

令和元年5月21日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K16290

研究課題名(和文) 平面インパルス制御を用いた設備投資問題への確率的アプローチ

研究課題名(英文) A Stochastic Approach to Capacity Choice Problems with the Planar Impulse Control

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) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、企業の設備投資問題に対する新たな確率制御アプローチを提案した。具体的には、従来研究とは異なり、設備の拡大縮小を離散的にするために、インパルス制御を2変数に拡張した「平面インパルス制御」という新たな解法を構築した。主な研究成果として、(1) 平面上のインパルス制御問題のより効率的な計算方法の考案、(2) コーポレートファイナンスへの応用問題として負債再交渉下での最適なデフォルトと清算の戦略分析、(3) 環境投資への応用問題として、再生可能エネルギー利用割合基準(RPS)の政策問題の分析、(4) 競争投資の応用問題として、レジームスイッチ下の投資競争問題の分析が挙げられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究から得られる解は、経済全体の波及効果のようなマクロ的視点とは根本的に異なり、個々の企業がどのようなタイミングで設備投資をするかという戦略である。これによって、減税や規制緩和による個々の企業の最適行動の変化が分析可能になり、成長戦略の分析にミクロ的視点を加えることが可能になる。また、本研究の手順は他の問題へも応用可能である。特に、コーポレート・ファイナンスのキャッシュリザーブ問題はインパルス制御による分析が可能であり、応用が実現できれば、金融システムの安定化という国際的に重要視されている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 proposes a new stochastic control approach to the capacity choice problem. In particular, we have developed the new solution method named "Planar Impulse Control" that has 2 state variables. Our main results are as follows: (1) More efficient calculation methods of Planar Impulse Control; (2) an application to the corporate finance problem; (3) an application to the environmental investment problem; (4) an application to the competitive investment problem.

研究分野：投資決定理論

キーワード：リアルオプション 設備投資 インパルス制御 スイッチング制御

1. 研究開始当初の背景

設備投資問題は一般的にマクロ経済学的視点から研究され、実際多くの研究成果が得られている。しかし、これらは設備投資が資本ストックを増加させ、労働生産性が上昇して潜在成長率を高めるといった経済全体としての波及効果の話である。一方、個々の企業に着目したミクロ視点での意思決定という点では、マクロ経済学ほどの成果が得られていないのが現状である。個々の企業の設備投資に関する意思決定は、不確実性下での最適化問題に帰着する。設備投資を最適化問題として分析するために用いられている一般的な手法は特異制御であるが、設備の拡大縮小が連続的になり、実際の企業の意思決定に即していないという問題点がある。研究代表者はこの点に着目し、意思決定が離散的になるインパルス制御による設備投資問題の分析に取り組んできた。

Goto et al. (2006)では、設備の拡大縮小問題を1変数のインパルス制御問題で解こうとすると、連立方程式が無限個必要になり、問題が発散して解が求まらないことを明らかにした。後藤 (2012)では、確率制御アプローチによるリアルオプションと設備投資問題についてまとめ、平面上の特異制御を用いたの解法の有効性を指摘した。上記2つの研究業績をもとに、研究代表者は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 准教授と「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 Goto (2013)を国際会議で報告した。ただし、Goto (2013)は最適解の十分性という点で未完成であり、設備投資問題へ応用する前に解決する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、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の意思決定支援ツールを開発することである。具体的には、以下の手順で段階的に研究を進める。

(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。

3. 研究の方法

平面インパルス制御による設備投資問題のモデル構築を通じて、個々の企業の設備投資戦略における意思決定支援ツールを開発するために、(1)平面インパルス制御問題における最適解の保証、(2)平面インパルス制御による設備投資問題の定式化、(3)数値計算アルゴリズムの構築・実証分析、(4)競争環境における分析、の順に段階的に確実に研究を進める。特に手順(4)においては、競争環境におけるリアルオプション分析に関する研究代表者の複数の研究業績を活用する。また、本研究の特色である確率論的厳密性の維持のために、カリフォルニア大学バークレー校のXin Guo 准教授との研究交流を継続する。さらに、国内外の学会・国際会議において随時研究成果を発表することで、意見交換ならびに情報発信を積極的に推進する。

(1) 平面インパルス制御問題における最適解の保証

Goto(2013)の平面インパルス制御問題における 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ことで解法を完成させる。平面インパルス制御問題の特殊な Verification Theorem の厳密な証明は過去に例がなく難航が予想されるが、確率論的厳密性を維持するためXin Guo 准教授と連携しながら、慎重に進める。

