

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月18日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02975

研究課題名(和文) 持続可能システム構築に向けた再生可能エネルギー普及促進策の統合分析

研究課題名(英文) Integrated analysis of renewable energy policy toward development of sustainable systems

研究代表者

高嶋 隆太 (TAKASHIMA, Ryuta)

東京理科大学・理工学部経営工学科・准教授

研究者番号：50401138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：市場均衡モデルにより、社会厚生とエネルギー・環境政策の関係について分析を行った。その結果、各々の政策を個別に考えるときと比較し、政策を選択できる場合の方が社会厚生は高くなることが明らかとなった。また、事業者の行動と再生可能エネルギー普及促進策との関係を分析するためのマルチエージェントシミュレーションモデルを構築した。各々のエージェントが同質である場合、理論競争モデルの結果と一致することが示された。さらに、コンジョイント分析により、エネルギーミックス、電気料金の効用値を算出した。その結果、電気料金が減少した場合、政府が目標としているエネルギーミックスの水準を許容する可能性があることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本では、固定価格買取制度が施行されている一方、非化石電源の比率を44%以上とする目標を掲げるといった混合政策の形式をとっており、本研究の成果において、混合政策と社会的な価値の関係を市場の拡大という観点から明らかにしたことは、学術的のみならず社会的な意義も大きいと考える。また、これらの成果は、トップダウンの理論モデルとボトムアップ的なシミュレーションモデルから同様の結果が得られており、頑健的な結果であることが実証された。また、非化石電源の比率や電気料金に対し、定量的に消費者の効用を算出し同軸で比較できたことは、今後の電力システム改革やエネルギー・環境の施策に示唆を与えた成果であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We examine a relationship between social welfare and energy and environmental policies by means of market equilibrium models. It is found that social welfare for a case in which government chooses from some policies is larger than that for each one. However, the difference becomes small as the damage cost of greenhouse gas emissions increases. We also develop a multi-agent based simulation model, that is, a bottom-up approach in order to analyze an effect of renewable energy policy on agents' behaviors in the market. When the market system has homogeneous agents, the result is consistent with that for theoretical models of a top-down approach. In addition, consumers' utility values for energy-mix and retail electricity prices are estimated by using conjoint analysis. It is shown that the consumers might be able to allow for the energy-mix level of government target. Our work, therefore, contributes to the recent debates to the power system innovation, and energy and environmental policy.

研究分野：エネルギー経済学

キーワード：電力システム改革 エネルギーミックス エネルギー・環境政策 市場均衡 エージェントベースシミュレーション 電源構成モデル リアルオプション コンジョイント分析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景

平成 26 年 4 月に閣議決定されたエネルギー基本計画において、制度改革を通じて多様な主体の参加や多様な選択肢の用意といった柔軟かつ効率的なエネルギー需給構造を目指す施策を講じるとしている。本計画の中で、低炭素な国産エネルギー源である再生可能エネルギーは、以前の目標値よりさらに上回る水準の導入を目指すことが示されている。これまで、様々な再生可能エネルギー普及促進策、再生可能エネルギー割当基準制度 (Renewables Portfolio Standard: RPS)、太陽光発電の余剰電力買取制度、固定価格買取制度 (Feed-in Tariff: FIT) などが講じられているが、2013 年度における水力を除く再生可能エネルギーの発電電力量は全体の 2.2%程となっており、普及促進の更なる施策が必要である。しかしながら、再生可能エネルギーの普及に対して、これから対応すべき様々な課題が存在し、主要な課題として、低コスト化、送電線ネットワーク及び蓄電池の整備、規制や制度の合理化があげられ、今後、これらを解決すべく様々な対応策が必要であると考えられる。特に、「規制や制度の合理化」に関して、平成 26 年 10 月の総合資源エネルギー調査会新エネルギー小委員会において、FIT 制度の見直しについて言及しており、市場メカニズムの活用や他の導入推進策について検討するとしている。すなわち、競争力強化や送電線ネットワークなどの整備の課題に対応するとともに、再生可能エネルギーが長期的に普及するための合理的な制度設計が必要不可欠であるといえる。

