

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：12703

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K01565

研究課題名（和文）エネルギー市場とその不確実性を考慮した最適環境政策

研究課題名（英文）Energy market, uncertainty, and optimal environmental policy

研究代表者

田中 誠（Tanaka, Makoto）

政策研究大学院大学・政策研究科・教授

研究者番号：10377137

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：電力市場の均衡を考慮した上での燃料種別排出原単位の最適規制を、二段階計画問題により分析した。燃料種別排出原単位の環境規制に関して、社会的に最適な水準（率）を導出し、国等の広域の規制方式よりも、州等の狭い単位の規制方式を採用した方が、社会厚生が高まることを示した。これは、自治体単位のローカルな環境規制であっても、他方で発電会社は広域の電力市場に参加することができて、電力財の供給量を調整する柔軟性が維持されることに起因する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで公共経済分野の一般的な規制研究の文脈では、州等の狭い単位と国等の広い単位の仕組みのどちらが望ましいかについて断定的な結果が得られていない。本研究では、燃料種別排出原単位の環境規制に関して、社会的に最適な水準（率）を導出したことに加え、国等の広域の規制方式よりも、州等の狭い単位の規制方式を採用した方が、社会厚生が高まることを示しており、学術的意義だけでなく、現実の政策への応用面での意義がある。

研究成果の概要（英文）：We examined the optimal performance-based environmental regulation via bi-level programming problems, taking into account the equilibrium of the electricity market. We derived the socially optimal rates for performance-based regulation and found that distinct state-by-state regulation yields higher social welfare than broader national regulation. This is because power producers can maintain flexibility in adjusting power supply by participating in a wide-area power market even under state-by-state environmental regulation.

研究分野：エネルギー、環境、産業

キーワード：環境政策 エネルギー政策 電力市場 不確実性

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) エネルギー産業は、温室効果ガスの排出量が膨大である。とりわけ、電力産業の温室効果ガスの排出量は大きく、環境への影響が甚大である。このため、化石燃料による発電を抑制し、太陽光や風力等の再生可能エネルギーによる発電を促進する環境政策が、現実に各国で実施されている。例えば、RPS ないし再生可能エネルギー利用割合基準制度 (Renewables Portfolio Standard) では、電気事業者に対して、再生可能エネルギーによる発電の利用を一定割合以上義務づける。FIT ないし固定価格買い取り制度 (Feed-in Tariff) では、電気事業者に対して、再生可能エネルギーによる発電を相対的に高い価格で買い取ることを義務づける。より近年の動向として、2015 年に米国の環境保護庁 (Environmental Protection Agency: EPA) が発表したクリーンパワープラン (Clean Power Plan: CPP) において、発電所から出る温室効果ガスに関して、排出総量だけでなく、燃料種別排出原単位 (率) による規制が導入された。

(2) こうした多様な環境政策とエネルギー市場、特に電力市場を分析した理論・シミュレーションの研究は、この 10 数年で増加している。しかし、大方の研究では、環境政策を外生的に扱い、規制方式やその水準を所与とした上で電力市場の均衡を分析する。例えば、RPS であれば再生可能エネルギーの利用率の水準、FIT であれば固定価格買い取り価格の水準を、現実の水準に合わせる等外生的に扱う場合がほとんどである。こうした研究では、内生的に決まる最適な環境規制の視点が欠けていることが多い。

2. 研究の目的

(1) 本研究で着目するのは、温室効果ガスの排出量が多い電力市場の均衡を考慮した上で、最適な環境規制はどうあるべきか、という問いである。これは、政治的に決まる場合が多い現実の規制と、最適な規制とを比較して、どれだけ社会厚生上の違い・歪みがあるかを問うことにもなる。その議論において、電力市場の不確実性も考慮した分析を行うことが重要となる。電力市場では、電力需要や再生可能エネルギーの発電量等、多様な不確実性が存在する。このような不確実性下で市場参加者が意思決定を行うことを踏まえて、電力市場の均衡と環境政策のあり方を議論することが必要である。