(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求める。まずは、Goto and Takashima (2013)の設備投資問題における関数形をGoto(2013)のモデルへ当てはめる。ここでは、関数形による最適性保証の問題だけが懸念されるが、特異制御問題の最適性を厳密に解明した Guo and Tomecek (2009)を応用して、インパルス制御問題において最適性が保証される価値関数のクラスを調べ、本研究の関数形を検証する。

(3) 数値計算アルゴリズムの構築・実証分析

まず、(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する。ここでは、最適解の観測変数の閾値が制御変数に依存することに注意すれば、通常の準ニュートン法によるアルゴリズムで対応できると予想している。次に、実証分析によってモデルの有効性を明らかにする。分析の枠組みは、電力市場における投資問題を実証した Takashima et al. (2008)を利用する。ただし、設備投資問題特有の分析手法に関しては、水力発電の設備投資問題の実証研究 Bøckman et al. (2008)を参考にする。リアルオプション理論のモデルに対する実証分析は、データの入手困難性から難しいとされているが、経済産業省の企業金融調査、日本政策金融公庫の中小製造業設備投資動向調査などの設備投資に関するマクロデータを入手・加工して分析を試みる。

(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求める。インパルス制御とゲーム理論の融合は過去に例がなく、問題の性質からも分析は非常に複雑になることが予想されるが、競争環境におけるリアルオプション分析に関する研究業績を活用して目的の達成を目指す。

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) 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の解法について、より効率的な計算方法を考案した。平面上を制御変数の断面でカットし、その断面上のスイッチング問題に変換することで閉じた方程式系になり、数値計算を簡便にすることに成功した。さらに、利益関数に対する制約条件について調べた。下側制御のスムーズスペースティング条件を適切に変形することで、利益関数が逓増型でなければならないことが分かった。これは一般的な経済学の理論とは異なるため、さらなる調査が必要である。また、絶対的リスク回避度一定型利益関数下での数値計算では、ある市場価値でスイッチングが起きたとき、それが上側スイッチングか下側スイッチングかを問わず、ある1つのキャパシティレベルになるという結果が得られた。これは、ある1つの総生産の規模(1人当たり生産量)に対して、ある一定の総資本ストックの規模(1人当たり資本ストック)に収束するとされるソロー成長モデルと整合的である。この成果は、平成30年度数理解析研究所共同研究(公開型)他で発表した。
- (2) コーポレートファイナンスへの応用問題として、担保価値を確率過程とした2変数の構造モデルを構築し、負債再交渉下での最適なデフォルトと清算の戦略を分析した。2変数モデルによって、戦略的デフォルトと流動性デフォルトを区別できるようになり、さらに負債再交渉のクレジットスプレッドへの貢献を既存モデルよりも低く抑えることに成功した。この成果は、Review of Financial Economicsに掲載された。
- (3) 環境投資への応用問題として、再生可能エネルギー利用割合基準(RPS)の政策問題を分析した。非再生エネルギー事業者が存在する市場への再生エネルギー事業者の参入問題として定式化し、最適な投資タイミングとRPS割合を求めた。RPSを最適化しない場合は、RPS割合が増加すると投資機会が増加することを示した。さらに、RPSを最適化しない場合は不確実性が投資機会を減少させるが、RPSを最適化する場合は不確実性が投資機会を増加させることを示した。この成果は、INFORMS Annual Meeting 2016にて発表した。さらに、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直し、最適な投資タイミングとRPS割合を求めた。RPSを最適化しない場合は、初期RPS割合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。また、RPSを最適化する場合は、初期RPS割合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 他にて発表した。
- (4) 競争投資の応用問題として、レジームスイッチ下の投資競争問題を初めて分析した。レジ

ームスイッチの導入によって、収益性の劣る企業が先行する可能性があることを示した。また、リスクプレミアムについても分析し、競争下かつレジームスイッチ下のリスクプレミアムのダイナミクスを初めて明らかにした。さらに、リスクプレミアムに関する実証研究の結果を他の理論研究よりも正確な方法で裏付けることができた。この成果は、Journal of Banking and Finance に採択された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- [1] Goto, M., Nishide, K. and Takashima, R.: “Leaders, Followers and Equity Risk Premiums in Booms and Busts,” 査読有, Journal of Banking and Finance, 81, 207-220, 2017-8.
- [2] 後藤允: “リアルオプションの確率モデル”, 査読無, 京都大学数理解析研究所講究録 2029, ファイナンスの数理解析とその応用, 21-28, 2017-5.
- [3] 後藤允: “四則演算によるリアルオプション”, 査読無, リアルオプションと戦略, 9(1), 44-50, 2017-3.
- [4] Goto, M. and Fiyori Afeworki Negash: “The Effect of Microfinance Institutions in Growth and Development os Small Businesses,” 査読無, 経済学研究, 66(2), 67-90, 2016-12.
- [5] Goto, M., Takashima, R. and Tsujimura, M.: “Pollution Thresholds under Uncertainty in Asymmetric Duopoly,” 査読無, 京都大学数理解析研究所講究録 1983, ファイナンスの数理解析とその応用, 27-40, 2016-2.
- [6] Suzuki, H., Goto, M. and Ohno, T.: “A Model of Purchase Behavior under Price Uncertainty: A Real Options Approach,” 査読有, International Journal of Real Options and Strategy, 3, 1-12, 2015-12.
- [7] Goto, M. and Suzuki, T.: “Optimal Default and Liquidation with Tangible Assets and Debt Renegotiation,” 査読有, Review of Financial Economics, 27, 16-27, 2015-11.