(2) 学術的背景

理論競争モデルの研究分野においては、RPS の要求割合や FIT の固定価格水準と市場均衡との関係について分析が行われているが、既存事業者や新規事業者の比率や将来の不確実性、再生可能エネルギーへの投資の影響などは考慮されておらず、これらを含めた分析が必要である。電源構成モデルの研究分野においても、再生可能エネルギー導入の影響については多くの分析が行われてきたが、バックアップ電源のコスト回収の可能性についての研究は、ほとんど行われていない。近年の現状から、再生可能エネルギーと既存電源との構成を一体的に考えることのみならず、市場との関係やバックアップ電源のコスト回収可能性について考える必要があることがわかる。また、電源構成に関しては、再生可能エネルギー電源の配置に伴う送電線ネットワークや、それらの設置や容量も考慮する必要があり、発電設備の配置を一体的に考えるようなモデル、さらには、RPS や FIT 等の普及促進策を考えた上で電源構成を最適化するようなモデルが必要となる。エージェントベースシミュレーションモデルの研究分野においても同様に、多くの研究が行われてきたが、社会経済的な不確実性を考慮し、エージェントである各々の発電事業者が、その不確実性に対し柔軟に対応する問題設定でモデル化は行われておらず、将来の電力市場の拡大と再生可能エネルギー事業者との意思決定の関係を明らかにするためには、そのようなモデル設定が必要である。また、理論競争モデルは、トップダウン的な数理モデルである一方、エージェントベースシミュレーションモデルは、ボトムアップ的なものであり、それぞれ異なるアプローチにより解を導出し、それぞれを比較することは、学術的に意義は高いものであると同時に、普及促進策の評価モデルの検証として重要であると考えられる。

2. 研究の目的

以上の背景より、持続可能な電力システム改革を進展させるためには、パリ協定における温室効果ガス削減の目標値も意識し、将来のエネルギーミックスの動向、それに伴う制度設計を考える必要がある。そこで、本研究課題では、理論競争モデル、シミュレーションモデル、電源構成モデルによる経済・システム分析、エネルギー利用選択分析による統合的な分析・評価を通じて、将来の持続可能な社会システムを目指したエネルギー・環境政策へ示唆を与えるような社会・学術の両面に貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題では、(1)理論競争モデル、(2)エージェントシミュレーションモデル、(3)電源構成モデル、(4)エネルギー利用選択の各項目についてモデル化を行い、分析・評価を行う。また、各項目における計算の効率化を図るため、モデルの大規模化に伴う最適化アルゴリズムの構築を行う。各項目についての実施方法の内容は、以下のとおりである。

(1) 発電事業者が二酸化炭素排出量の削減を行うために、排出量取引 (Cap-and-Trade; C&T) を行う経済分析モデルを構築する。モデル分析から C&T が電力市場へ及ぼす影響について示す。さらに、社会厚生と二酸化炭素排出削減量の観点から C&T と再生可能エネルギー政策のいずれの施策が望ましいかについて考察する。また、自由化が進んだ電力市場において、異なる目的を持つ発電事業者と送電事業者の投資の意思決定を分析する。特に、電力価格、再生可能エネルギー、環境政策など、様々な不確実性の下での投資意思決定に焦点を当てる。

(2) 種々の不確実性下での意思決定ダイナミクス分析を可能とするためのエージェントベースシミュレーションモデルを構築する。不確実性下での再生可能エネルギー普及促進や電力システムの安定供給リスクの観点からシステムの持続可能性に着目し、その評価・分析を実施する。

(3) パリ協定を踏まえたエネルギーミックスの実現が求められており、エネルギーシステムの今後の構築は複雑な制約と不確実性の下での意思決定が求められている。そこで、本項目では、地域分散型エネルギーシステムと大規模集中型システムの協調と競合、資源、環境、市場の様々な不確実性下の多段意思決定システムのモデル分析、電気自動車やスマートグリッド普及の可

能性など新しい技術と制度の影響について電源構成モデル上で分析を行う。

(4) 最新の再生可能エネルギーの賦存量について調査し、整理する。長期的なエネルギーの選択と国民の支払意思額について分析する。また、非化石電源の比率や電気料金に関する効用についてアンケート調査を実施し、コンジョイント分析を行う。