(2) 本研究の第一の目的は、電力市場の均衡を考慮した上での最適環境規制について、理論的・解析的に分析することと、電力市場のデータを用いたシミュレーションにより社会厚生と比較分析を行うことである。特に、2015 年に米国で導入されたクリーンパワープランに着目して、発電所の燃料種別排出原単位に関する環境規制の最適水準 (率) を導出し、規制方式の優劣を比較することを主眼とする。本研究の第二の目的は、再生可能エネルギーの発電量等の不確実性も考慮した電力市場の均衡と環境政策のあり方を分析することである。電力市場の参加者は、リスク中立であるよりもリスク回避的に意思決定を行う可能性が高い。市場参加者のリスクに対する態度を明示的に考慮した意思決定をモデル化した上で、電力市場と環境政策のあり方についての政策的含意を検討する。

3. 研究の方法

(1) 本研究の第一の目的を達成するために、環境政策の規制水準決定と複雑な電力市場の均衡とを、数理計画問題の一種である二段階計画問題 (bilevel programming problem) として定式化する。この二段階計画問題は、均衡制約をもつ数理計画問題 (mathematical programs with equilibrium constraints: MPEC) に帰着する。一般に、MPEC は解析的に解くのが困難な問題として知られており、このことが最適環境規制の既存研究を限定的にしている要因の一つとも考えられる。本研究では、電力市場の均衡を考慮した最適環境規制について、二段階計画問題、さらに MPEC として解析的および数値的に解くことを試みる。

(2) 電力市場の均衡を考慮した環境規制の最適水準に関して、最適化問題を簡略に記述すると次の二段階計画問題が想定される。

Max 社会余剰 - 温室効果ガスのダメージコスト [上位問題: 環境政策の意思決定]
s.t. Max 社会余剰 [下位問題: 電力市場のオペレーターの意思決定]
s.t. 電力システムに関する制約条件 (需給制約、発電・送電の技術制約等)
環境規制水準に関する制約条件 (燃料種別排出原単位に関する規制等)

電力市場のオペレーターの意思決定である下位問題は、凸計画問題となりカラシュ・クーン・タッカー (KKT) 条件で置き換えられる。すると、二段階計画問題は MPEC に帰着できるだろう。この問題では、多数の相補性 (complementarity) 条件を含むので、場合分けをする等により、解析解の導出を試みる。さらに、この問題を数値的に解きやすい形に変換し、電力市場のデータを

用いたシミュレーションにより社会厚生と比較分析を行う。特に、規制水準や規制方式の違いがどれだけ社会厚生に影響を与えるかを定量的に評価する。

(3) 本研究の第二の目的を達成するために、市場参加者のリスクに対する態度を明示的に考慮した意思決定モデルに関して、不確実性を扱う数理計画の手法である確率計画法 (stochastic programming) やロバスト最適化 (robust optimization) を用いて定式化することを試みる。再生可能エネルギーの発電量等については、詳細な確率分布を事前に予測することは難しいため、近年発展著しい手法として、確率変数の分布に関してロバストな最適化 (distributionally robust optimization) の適用も検討する。

4. 研究成果

(1) 米国の各州では、キャップ・アンド・トレード方式の環境規制だけでなく、発電所の燃料種別排出原単位に基づく環境規制を選択的に導入できる仕組みになっている。まず基礎研究として、異なる市場構造のもとで、燃料種別排出原単位の環境規制が社会厚生にどのような影響を与えるかを分析した。発電所の燃料種別排出原単位の環境規制は、実質的に、火力発電に「税金」を課し、他方で再生可能エネルギーによる発電に「補助金」を与えるのと同じ効果がある。このような税金と補助金の導入は、社会厚生に歪みを与える。実際、完全競争的な市場では、燃料種別排出原単位の環境規制は、社会厚生の点でキャップ・アンド・トレード方式の環境規制よりも劣る。しかし、市場が寡占的な場合には、市場支配力の行使により発電量が抑制され、これにより税金と補助金のもたらす歪みが緩和されうる。この歪みを緩和する効果が相対的に大きい場合には、燃料種別排出原単位の環境規制のもとで、完全競争市場よりも寡占的な市場において社会厚生が大きくなりうることを示した。

