

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 10 日現在

機関番号：12703

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26380291

研究課題名(和文) 不完全競争下での戦略的な貯蓄行動：排出権バンキングと電力蓄電行動の動学的分析

研究課題名(英文) Strategic banking under imperfect competition: Dynamic analysis of emissions permit and power banking

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、排出権等のバンキングに関して、不完全競争下での戦略的・動学的な意思決定を説明する経済理論モデルを構築・分析し、さらに米国カリフォルニア州等の現実の市場データを使ったシミュレーションを行い、理論的な考察結果を検証した。不完全競争・不完全裁定のもとでは、支配的企業による市場支配力行使の結果として、排出権価格が利子率よりも高い率で上昇しうることを示した。このことは、完全競争時におけるホテリングのルールが成り立たない可能性を示唆する。

研究成果の概要(英文)：This study develops an economic model of strategic inter-temporal permit banking under imperfect competition. We further extend the model to simulate real markets such as the California power and permit markets. We show that the dominant firm exerts market power under imperfect competition and imperfect inter-temporal arbitrage. Consequently, the permit price rises at a higher rate than the discount rate. This is in contrary to the perfectly competitive permit market, where the permit price rises at the discount rate following the classic Hotelling's rule.

研究分野：エネルギー、環境、産業組織

キーワード：環境政策 エネルギー政策 排出権バンキング スマートグリッド 不完全競争 動学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、多くの国・地域が、温室効果ガスを効率的に抑制するために排出権取引制度の導入を検討・実施するようになった。特に、排出権取引制度をより効率的にするために、「排出権バンキング」の仕組みが注目されている。これは、ある期に企業に余剰の排出権が生じるときに、それを没収するのではなく、バンキングをして次期以降に権利を繰り越すことを認める仕組みである。この仕組みを活用することにより、企業は、短期だけでなく長期的な観点から、自らの生産活動と温室効果ガスの排出、排出権の行使を調整して、異時点間の資源配分をより効率的に行うことができるようになる。既にキャップ&トレード型の排出権取引制度を導入済みの EU では、第二フェーズ(2008-2012年)から第三フェーズ(2013-2020年)への排出権バンキングが認められることになった。米国では、排出権取引制度関連法案の中で排出権バンキングの導入が検討されている。EU・米国ともに、バンキングを認めるが、排出枠のポロイング(借入)は認めないか大きく制限する形である。

(2) 一方、エネルギー分野において、スマートグリッド(情報通信技術を活用しつつ電力需給を自律分散的にコントロールする電力システム)が近年注目されるようになった。スマートグリッド環境下で大きな役割を果たすのが、地域の需要家を束ねてその電力受給を自律分散的にコントロールするロードアグリゲーターである。ロードアグリゲーターは、発電事業者等から電力を調達して、地域の需要家に供給する。その際に、ロードアグリゲーターは、電力用蓄電池等の装置を準備しつつ、電力調達先の一つである卸電力市場における価格変動や、太陽光・風力等の再生可能エネルギーの天候による出力変動、さらには、束ねた需要家の電力需要の変動等に直面する。このため、供給と需要両面の変動要因に適切に対処することがロードアグリゲーターに求められる。

## 2. 研究の目的

(1) 排出権バンキングの重要な先行研究である Rubin (1996) では、最適制御理論を用いて、完全競争下でバンキングが行われると、排出権価格がホテリングのルール(Hotelling's rule)に従い利子率で上昇していくこと等を論じた。しかしながら、Rubin (1996) では、完全競争のみで不完全競争に関する分析はなく、また、排出量のみが対象で財市場と排出権市場の両方を含む分析はない。Rubin (1996) 以後の研究でも、不完全競争や財・排出権両市場を含む分析は十分に行われていない。そこで本研究では、前述の問題意識に鑑み、環境・エネルギー分野の生産活動で大きな比重を占める電力産業を念頭に置き、財市場と排出権市場の両者

を考慮した上で、不完全競争下で企業が両方の市場で市場支配力を行使しうる状況を考え、排出権バンキングに関する異時点間の戦略的・動学的な意思決定問題を理論的にモデル化する。構築したモデルに基づき、不完全競争下で排出権バンキングが行われる場合には、完全競争下と比べて、経済の均衡にどのように異なるインパクトを与えるのかを明らかにする。また、政府による排出枠・排出権の年次スケジュールの決め方が、企業の戦略的行動にどのような影響を与えるのかも分析する。さらに、現実の電力・排出権市場のデータを用いてシミュレーション分析を行い、理論分析の結果を検証する。