4. 研究成果

(1) 理論競争モデル

再生可能エネルギー普及促進策と市場均衡

本研究では、再生可能エネルギー普及促進策の固定価格買取制度 (Feed-in Tariffs:FIT)、と再生可能エネルギー利用割合基準制度 (Renewables Portfolio Standards:RPS) の経済性比較を行った。特に、市場均衡に対する電力価格、FIT 価格、RPS 要求割合への影響を分析するとともに、既存、再生可能エネルギーそれぞれの企業数の影響について分析を行った。その結果、FIT 制度より RPS 制度における社会厚生が高くなる一方で、その影響は企業数とともに小さくなることが明らかとなった。

排出規制と再生可能エネルギー普及促進策との関係

本研究では、地球温暖化の原因と考えられる温室効果ガスの削減を目的とした政策の比較を行った。RPS 政策と、Cap-and-Trade (C&T) 排出量取引政策、それぞれの混合政策に関する分析モデルを構築した。本モデルにより、それぞれの政策における最適な発電量、電力価格、RPS 要求割合、排出上限割合を決定し、規制水準が市場均衡に対し、どのような影響を与えるかについて分析を行った。さらに、社会厚生最大化を目的として、政策決定者が、どのように規制水準を決定するべきかについてモデル化を行った。その結果、混合政策が最も社会厚生が高く、社会厚生の観点から理論的には最適な政策である一方、二酸化炭素排出については、C&T 排出量取引の方が、より抑えられることが明らかとなった。

(2) エージェントシミュレーションモデル

本研究では、再生可能エネルギー普及促進政策、市場構造、および事業者数の間の関係性がどのように社会厚生に影響を与えるかについて明らかにすることである。ここでは特に、理論モデルとシミュレーションモデルによる統合的な分析のために、強化学習エージェントを用いた電力市場のマルチエージェントシステムを構築した。マルチエージェントシミュレーションでは、個々の事業者ごとに異なる意思決定戦略（例えば、不確実性に対し、柔軟的な意思決定を行う）、属性（発電容量やコスト）、リスク選好（異なるリスク回避度）などを設定することが可能である。このような複雑な設定下での理論解析は一般に困難であり、マルチエージェントシミュレーションを用いることで理論解析を補完することができる。本研究では、これらの発展を目的とし、RPS と FIT における理論モデルの結果に対して、マルチエージェントシミュレーションが、どの程度一致するかについて検証を行った。図1は、それぞれの政策基準と社会厚生の関係を示している。FIT および RPS の両政策に対して、シミュレーションモデルと理論モデルの結果が、ほぼ一致していることがわかる。さらに、それぞれの政策において、社会厚生が最大となる基準が存在することが明らかとなった。これは、4.1.1 における成果と整合的な結果である。

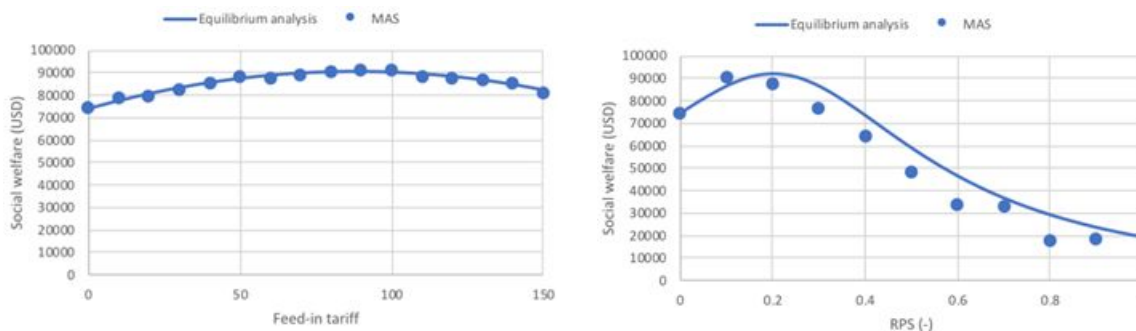


図1 均衡分析結果とシミュレーション分析結果の比較：社会厚生（左：FIT，右：RPS）

(3) 電源構成モデル

天候の不確実性を考慮した電源計画

本研究では、第一段階で天候による太陽光発電の発電量の違いを考慮しながら分散型エネルギーを導入した地域別民生部門の需要家のコスト最小化を目的関数とした最適化プログラムにより評価を行った。第二段階では、第一段階で得た需要家の電力購入量をもとに電気事業者が発電する電力供給量を求め、その供給量を満たすようにコスト最小化を目的関数とし、シミュレーションを行い、電源計画についての評価を行った。天候を考慮することにより、太陽光発電は晴と比較すると曇が0.8倍、雨が0.2倍となり明らかな差が存在することがわかった。また、電力供給においても、電力需要のピーク時間である日中では、晴を基準とした場合冬では曇と雨の需要量が晴の需要量よりも高いことがわかった。シミュレーションでは、天候による

