

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：10101
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間：2017～2019
課題番号：16KK0046
研究課題名（和文）平面インパルス制御を用いた環境投資問題への確率的アプローチ（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）A Stochastic Approach to Environmental Investment Problems with the Planar Impulse Control (Fostering Joint International Research)

研究代表者
後藤 允 (Goto, Makoto)

北海道大学・経済学研究院・准教授

研究者番号：30434286
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,400,000円
渡航期間： 21ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、環境投資問題の1つとして、再生可能エネルギー利用割合基準（Renewable Portfolio Standards; RPS）の政策決定問題を分析した。具体的には、非再生エネルギー事業者と再生エネルギー事業者が両方とも存在する市場において、政策決定者の投資問題として定式化し、最適な投資タイミングとRPS目標値を求めた。主な研究成果として、(1) 不確実性が高い場合は政策変更のタイミングが遅れ、RPS目標値が高くなること、(2) 社会が排出ガスに関して不寛容であるほど、高いRPS目標へと早期に政策変更し、その結果としてエネルギー事業者の発電量は削減されることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究のモデルは、RPS目標値、企業の環境投資、社会的厚生との3つの相互作用を分析可能なモデルを構築し、市場均衡を保ちながら企業の環境投資と社会的厚生を最適化するRPS目標値を求めるものである。これによって、企業行動や市場均衡を踏まえて環境政策を定量的に評価することが可能となり、RPS目標値が極端に低かったために効果がみられず、本来有効な制度が廃止されるという事態の防止につながる。さらに、企業の競争環境、制度設計の不確実性を取り入れることで、モデルを拡張して環境政策の詳細な定量的評価を行なうことが可能になり、地球温暖化問題の解決への手掛かりとなり得る。

研究成果の概要（英文）：This research analyzes a policy decision problem of Renewable Portfolio Standards (RPS) in environmental investment problems. In particular, we have found the optimal investment timing and RPS target in terms of policy maker in the market where both non-renewable and renewable energy producers exist. Our main results are as follows: (1) High uncertainty delays the timing of policy change and gains RPS target; (2) if greenhouse gas emissions is less admissible, the policy maker decides higher RPS target sooner and consequently the supply of both energy producers are reduced.

研究分野：投資決定理論

キーワード：リアルオプション 環境投資 インパルス制御 RPS

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化問題は全世界的に取り組むべき喫緊の課題であることは論を待たない。わが国は 2015 年 6 月の G7 サミットにおいて、温室効果ガスを「2030 年度に 2013 年度比で 26%削減」という目標を発表した。この目標を達成するためには、大規模な環境投資が必要不可欠であり、その費用対効果を測定し最適な投資判断をすることは非常に重要である。研究代表者はこれまでに、環境投資による経済効果とその費用対効果を勘案した最適投資問題をリアルオプション・アプローチを用いて分析してきた。

特に 2012~2013 年度の 2 年間、日本学術振興会海外特別研究員としてカリフォルニア大学バークレー校にて Xin Guo 教授と「環境政策におけるリアルオプション問題に対する確率制御アプローチ」の研究に従事した。その成果として、観測変数と制御変数からなる平面上のインパルス制御問題を提案し、一般的な解法を Goto (2013) にて発表した。ただし、この研究は最適解の十分性という点で未完成であり、さらに費用関数の非線形性、選択肢の多様性、温室効果ガス削減効果の不確実性、制度設計の不確実性などの環境投資問題の特殊性を考慮できないという課題が残った。

研究代表者のリアルオプション・アプローチを用いた研究は多岐に渡り、政府の掲げる成長戦略の 1 つとして重要性が高まっている設備投資問題にも取り組んできた。基課題の目的は、Goto (2013) の平面インパルス制御問題の一般的な解法を完成させた上で設備投資問題として再定式化し、確率論的に厳密なモデル構築を通じて企業意思決定支援ツールを開発することであった。具体的には、以下の手順で段階的に研究を進めていた。

(1) 平面インパルス制御問題における最適解の保証

Goto (2013) における Verification Theorem を厳密に証明し、準変分不等式の最適解の十分性を明らかにする。

(2) 平面インパルス制御による設備投資問題の定式化

(1) で完成した解法を設備投資問題として再定式化し、関数形などの違いによる準変分不等式の変化、Verification Theorem の変化を厳密性を失うことなく分析し、最適設備投資戦略を与える。

(3) 数値計算アルゴリズムの構築・実証分析

(2) で導かれる非線形連立方程式の数値計算アルゴリズムを構築し、実証分析によってモデルの有効性を明らかにする。

(4) 競争環境における分析

(2) で定式化した問題を競争環境へ拡張し、ゲーム理論的分析によって企業間の相互作用を考慮した設備の最適拡大縮小戦略を与える。さらに、数値計算アルゴリズムも再構築する。