(2) ロードアグリゲーターに関しては、Xu and Singh (2012) 等のように工学分野で研究が端緒についたばかりである。そこで本研究では、経済分析の観点に立ち、ロードアグリゲーターに関する動学的な意思決定モデルを理論的に構築する。その際に、卸電力市場における価格変動や、太陽光・風力等の再生可能エネルギーの天候による出力変動、電力需要の変動、電力蓄電行動等の様々な要因の影響を多面的に考慮する。

## 3. 研究の方法

(1) 不完全競争下での戦略的・動学的な意思決定を説明する経済理論モデルを構築・分析する。具体的には、電力産業の企業は、割引率を考慮した長期にわたる利潤を最大化するように、各期の電力の供給量と排出権の取引量との二つの変数を意思決定する。想定されるモデルのコア部分を単純化して述べると

$$\text{Max 長期にわたる利潤} = \sum_t [\text{電力取引による利潤} + \text{排出権取引による利潤}]$$

s. t. 電力供給に関する制約条件  
排出権のバンキングに関する制約条件

となる。電力取引による利潤は、各期の電力供給の収入と費用から計算される。排出権取引による利潤については、ネットで排出権を購入するときは支払いとなり、ネットで排出権を売却するときは収入となる。これらの値は、電力価格と排出権価格に依存する。

(2) さらに、米国カリフォルニア州の現実の電力取引とCO2排出のデータを使った排出権バンキングのシミュレーション分析により、理論的な分析結果を検証する。カリフォルニア州の主要な電力供給者の供給量や燃料費、その他のデータがウェブ上で公表されており、また、CO2排出量についても Continuous Emissions Monitoring System (CEMS) から入手可能である。こうした理由からカリフォルニア州は、寡占的な電力産業における排出権バンキングのシミュレーション

ン分析に適していると考えられる。

(3) スマートグリッド環境における地域の需要家とそれを束ねるロードアグリゲーターの動学的な行動を説明するモデルを構築・分析する。また、スマートグリッド環境における太陽光発電とデマンドレスポンスの関係や、消費者の価格要素と非価格要素に対する反応等についての実証研究も行う。スマートグリッド環境下において、地域の電力需要家を束ねるロードアグリゲーターは、消費者の反応を考慮して意思決定を行うため、デマンドレスポンスの実態を明らかにすることが重要となる。

#### 4. 研究成果

(1) 排出権バンキングに関して、不完全競争下での戦略的・動学的な意思決定を説明する経済理論モデルを構築・分析した。特に、環境・エネルギー分野の生産活動で大きな比重を占める電力産業を念頭に置き、電力財市場と排出権市場の両者を含むモデルを考察した。このモデルは不完全競争下の動学的最適化問題として定式化され、電力産業の企業は割引率を考慮した長期にわたる利潤を最大化するように、各期の電力の供給量と排出権の取引量との二つの変数を意思決定する。モデルを解析的に解くことにより、不完全な競争、不完全な裁定のもとで、支配的企業が以下の戦略的行動を取りうることを示した：

(i) ある期に排出権価格を下げる方向に操作して、排出権を安い価格で購入して使用せずにバンキングをしておく。

(ii) そして、後の期に今度は逆に排出権価格を吊り上げる方向に操作して、以前の期にバンキングしておいた排出権を高い価格で売却する。

上記の結果は、不完全競争・不完全裁定のもとで、企業が排出権バンキングを活用して市場支配力を行使することで、企業の利潤を高めるように排出権の取引を異時点間で戦略的に配分しうることを示している。従来の完全競争と完全な裁定を仮定した諸研究では、排出権価格がホテリングのルールに従い利子率で上昇する帰結を示している。これに対して、本研究では、不完全競争・不完全裁定のもとでは、市場支配力行使の結果として、排出権価格が利子率よりも高い率で上昇しうることを示し、ホテリングのルールが成り立たない可能性を示唆する。

(2) 上述の理論分析をベースとして、さらに現実の市場データを使った排出権バンキングのシミュレーション分析を行い、理論的な考察結果を検証した。具体的には、米国カリフォルニア州の現実の電力取引とCO2排出のデータを用いた。

