が影響している。特に、再生可能エネルギーは、消費者の志向性に合わせて徐々にその比率を高め、後半からは同じく低下をしている。これは、初期での各電力供給者の発電比率は火力に偏っていたが、消費者のエネルギー志向はそれぞれ1/3程度であり、その比率に合わせて発電投資を変更していくことで受注量が増えるインセンティブが働いたものと考えられる。しかし、当初期待していたような原子力発電比率が減少することは見られず、コストが安く炭酸ガス排出量が低い原子力エネルギーへの依存が継続する結果となった。このことから、電力供給者は、消費者の志向性に連動して、収益を最大にするような経営意思決定を最優先に行い、原子力発電事故へのリスクはほとんど考慮しなかったことが推定できる。この実験により、事故リスクへの考え方は、経営意思決定者としての社会的役割を担った時に、大きく変化する可能性を示唆している。

6) まとめ

本研究は、エージェントベースモデル、シリアスゲーム、電力市場におけるプラットフォーム設計、社会ネットワークモデルを研究基盤とし、以下の項目を目的にモデル構築を行った。

- 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
- 競争的電力市場プラットフォームの設計
- インバランス調整インセンティブ・メカニズムの設計
- 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

実験の結果、電力需要者としての消費者のエネルギー志向が、電力供給者の発電投資に大きな影響を与えること、また原子力エネルギーへのリスク判断が高くないことなどが見出された。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ができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

Takashi Yoshida, Setsuya Kurahashi, "Snowball Sampling Analysis of Viral Marketing Campaigns Targeting Market Mavens", Agent-based Social Systems, Volume 13, pp 189-204, DOI:10.1007/978-4-431-55236-9_14, 2015 (査読有り)

Masaki Tanaka, Setsuya Kurahashi, "An Analysis of Customer Retention Rates by Time Series Data Mining", International Journal of Computer Applications in Technology Vol. 52 No. 2/3, pp. 160-167, DOI: 10.1504/IJCAT.2015.071977, 2015 (査読有り)

Yang, C., Jiang, B., Ono, I., Kurahashi, S., Terano, T., "A grid based simulation environment for agent-based models with vast parameter spaces", Cluster Computing, vol. 19, issue 1, pp 183-195, DOI 10.1007/s10586-015-0500-6, 2015 (査読有り)

Chao Yang, Isao Ono, Setsuya Kurahashi, Bin Jiang, Takao Terano, "A Grid Based Simulation Environment for Parallel Exploring Agent-Based Models with Vast Parameter Spaces", Human Centered Computing, Lecture Notes in Computer Science Volume 8944, 2015, pp 534-548, DOI:10.1007/978-3-319-15554-8_44, 2014 (査読有り)

[学会発表] (計7件)

Setsuya Kurahashi, "A Health Policy Simulation Model of Ebola Haemorrhagic Fever and Zika Fever", 10th International KES Conference on Agents and Multi-agent Systems: Technologies and Applications 2016-07-15(Tenerife, Spain) (査読有り)

Setsuya Kurahashi, Wander Jager, "Agent-based Gaming for Understanding Two-sided Electricity Markets", Proc. of Social Simulation 2016-09-21 (Rome,

Italy) (査読有り)

Morito Hashimoto, Setsuya Kurahashi, "Effect Analysis of Systemic Risk Index in Fund Transaction Networks", Artificial Intelligence of and for Business (AI-Biz 2016) associated with JSAI International Symposia on AI 2016 (JSAI-isAI 2016), 2016-11-14(Yokohama) (査読有り)

Keiichi Ueda, Setsuya Kurahashi, "Self-service technology adoption model with Agent-Based Modeling", Artificial Intelligence of and for Business (AI-Biz 2016) associated with JSAI International Symposia on AI 2016 (JSAI-isAI 2016), 2015-11-14(Yokohama) (査読有り)

Setsuya Kurahashi, Wander Jager, "An Electricity Market Game using Agent-based Gaming Technique for Understanding Energy Transition", Proc. of 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence(ICAART2017), 2017-02-24/26 (Porto, Portugal) (査読有り)

倉橋節也, "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", 第3回人工知能学会:経営課題にAIを!ビジネス・インフォマティクス研究会, 2015.11.12 (査読なし)

倉橋節也, 海野大, "競争的電力市場のインセンティブ・メカニズム研究", 第1回人工知能学会:経営課題にAIを!ビジネス・インフォマティクス研究会, 2014.11.20 (査読なし)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

倉橋 節也 (KURAHASHI, Setsuya)
筑波大学・ビジネスサイエンス系・教授
研究者番号: 40431663

(2) 研究分担者

津田 和彦 (TSUDA, Kazuhiko)
筑波大学・ビジネスサイエンス系・教授
研究者番号: 50302378

(4) 研究協力者

海野 大 (UNNO Masaru)
NTT 東日本