発電方式の違いについて着目した。結果として、需要のピーク時間である日中では曇・雨の場合太陽光発電の発電量が十分ではないことから CO₂ 排出量が少ない発電方式を選択することによって補っていることが示された。また、分散型電源を導入することによって民生部門の電力購入量が減少し、CO₂ を排出する発電方式の発電量の減少に貢献していることが明らかとなった。

中期電源計画運用モデルの構築と評価

本研究では、簿価資産で費用が発生し、実際の設備で発電するという二重構造を正確に解くために設備の選択や導入時期を明示するモデルを構築し、償却年数の変化が低炭素政策に及ぼす影響をコスト面、電源計画画面から評価を行った。法定耐用年数を早めると、電源の新設が早まることをコスト面でも電源計画画面からも確認することができた。また、償却年数が早まることで変動費のみで運転できる期間が長くなるため多少固定費が高くても変動費が安い発電方式を採用しやすくなることも明らかとなった。しかしながら、CO₂ 制約下では法定耐用年数の影響は小さくなる結果となった。選択肢の少なさが原因であれば、2 つの政策の両立は難しい可能性がある。再生可能エネルギーの構成割合が低いことも懸念点である。それに対し、2 つのシナリオを考え評価した。一つ目が、固定費の低減である。2030 年で初期時点に比べ固定費が 70% 低減すると設定した場合に太陽光の構成割合が上昇したことが確認できた。さらに、再生可能エネルギーの償却年数を早めたことで導入量が上がったことは、再生可能エネルギーの導入を促すために技術革新によるコストの低減が経営面からも環境面からも寄与が大きいということを経営上の償却を考慮しても成り立つことを示した。二つ目に、中小規模独立事業者が異なる行動を取ると設定したことである。固定費を低減したとき程ではないとしても太陽光の発電量が増加した。従来、財務上は償却の終わった設備をできる限り長く運転することが有利であり、需要成長が望めない状況下では、新規設備への移行を制約する懸念があったが、本研究の結果は、その上で、法定耐用年数の変更が再生可能エネルギーへの移行を促すことが確認できた。

(4) エネルギー利用選択

小売全面自由化開始から 1 年半経過した中で、先行研究と比較し、消費者の意識に大きな違いは見られず、消費者にとっては電気料金が電力会社の選択において、最も重要な項目であることがわかった。また、再生可能エネルギーや原子力エネルギーの比率に関し、両エネルギー比率とも関心はある一方、月額電気料金が下がれば消費者の効用は高くなるという結果となった(図 2)。現在、日本が目標としているのは 2030 年までに再生可能エネルギー比率 22~24%、原子力エネルギー比率 22~20%である。エネルギーミックスにおいて実現する電気料金はどの程度の水準になるかについては把握できないが、電気料金 10% 減が実現した場合、政府が目標としているエネルギーミックスの水準を許容することが可能であることが示された。個人属性の年齢に関して、原子力エネルギーは年齢とともに意識が高くなる傾向がある一方、再生可能エネルギーは、若年層の意識が比較的高く、年齢とともに減少するといった原子力エネルギーとは逆の傾向になることがわかった。地域別のコンジョイント分析では、東北は、他地域に比べて再生可能エネルギーに対する関心が強いことがわかった。さらに、北海道に関しては、他地域よりも月額電気料金に対する関心が低いことが明らかとなった。

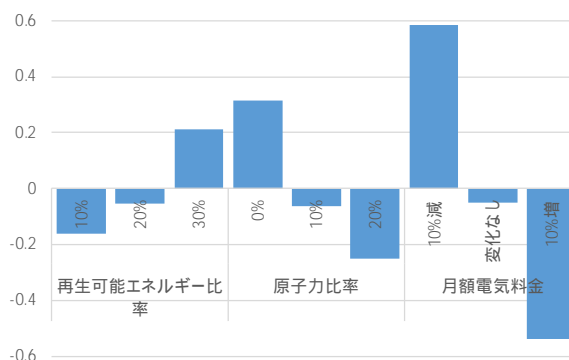


図 2 部分効用値

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 27 件)