(2) 上記の基礎研究も踏まえつつ、電力市場の均衡を考慮した上での燃料種別排出原単位の最適規制を、二段階計画問題により分析した。二段階計画問題において、上位問題は政策決定者の環境規制に関する意思決定、下位問題は電力市場のオペレーターの意思決定を定式化し、最適な規制水準や規制方式による違いを検討した。特に、発電所の燃料種別排出原単位に基づく環境規制に関して、州等のより狭い単位の規制方式と、国等のより広い単位の規制方式とを、社会厚生の観点から比較した。これまで公共経済分野の一般的な規制研究の文脈では、狭い単位と広い単位の仕組みのどちらが望ましいかについて断定的な結果が得られていない。パッチワークのように分断されたローカルな規制よりも、広域にわたる規制の方が優れていると論じる研究がある。一方、資本等の移動が可能な場合には、ローカルな規制の方が優れていることを示唆する研究もある。本研究では、燃料種別排出原単位の環境規制に関して、社会的に最適な水準(率)を導出し、国等の広域の規制方式よりも、州等の狭い単位の規制方式を採用した方が、社会厚生が高まることを示した。これは、自治体単位のローカルな環境規制であっても、他方で発電会社は広域の電力市場に参加することができて、電力財の供給量を調整する柔軟性が維持されることに起因する。本研究では、二段階計画問題と MPEC をもとに理論的・解析的にこれらの結果を示すとともに、さらに、発電所と送電ネットワークを想定した電力市場のケーススタディにより数値的にも結果を示した。

(3) 電力市場と環境規制に関する一連の研究において、二段階計画問題の数値解を効率的に求める手法の検討も行った。特に、Wolfe の双対性を用いて MPEC を混合整数二次計画問題 (Mixed-Integer Quadratic Program: MIQP) に変換して解く方法を提案した。また、主双対制約付き数理計画問題 (Mathematical Program with Primal and Dual Constraints: MPPDC) として定式化し、さらに混合整数二次制約付き二次計画問題 (Mixed-Integer Quadratically Constrained Quadratic Program: MIQCQP) に変換して解く手法も検討した。商用ソルバーを用いて電力市場のケーススタディを行い、これらの手法の有効性を検証した。さらに、政策的含意と手法の両面の成果を Springer 社の洋書の研究書としてとりまとめて出版した。

(4) 再生可能エネルギーの不確実性を考慮するために、電力市場の参加者のリスク回避の態度を反映した意思決定モデルを構築した。太陽光発電システムを所有する需要家は、電力の消費者であると同時に、電力の供給者の側面も併せ持つプロシューマーとみなすことができる。日中に太陽光発電による電力を自家消費し、夜間には電力会社から電力を購入して消費する。一方、日中に太陽光発電による電力が余るときは、その余剰分を電力会社に販売することができる。このような二面性を持つプロシューマーは、所有する太陽光発電システムによる電力を自家消費するか電力会社に販売するかを意思決定を行う。注意すべき点は、太陽光発電による電力量の多寡は、その時々々の天候に左右されるため、不確実性が存在することである。リアルタイムの太陽光発電の詳細な確率分布をプロシューマーが事前に予測するのは困難である。そこで、プロシューマーの意思決定は、分布に関してロバストな確率制約問題 (distributionally robust chance-constrained problem) として定式化した。分析の結果、プロシューマーのリスク回避度が高まると、リアルタイム以前の意思決定として、自らの消費を抑制し、電力会社からの電力購入を増やそうとする。それにより、電力価格が上昇し、プロシューマー以外の一般消費者の消費者余剰が低下することが示された。不確実性に直面する電力市場の参加者のリスク回避度合を適切に考

慮することは、市場の均衡と余剰の分析において重要な要素となる。

(5) 上記のモデルでは、プロシューマーのリスク回避度合を外生的に与えていた。さらなる拡張として、リスク回避度合を外生的に与えるのではなく、プロシューマーが直面する状況に応じてリスク回避度を内生的に決定するモデルを構築した。そして、不確実性下でより柔軟な意思決定を行うプロシューマーを考慮したシミュレーションを行った。シミュレーションでは、プロシューマー以外にも多数の需要家と発電所が接続されるネットワークを想定し、IEEE Reliability Test System (RTS 24-Bus) を用いた。シミュレーション分析の結果、プロシューマーはリアルタイムの電力の決済価格に反応し、その水準に応じてリスク回避度合を柔軟に調整することで、自らの余剰を増大できることが示された。このようなプロシューマーの意思決定は、完全競争の市場だけでなく、不完全競争の市場においても同様に確認された。