〔学会発表〕(計 20 件)

- [1] 後藤允, 高嶋隆太: “Policy Decisions and Social Welfare in Renewable Portfolio Standards,” 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, 京都, 2018-11.
- [2] 後藤允, 金川聖也: “A Note on Impulse Control with Outside Jumps,” 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, 京都, 2018-11.
- [3] Goto, M. and Takashima, R.: “Policy Decisions and Social Welfare in Renewable Portfolio Standards,” INFORMS Annual Meeting 2018, Phoenix, 2018-11.
- [4] 後藤允: “投資と採算性評価”, 新事業・顧客価値の創造を実現する開発・技術戦略リーダー養成コース, 日本能率協会セミナー, 東京, 2017-12.
- [5] 後藤允, 高嶋隆太: “Real Options in Renewable Portfolio Standards,” 日本リアルオプション学会 2017 年研究発表大会, 金沢, 2017-11.
- [6] 後藤允, 高嶋隆太: “Real Options in Renewable Portfolio Standards,” 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, 吹田, 2017-9.
- [7] Goto, M. and Takashima, R.: “Real Options in Renewable Portfolio Standards,” 21st Conference of the International Federation of Operational Research Societies, Quebec City, 2017-7.
- [8] 後藤允: “投資と採算性評価”, 顧客価値を創造する開発・技術戦略リーダー養成コース, 日本能率協会セミナー, 東京, 2016-12.
- [9] 後藤允: “チュートリアル:リアルオプションの確率モデル”, 平成 28 年度数理解析研究所研究集会, ファイナンスの数理解析とその応用, 京都, 2016-11.
- [10] 後藤允: “チュートリアル:四則演算によるリアルオプション”, 日本リアルオプション学会 2016 年研究発表大会, 東京, 2016-11.
- [11] Goto, M. and Negash, F. A.: “How Microfinance Affects Growth and Development of Small Businesses in Eritrea?” 日本リアルオプション学会 2016 年研究発表大会, 東京, 2016-11.
- [12] Takashima, R. and Goto, M.: “Real Options in Renewable Portfolio Standards,” INFORMS Annual Meeting 2016, Nashville, 2016-11.
- [13] 後藤允, 高嶋隆太, 辻村元男: “The Effect of Environmental Regulation on Strategic Decision,” 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年秋季研究発表会, 山形, 2016-9.
- [14] Goto, M., Takashima, R. and Tsujimura, M.: “Environmental Regulation and Entry-Exit Decisions,” 20th Annual International Real Options Conference, Oslo, 2016-6.
- [15] Goto, M.: “Case Studies and Basic Methods for Sport Finance I-III,” Winter Workshop on Operations Research, Finance and Mathematics, 2016, Sahoro, 2016-2.
- [16] 後藤允: “投資と採算性評価”, 顧客価値を創造する開発・技術戦略リーダー養成コース, 日

本能率協会セミナー，東京，2015-12.

- [17]後藤允，高嶋隆太，辻村元男：“Pollution Thresholds under Uncertainty in Asymmetric Duopoly,”平成27年度数理解析研究所研究集会，ファイナンスの数理解析とその応用，京都，2015-11.
- [18]鈴木広人，後藤允，大野高裕：“A Model of Purchase Behavior under Price Uncertainty: A Real Options Approach,”日本リアルオプション学会2015年研究発表大会，南魚沼，2015-10.
- [19]後藤允：“On the Impulse Control Problem with Outside Jumps,”日本オペレーションズ・リサーチ学会2015年秋季研究発表会，北九州，2015-9.
- [20]Goto, M.: “On the Impulse Control Problem with Outside Jumps,” 5th International IMS-FIPS Workshop, New Brunswick, 2015-6.

〔その他〕

ホームページ等

(1) 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

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

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。