- [1] Ryuta Takashima, Investments and Asset Returns in Competitive Equilibrium: An Application to Renewable Energy Policy, Proceeding of 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2018), 査読有, 2018, 953-958 DOI:10.1109/SMC.2018.00169
- [2] Yihsu Chen, Duan Zhang, Ryuta Takashima, Carbon Emission Forensic in the Energy Sector: Is It Worth the Effort?, Energy Policy, 査読有, Vol.128, 2019, 868-878 DOI:10.1016/j.enpol.2019.01.050
- [3] Masaaki Suzuki, Mari Ito, Ryuta Takashima, Evaluating Renewable Energy Policies Using a Multi-agent Reinforcement Learning Model, Proceeding of 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2018), 査読有, 2018, 959-963 DOI:10.1109/SMC.2018.00170
- [4] Mari Ito, Ryuta Takashima, Market Power in Emissions Trading and Renewable Energy Policy, Proceedings of the 8th International Conference on Operations Research and

Enterprise Systems, 査読有, 2019

DOI:10.5220/0007470304290434

- [5] Duan Zhang, Yihsu Chen, Makoto Tanaka, On the Effectiveness of Tradable Performance-based Standards, Energy Economics, 査読有, Vol.74, 2018, 456-469
DOI:10.1016/j.eneco.2018.06.012
- [6] Shunsuke Mori, Yuya Makishita, Kazuhisa Kamegai, Two-Stage Approach for the Assessment of Photovoltaic and Cogeneration Systems: Integration of Regional Distributed Energy Systems and Power-Expansion Planning, Journal of Energy Engineering, 査読有, Vol.143, 2017, F4016005
DOI:10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000370
- [7] Makoto Goto, Katsumasa Nishide, Ryuta Takashima, Leaders, Followers, and Equity Risk Premium in Booms and Busts, Journal of Banking & Finance, 査読有, Vol.81, 2017, 207-220
DOI:10.1016/j.jbankfin.2016.08.010
- [8] Makoto Tanaka, Ryuta Takashima, Shunsuke Mori, Tatsuo Oyama, Special Issue on Developing Sustainable Energy and Environmental Systems in Japan: Energy Crisis and Challenges, Journal of Energy Engineering, 査読有, Vol.143, 2017
DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000457
- [9] Shunsuke Mori, A New Approach of Carbon Emission Allocation among Stakeholders: An Expansion of Multiregional and Multisectoral Dynamic Energy-Economic Model THERESIA, Journal of Economic Structures, 査読有, Vol.5, 2016
10.1186/s40008-016-0036-9
- [10] Afzal Siddiqui, Makoto Tanaka, Yihsu Chen, Are Targets for Renewable Portfolio Standards Too Low? The Impact of Market Structure on Energy Policy, European Journal of Operational Research, 査読有, Vol.250, 2016, 328-341
10.1016/j.ejor.2015.10.063

他 17 件

〔学会発表〕(計 97 件)