5 期間のシミュレーションモデルを構築して分析を行った。完全競争下では、排出権価格は、パラメータとして設定した割引率 7%

と同じ率で上昇した。これに対して、不完全競争下では、排出権価格は割引率 7%よりも大きな率で上昇し、特に終盤の第 4 期から第 5 期にかけては 16% の上昇を示す結果となった。さらに、政府が各期に許可する排出権の配分を変えるケースとして、前半の第 1・2 期に多めに配分して、終盤の第 4・5 期に少なめに配分する状況をシミュレーション分析した。その結果、不完全競争下の排出権価格の上昇度合いはさらに高まることが示された。理論的な分析から予想されたように、不完全な競争・裁定のもとで支配的企業が戦略的に行動し、前半の期に排出権価格を下げる方向に操作して、排出権を安い価格で購入して使用せずにバンキングをする一方、後半の期に今度は逆に排出権価格を吊り上げる方向に操作して、バンキングしておいた排出権を高い価格で売却したと解釈される。カリフォルニア州のシミュレーション分析の結果は、理論分析と整合している。

この他、排出権取引制度と同様に温室効果ガスの抑制に資する Renewable portfolio standards (RPS) の制度に関する分析も行った。RPS の規制目標が内生的に決定されるモデルを構築して分析した結果、不完全競争下に比べて、完全競争下で過剰に再生可能エネルギーが導入され社会厚生が悪化する可能性があることを示した。

(3) スマートグリッド環境における地域の消費者と供給者、ロードアグリゲーター等に関する動学的な分析フレームワークを構築した。従来の電力システムは、1 社の電力会社が、管轄する地域の多数の需要家に電力を供給する「中央管理型」の方式であった。しかし、スマートグリッド環境では、多数の供給者が多数の需要家に電力を販売する「分散型」の方式をとる。このような分散的な環境で、各々の需要家が家庭用のエネルギー・マネジメントシステムにより、リアルタイムに消費量を管理するモデルを考察した。各家庭は、情報通信技術 (ICT: Information and Communication Technology) を用いることで、リアルタイムに近隣の電力需給状況や価格シグナルに関する情報を交換して、効用を最大化する消費量を決定する。このような家庭を前提として、電力の需給均衡を導く分散的なアルゴリズムを開発した。この分散的なアルゴリズムは、中央管理的な方式と同じ均衡に導くことが示された。本研究で提案した方式のメリットは、供給者と消費者の数が増大するときに、分散的にローカルの情報を活用することで、効率的に均衡を導くことができることである。

(4) スマートグリッド環境下における太陽光発電とデマンドレスポンスの関係についての実証研究も行った。太陽光発電パネルを所有する家庭に対して、電力価格を変化させることで、デマンドレスポンスの効果を計測

した。その結果、太陽光発電パネル所有の家庭は、一般世帯に比べて、デマンドレスポンスの効果が25%程度にとどまる結果となった。これは、太陽光発電を行う家庭は、電力の「自家消費」をしており、価格の増減の影響を受けにくいと考えられる。

また、スマートグリッド環境下において、消費者が価格要素と非価格要素に対してどのように反応するかについての実証研究を行い、価格変化による効果は約15%、価格変化を伴わない節電要請の効果は約3%であるという結果を得た。また、価格変化による効果は持続性があるが、節電要請による効果は持続性が見られず徐々に低減することがわかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

Chen, Y., and M. Tanaka (2018) "Permit Banking in Emission Trading: Competition, Arbitrage, and Linkage," *Energy Economics*, 71: 70-82. **査読有**  
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.01.032>

Ito, K., T. Ida, and M. Tanaka (2018) "Moral Suasion and Economic Incentives: Field Experimental Evidence from Energy Demand," *American Economic Journal: Economic Policy*, 10(1): 240-267. **査読有**  
DOI: 10.1257/pol.20160093

Endo, M., K. Asami, R. Kutsuzawa, S. Yamamoto, M. Tanaka, H. Takeshita, E. Oki, and N. Yamanaka (2017) "Distributed Real-Time Power Cooperation Algorithm for Residences Based on Local Information in Smart Grid," *Journal of Energy Engineering*, 143(3). **査読有**  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000379](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000379)

Ida, T., K. Murakami, and M. Tanaka (2016) "Electricity Demand Response in Japan: Experimental Evidence from a Residential Photovoltaic Power-Generation System," *Economics of Energy & Environmental Policy*, 5(1): 73-88. **査読有**  
DOI: 10.5547/2160-5890.5.1.itak