研究開始当初の進捗状況は、(1) の Verification Theorem の証明の途中段階であったが、(2) の設備投資問題としての定式化を終えていた。途中経過として、特異制御問題の最適性を厳密に解明した Guo and Tomecek (2009) を応用した結果、問題を一般形から特定の問題に変更しても最適性などの本質が変化しないことが分かり、平面インパルス制御問題の汎用性の高さが示された。

2. 研究の目的

基課題における研究開始当初までの取り組みによって、研究代表者が提案した平面インパルス制御を当初研究していた環境投資問題に再適用する可能性が開けた。本研究の目的は、基課題において完成させた平面インパルス制御問題の解法と数値計算アルゴリズムを応用して、環境投資問題を分析することである。特に、費用関数の非線形性、選択肢の多様性、温室効果ガス削減効果の不確実性、制度設計の不確実性などの環境投資問題の特殊性を考慮し、最適な汚染物質の量と削減時刻を確率論的に厳密な解として求めることが目的である。

これまでの環境投資に関する研究は、そのほとんどが

- Pindyck, R. S.: "Irreversibilities and the Timing of Environmental Policy," *Resource and Energy Economics*, **22**, 223-259, 2000.

をベースに構築されている。しかし、最近になってその単純化された解法が間違っていたことが示されたため、新たな理論体系の構築が急がれている。本研究では、確率制御問題として解法を単純化せずに厳密に解くアプローチを採用するため、最適性の保証に関してこれまでの研究とは比較にならないほど信頼性が高い。

3. 研究の方法

本研究は基課題における(2), (3)を設備投資問題から環境投資問題へ発展させるものである。したがって, (3)の数値計算アルゴリズムの構築が完了した2017年度から研究を開始し, 3年計画で実施した。特に, 2018~2019年度に渡り, カリフォルニア大学サンタクルーズ校においてYihsu Chen 教授と国際共同研究を実施した。具体的には, 研究の着想段階で検討していた環境投資の4つの特徴(a)~(d)について, (i)定式化, (ii)最適性の保証, (iii)数値計算アルゴリズムの修正, (iv)実証分析を段階的に実施した。

(a) 非線形な費用関数の導入

Goto et al. (2010)において示した環境投資における非線形な費用関数を導入する。このモデルをベースに以下の特徴を組み込んでいく。

(b) 選択肢の多様性

環境投資には, エネルギー効率の向上, 汚染物質の排出量抑制などの複数の選択肢が存在する。後藤ら(2008)の複数選択肢に対する環境投資問題を, 平面インパルス制御問題へ拡張する。

(c) 温室効果ガス削減効果の不確実性

環境投資の経済効果は, 主に温室効果ガスの削減効果で測られるが, その効果は不確実である。この2変数問題への拡張は, Goto and Suzuki (2015)が応用可能である。

(d) 制度設計の不確実性

わが国は2013年以降, 京都議定書第二約束期間に参加しないことを決定し, CDM クレジットに対する取り扱いが変化した。気候変動枠組条約の制度設計は今後も不確実な要素を含んでいるため, Goto et al. (2017)を応用して制度設計の不確実性を考慮する。