- [1] Mari Ito, Ryuta Takashima, Market Power in Policy Mix: Cap-and-trade and Renewable Portfolio Standards, INFORMS Annual Meeting 2018 (国際学会), 2018
- [2] Masaaki Suzuki, Mari Ito, Ryuta Takashima, Multiagent Simulation with Reinforcement Learning Agents for Integrative Evaluation of Renewable Energy Policies, INFORMS Annual Meeting 2018 (国際学会), 2018
- [3] Kazuya Ito, Makoto Tanaka, Ryuta Takashima, Investment in Power Generation and Transmission: The Effect of Capacity Size and Expansion, INFORMS Annual Meeting 2018 (国際学会), 2018
- [4] Mari Ito, Ryuta Takashima, Interactions of Emissions Trading and Renewable Energy Policy, INFORMS International Conference 2018 (国際学会), 2018
- [5] Masaaki Suzuki, Mari Ito, Ryuta Takashima, Evaluating Renewable Energy Policies from Social Welfare Aspect using Reinforcement Learning Agents, INFORMS International Conference 2018 (国際学会), 2018
- [6] Kazuya Ito, Ryuta Takashima, Makoto Tanaka, Investments in Power Generation and Transmission: The Effect of Capacity Procurement, INFORMS International Conference 2018 (国際学会), 2018
- [7] Shunsuke Mori, Some Expansions of the Integrated Assessment Model Formulation --Lessons and Proposals from ICA-RUS Project, INFORMS International Conference 2018 (国際学会), 2018
- [8] Kazuya Ito, Ryuta Takashima, Makoto Tanaka, Investments in Power Generation and Transmission: The Effect of Capacity Procurement, INFORMS Annual Meeting 2017 (国際学会), 2017
- [9] Afzal Siddiqui, Ryuta Takashima, Bouncing Back: Assessing the Resilience of Infrastructure Projects and the Use of Average Outage Factors, 21st Annual International Real Options Conference (国際学会), 2017
- [10] Mari Ito, Ryuta Takashima, Makoto Tanaka, Yihsu Chen, The Influence of Market Structure on Renewable Energy Policies from Social Welfare Aspect, 1st International Conference on Energy Research and Social Science (国際学会), 2017

他 87 件

〔図書〕(計 4 件)

- [1] 田中誠, 高嶋隆太, 鳥海重喜, 朝倉書店, エネルギー・リスクマネジメントの数理モデル, 2018, 176
- [2] 新澤秀則, 森俊介編著, 著者 8 名, 岩波書店, 「エネルギー転換をどう進めるか」シリー

ズ環境政策の新地平 3, 2015, 189(1-54)
他 2 件

[その他]

(1) 受賞

- 伊藤和哉, 高嶋隆太, 日本リアルオプション学会 2016 年研究発表奨励賞

(2) 本研究課題関連特別号

- Guest Editor: Makoto Tanaka, Ryuta Takashima, Shunsuke Mori, Tatsuo Oyama, Special Issue on Developing Sustainable Energy and Environmental Systems in Japan: Energy Crisis and Challenges, Journal of Energy Engineering, 2017

(3) 本研究課題関連特別セッション

- Invited Session: Sustainable Energy and Environmental Policy, INFORMS International Conference 2018, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan (17-20 June 2018)
- Invited Session: OR Application in Policy Study and Environment Analysis, INFORMS Annual Meeting 2017, George R. Brown Convention Center, Houston, USA (22-25 October 2017)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 森 俊介

部局名: 理工学部経営工学科

ローマ字氏名: (MORI, Shunsuke)

職名: 助教

所属研究機関名: 東京理科大学

研究者番号 (8 桁): 10431842

部局名: 理工学部経営工学科

研究分担者氏名: 田中 未来

職名: 教授

ローマ字氏名: (TANAKA, Mirai)

研究者番号 (8 桁): 80147503

所属研究機関名: 統計数理研究所

研究分担者氏名: 田中 誠

部局名: 数理・推論研究系

ローマ字氏名: (TANAKA, Makoto)

職名: 助教

所属研究機関名: 政策研究大学院大学

研究者番号 (8 桁): 40737053

部局名: 政策研究科

職名: 教授

研究分担者氏名: 伊藤 真理

研究者番号 (8 桁): 10377137

ローマ字氏名: (ITO, Mari)

所属研究機関名: 東京理科大学

研究分担者氏名: 鳥海 重喜

部局名: 理工学部経営工学科

ローマ字氏名: (TORIUMI, Shigeki)

職名: 助教

所属研究機関名: 中央大学

研究者番号 (8 桁): 20778211

部局名: 理工学部

職名: 准教授

研究分担者氏名: 桐山 恵理子

研究者番号 (8 桁): 60455441

ローマ字氏名: (KIRIYAMA, Eriko)

所属研究機関名: 東京工業大学

研究分担者氏名: 鈴木 正昭

部局名: 環境・社会理工学院

ローマ字氏名: (SUZUKI, Masaaki)

職名: 研究員

所属研究機関名: 東京理科大学

研究者番号 (8 桁): 70636266

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: シディキ アフザル

ローマ字氏名: (SIDDIQUI, Afzal)

研究協力者氏名: チェン イシュウ

ローマ字氏名: (CHEN, Yihsu)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。