Siddiqui, A., M. Tanaka, and Y. Chen (2016) "Are Targets for Renewable Portfolio Standards Too Low? The

Impact of Market Structure on Energy Policy," *European Journal of Operational Research*, 250(1): 328-341. **査読有**  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.10.063>

Murakami, K., T. Ida, M. Tanaka, and L. S. Friedman (2015) "Consumers' Willingness to Pay for Renewable and Nuclear Energy: A Comparative Analysis between the US and Japan," *Energy Economics*, 50: 178-189. **査読有**  
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.002>

[学会発表](計14件)

Chen, Y., and M. Tanaka "Leader-Follower Model for Policymakers: A Case of Optimal Performance-Based Policy," presented at the 15th IAEE European Conference, Vienna, Austria, September 6, 2017.

Ito, K., T. Ida, and M. Tanaka "Information Frictions, Inertia, and Selection on Elasticity: A Field Experiment on Electricity Tariff Choice," presented at the NBER Japan Project Meeting, Tokyo, Japan, July 31, 2017.

Ito, K., T. Ida, and M. Tanaka "Information Frictions, Inertia, and Selection on Elasticity: A Field Experiment on Electricity Tariff Choice," presented at the Conference in Honor of Daniel McFadden, University of Southern California, California, USA, July 28, 2017.

Ito, K., T. Ida, and M. Tanaka "Information Frictions, Inertia, and Selection on Elasticity: A Field Experiment on Electricity Tariff Choice," presented at the Allied Social Science Associations (ASSA) Annual Meeting, Chicago, Illinois, USA, January 7, 2017.

Siddiqui, A., M. Tanaka, and Y. Chen "Sustainable Transmission Planning in Imperfectly Competitive Electricity Industries: Balancing Economic Efficiency and Environmental Outcomes" presented at INFORMS Annual Meeting, Nashville, Tennessee, USA, November 14, 2016.

Viskovic, V., Y. Chen, A. Siddiqui, and

M. Tanaka “Market Power in Electricity Markets in South-East Europe” presented at INFORMS Annual Meeting, Nashville, Tennessee, USA, November 14, 2016.

Chen, Y., M. Tanaka, and A. Siddiqui “Tradable Performance-Based CO2 Emissions Standards: Walking on Thin Ice?” presented at INFORMS Annual Meeting, Nashville, Tennessee, USA, November 13, 2016.

Ito, K., T. Ida, and M. Tanaka “Information Frictions, Inertia, and Selection on Elasticity: A Field Experiment on Electricity Tariff Choice,” presented at the 39th Annual NBER Summer Institute, Cambridge, Massachusetts, USA, July 26, 2016.

Chen, Y., M. Tanaka, and A. Siddiqui “Tradable Performance-Based CO2 Emissions Standards: Walking on Thin Ice?” presented at the 39th IAEE International Conference, Bergen, Norway, June 20, 2016.

Zhang, D., Y. Chen, and M. Tanaka “Analysis of Regional Market Impact of EPA’s Clean Power Plan: Mass-based or Rate-based Standard?” presented at INFORMS Annual Meeting, Philadelphia, Pennsylvania, USA, November 3, 2015.

Zhang, D., Y. Chen, and M. Tanaka “Analysis of Regional Market Impact of EPA’s Clean Power Plan: Mass-based vs. Rate-based Standard,” presented at the 33rd USAEE/IAEE North American Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, October 26, 2015.

Siddiqui, A., M. Tanaka, and Y. Chen “Are Targets for Renewable Portfolio Standards Too Low? A Complementarity-Based Policy Analysis,” presented at INFORMS Annual Meeting, San Francisco, California, USA, November 11, 2014.

Chen, Y., and M. Tanaka “Multi-sector Model of Inter-temporal Permit Banking under Imperfect Competition,” presented at INFORMS Annual Meeting, San Francisco, California, USA, November 9, 2014.

Siddiqui, A., M. Tanaka, and Y. Chen “Are Targets for Renewable Portfolio

Standards Too Low? A Complementarity-Based Policy Analysis,” presented at the 37th IAEE International Conference, New York, USA, June 18, 2014.

〔図書〕(計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.grips.ac.jp/jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

#### (1) 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