4. 研究成果

本研究の具体的な成果は, 以下のとおりである。

- (1) 環境投資問題の1つとして, 再生可能エネルギー利用割合基準(Renewable Portfolio Standard; RPS)の政策問題を分析した。具体的には, 非再生エネルギー事業者と再生エネルギー事業者が両方とも存在する市場において, 再生エネルギー事業者の投資問題として定式化し, 最適な投資タイミングとRPS目標値を求めた。特に, 制度設計の不確実性として, RPSを最適化する場合としない場合に分けて問題を分析した。RPSを最適化しない場合は, 初期RPS目標値が高いほど投資を促進し, 温室効果ガスを削減することを示した。さらに, RPSを最適化する場合は, 初期RPS目標値が高いほど最適化後のRPSが適正水準に下げられるため, 逆に投資を抑制し温室効果ガスを増加させることを示した。この成果は, 21st Conference of the International Federation of Operational Research Societies, 日本オペレーションズ・リサーチ学会2017年秋季研究発表会, 日本リアルオプション学会2017年研究発表大会にて発表した。
- (2) 非再生エネルギー事業者と再生エネルギー事業者が両方とも存在する市場において, 政策決定者の投資問題として定式化し直し, 制度設計の不確実性をモデル化し, 最適な投資タイミングとRPS目標値を求めた。その結果として, 不確実性が高い場合は政策変更のタイミングが遅れ, RPS目標値が高くなることが分かった。さらに, 排出ガスのダメージコストが高い場合は政策変更のタイミングが早くなるが, RPS目標値にはさほど影響しないことが分かった。また, 政策変更前後の比較では, 排出ガスのダメージコストが高く初期RPS目標値が低いときのみ, 非再生エネルギー生産量が削減されることが分かった。この成果は, INFORMS Annual Meeting 2018, 平成30年度数理解析研究所共同研究(公開型)「ファイナンスの数理解析とその応用」にて発表した。
- (3) 非再生エネルギー事業者と再生エネルギー事業者が両方とも存在する市場において, 政策決定者の投資問題として定式化し, 最適な投資タイミングとRPS目標値を求めた。中でも特に投資費用と排出ガスのダメージコストが最適な投資タイミングとRPS目標値に与える影響をモデル化し直し, その結果として, 不確実性が低い場合は投資費用は最適なRPS目標値に正の影響を与えるが, 不確実性が高い場合はその影響はほぼなくなることが分かった。さらに, 排出ガスのダメージコストが高い場合は政策変更のタイミングが早くなり, RPS目標値がする。この影響は不確実性の多寡に影響されず同じである。また, 排出ガスのダメージコストと非再生エネルギー事業者と再生エネルギー事業者の発電量は負の関係である。すなわち, 社会が排出ガスに関して不寛容であるほど, 高いRPS目標へと早期に政策変更し, その

結果としてエネルギー事業者の発電量は削減されることが分かった。

- (4) 2018年8月24日に、UC サンタクルーズ・シリコンバレーエクステンション・3004 会議室にて、国際ワークショップ ENRE (Energy, Natural Resources, and the Environment) and SOLA (Section on Location Analysis) Joint Seminar 2018 を共催した。国内研究者・海外研究者を含めて6件の発表があり、充実した議論が行なわれた。
- (5) 本研究で用いられた、リアルオプションモデルへの確率制御アプローチの手法をまとめた成果は、2020年7月刊行予定の後藤允、「投資戦略の数理モデル-リアルオプションの基礎と理論」、朝倉書店の第7章に収められている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Goto, M. and Kanagawa, S.	4. 巻 2111
2. 論文標題 A Note on Impulse Control with Outside Jumps	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 京都大学数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 22-44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 後藤允	4. 巻 2029
2. 論文標題 リアルオプションの確率モデル	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 京都大学数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 21-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Goto, M., Takashima, R. and Tsujimura, M.
2. 発表標題 Optimal Timing and Debt Ratio in Leveraged Buyouts
3. 学会等名 23rd Annual International Real Options Conference（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Goto, M. and Takashima, R.
2. 発表標題 Policy Decisions and Social Welfare in Renewable Portfolio Standards
3. 学会等名 NFORMS Annual Meeting 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤允, 金川聖也
2. 発表標題 A Note on Impulse Control with Outside Jumps
3. 学会等名 平成30年度数理解析研究所共同研究(公開型), ファイナンスの数理解析とその応用
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤允, 高嶋隆太
2. 発表標題 Policy Decisions and Social Welfare in Renewable Portfolio Standards
3. 学会等名 平成30年度数理解析研究所共同研究(公開型), ファイナンスの数理解析とその応用
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Goto, M. and Kanagawa, S.
2. 発表標題 A Note on Impulse Control with Outside Jumps
3. 学会等名 ENRE and SOLA Joint Seminar 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後藤允, 高嶋隆太
2. 発表標題 Real Options in Renewable Portfolio Standards
3. 学会等名 日本リアルオプション学会2017年研究発表大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 後藤允, 高嶋隆太
2. 発表標題 Real Options in Renewable Portfolio Standards
3. 学会等名 平成29年度数理解析研究所共同研究(公開型), ファイナンスの数理解析とその応用
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 後藤允, 高嶋隆太
2. 発表標題 Real Options in Renewable Portfolio Standards
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2017年秋季研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Goto, M. and Takashima, R.
2. 発表標題 Real Options in Renewable Portfolio Standards
3. 学会等名 21st Conference of the International Federation of Operational Research Societies (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 後藤允	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 216
3. 書名 投資戦略の数理解析モデル - リアルオプションの基礎と理論	

〔産業財産権〕

〔その他〕

北海道大学研究者総覧

<https://researchers.general.hokudai.ac.jp/profile/ja.RpPTXxNY.pEWe3fjMQOADg==.html>

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
主たる 研究先 の主たる 海外共同 研究者	チェン イシュー (Chen Yihsu)	カリフォルニア大学サンタクルーズ校・Department of Electrical and Computer Engineering・教授	