(6) 最終年度に研究の総括を行った。本研究課題の研究成果として国際学術雑誌にこれまで掲載された数本の論文も含めて、エネルギー市場と環境政策に関する近年の 100 本以上の学術論文をカバーする展望論文を執筆した。展望論文の中で、本研究課題による研究成果の学術的貢献を位置づけるとともに、さらにこの分野における今後の研究課題について論じた。特に、エネルギー市場と環境政策の分野においては、大きく 2 つの研究の流れがあり、経済学的手法によるアプローチとオペレーションズリサーチ・工学的手法によるアプローチとに分かれる。しかし、この 2 つのアプローチには一長一短があり、両者から得られる研究結果にギャップが見られることが多い。最適な環境規制を検討する上で、2 つのアプローチを融合していく研究が必要であることを論じた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Siddiqui Afzal S., Tanaka Makoto, Chen Yihsu	4. 巻 10
2. 論文標題 Market-Based Environmental Policies in the Power Sector	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Current Sustainable/Renewable Energy Reports	6. 最初と最後の頁 59 ~ 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40518-023-00211-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Ramyar, S., M. Tanaka, A. L. Liu, and Y. Chen	4. 巻 1(1)
2. 論文標題 Endogenous Risk Management of Prosumers by Distributionally Robust Chance-Constrained Optimization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Energy Markets, Policy, and Regulation	6. 最初と最後の頁 48-59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TEMPR.2023.3242664	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tanaka, M., Y. Chen, and A. S. Siddiqui	4. 巻 73(3)
2. 論文標題 Regulatory Jurisdiction and Policy Coordination: A Bi-Level Modeling Approach for Performance-Based Environmental Policy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Operational Research Society	6. 最初と最後の頁 509-524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01605682.2020.1843980	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Viskovic, V., Y. Chen, A. S. Siddiqui, and M. Tanaka	4. 巻 42(6)
2. 論文標題 Economic and Environmental Consequences of Market Power in the South-East Europe Regional Electricity Market	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy Journal	6. 最初と最後の頁 121-145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5547/01956574.42.6.VVIS	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Viskovic, V., Y. Chen, A. S. Siddiqui, and M. Tanaka	4. 巻 134
2. 論文標題 Regional Carbon Policies in an Interconnected Power System: How Expanded Coverage Could Exacerbate Emission Leakage	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Energy Policy	6. 最初と最後の頁 110914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enpol.2019.110914	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen, Y., M. Tanaka, and A. S. Siddiqui	4. 巻 39(6)
2. 論文標題 Market Power with Tradable Performance-Based CO2 Emission Standards in the Electricity Sector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energy Journal	6. 最初と最後の頁 121-145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5547/01956574.39.6.yche	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Siddiqui, A. S., M. Tanaka, and Y. Chen
2. 発表標題 Rearranging the Deck Chairs? Coordinating Environmental Policy and Transmission Planning in Decentralised Electricity Industries
3. 学会等名 EURO 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Siddiqui, A. S., M. Tanaka, and Y. Chen
2. 発表標題 Sustainable Transmission Planning
3. 学会等名 INFORMS Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ito, K., M. Tanaka, Y. Chen, and R. Takashima
2. 発表標題 Prosumers' Investment Decisions under Different Pricing Schemes
3. 学会等名 INFORMS Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤和哉・田中誠・Yihsu Chen・高嶋隆太
2. 発表標題 Prosumers' Investment Decisions and Social Welfare under Different Pricing Schemes
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Viskovic, V., Y. Chen, A. Siddiqui, and M. Tanaka
2. 発表標題 Economic and Environmental Consequences of Market Power in the South-East Europe Regional Electricity Market
3. 学会等名 42nd IAEE International Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chen, Y., A. Siddiqui, and M. Tanaka
2. 発表標題 Equilibrium Methods for Analysis of Environmental Policy in the Power Sector
3. 学会等名 Pre-Conference Seminar of the 42nd IAEE International Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanaka, M., Y. Chen, and A. S. Siddiqui
2. 発表標題 Regulatory Jurisdiction and Policy Coordination: A Bi-level Modeling Approach For Performance-based Policy
3. 学会等名 INFORMS Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tanaka, M., Y. Chen, and A. S. Siddiqui
2. 発表標題 Regulatory Jurisdiction and Policy Coordination: A Bi-level Modeling Approach For Performance-based Policy
3. 学会等名 INFORMS International Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Chen, Y., A. S. Siddiqui, and M. Tanaka	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer International Publishing	5. 総ページ数 284
3. 書名 Analysis of Environmental Policy in the Power Sector: Equilibrium Methods and Bi-Level Modeling	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	チェン イシュ (Chen Yihsu)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	シディキ アフザル (Siddiqui Afzal)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of California at Santa Cruz			
スウェーデン	Stockholm University			
英国	University College London			