

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26330027

研究課題名(和文) 動的制度設計における理論基盤の創出

研究課題名(英文) Creation of Theoretical Foundation in Dynamic Mechanism Design

研究代表者

向谷 博明 (Mukaidani, Hiroaki)

広島大学・工学研究科・教授

研究者番号：70305788

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、需給均衡をリアルタイムで実現する新しい動的メカニズム設計の一端を担う理論的基礎を構築することを目指す。具体的には、まず、再生可能エネルギー等に見られる特有の発電時間変化や天候による発電特性を表す数理モデルをマルコフジャンプ確率システムによって構築する。その後、インセンティブシュタッケルベルグ階層戦略に基づき、フォロワーをリーダーのチーム最適解に誘因するロバストなオンライン誘因戦略を導出する。特に、時系列を組み込んだ動的平衡を達成する戦略設計アルゴリズムを得ることを目指す。これにより、需給均衡をリアルタイムで更新し、システムの安定した運転を確保することを目指す。

研究成果の概要(英文)：In this research, a theoretical foundation which is part of designing a new dynamic mechanism that realizes supply and demand equilibrium in real time is investigated. Specifically, first, a mathematical model expressing power generation characteristics due to abrupt change in power generation time and weather inherent in renewable energy is represented by Markov jump stochastic system. Second, based on the incentive Stackelberg hierarchical strategy, a robust online incentive strategy that induces followers to leaders' team optimal solutions is established. In particular, a strategy design algorithm that achieves dynamic equilibrium incorporating time series is derived. Finally, a novel strategy is proposed such that the supply and demand equilibrium ensuring stable operation of the system in real time are both attained.

研究分野：システム理論

キーワード：インセンティブ ナッシュ均衡戦略 パレート最適 シュタッケルベルグ戦略

1. 研究開始当初の背景

人は、その状況に応じて、自己の不利益を回避するために、正確な情報を伝えないことがある。例えば、利益を得るために「ウソ」の情報を流すことがある。しかし、継続的な取引や交渉をするときに、このような行動があまりにも頻繁に繰り返されれば、市場に深刻な影響を与える。このような状況を回避すべく、米国の経済学者であるレオニード・ハーウィッツ(Leonid Hurwicz)、エリック・マスキン(Eric Maskin)、ロジャー・マイヤソン(Roger Myerson)は制度設計(メカニズムデザイン)理論を提唱し、2007年にノーベル経済学賞を受賞した。近年の代表的な応用例としては、携帯電話の周波数割り当てに関するオークション制度、CO₂排出権取引、学校選択等のマッチングが報告されている。このように、現実の政策決定として採用されるようになり、実用性が非常に注目されている。

従来の化石燃料や原子力から、現在の太陽光や風力、地熱といった再生可能エネルギーへのシフトは、CO₂排出抑制や原発依存脱却という観点から、安心安全かつ持続可能な社会を実現する。しかしながら、自然環境の影響を受けやすく、供給量に不確実性のあるこれらのエネルギー源の拡大は、電力需給バランスの調整を困難にする。この問題を解決するために、再生可能エネルギーを始めとした多様なエネルギー源の既存の送電システムへの流量をリアルタイムに制御する必要がある。すなわち、電力を供給するための分散協調型システムの安定な運用とともに、電力需給調整を可能とするリアルタイム制度設計を確立することが急務である。具体的には、再生可能エネルギーの拡大にあたり、自然環境の影響や、従来、需要家であった一般家庭からの太陽光による発電の売電の増加による逆流(電力が発電所から家庭方向でなく、家庭から、既存の送電システムに逆流する)といった問題が新たに浮上してきた。その結果、既存のシステム理論に基づく電力供給安定化では、需給バランスや周波数を一定に保つ必要がある一方、動特性を十分に反映できず、時間的に先の目標を達成することが、非常に困難であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、まず、再生可能エネルギーによる電力供給の不確定要因となる時間や天候による発電特性を動的かつ確率・統計的に表現し得る数理モデルをマルコフジャンプ確率システムによって表現する。次に、近年飛躍的進歩を遂げ、その実用性が認知されるようになったメカニズムデザイン理論に着目し、インセンティブシュタッケルベルグ均衡戦略への理論拡張を行う。すなわち、近年、拡大が目覚ましい再生可能エネルギーを源とした電力の逆流による電力品質の低下を防ぐため、電力会社を階層ゲームにおけるリーダーと仮定する。一方、受給者でもあり

供給者でもある一般消費者をフォロワーと仮定し、インセンティブを与えることによって、消費者がどのような戦略をとろうとしても、リーダーのチーム最適戦略に誘引されるようなリアルタイム戦略決定アルゴリズムの獲得を目指す。これにより、電力需給均衡をオンラインで更新し、環境変動にロバスト(頑強)な電力システムの安定運用を確保することが可能となる。最後に、設計した階層戦略がどの程度実用に耐えうるか、あるいは得られた理論的予測が妥当かを検証するために、大規模シミュレーションによる信頼性・有用性の評価・検証を行う。

3. 研究の方法

まず、公庁、電力供給事業者や電力需要家などに対し、電力事業における既存の制度や規制、再生可能エネルギーによる発電事業の現状、利用状況やそれらのモデル化を調査する。また、海外、とりわけ、北米・北欧の再生可能エネルギーによる発電事業に対する制度設計やスマートグリッドの活用状況を調査する。さらに、主な再生可能エネルギーの発電設備、設備の特性、生産や普及状況などを調査する。また、マルコフジャンプ確率システムへの適用を行う。さらに、モデルの妥当性や欠点などを予め洗い出す。

続いて、様々な気象データをもとに、太陽光や風力発電に関する天候変動および発電量を一般的なマルコフジャンプ確率システムに置き換え、得られた新数理確率モデルを検討する。さらに、予期せぬ外部入力やモデル化誤差を確定的外部入力とみなし、 H 制御理論の適用も行う。続いて、インセンティブシュタッケルベルグ均衡戦略が適用可能な確率モデルの改良を行う。

引き続き、作成されたマルコフジャンプ確率システムを用いて、新しい階層戦略における電力需給問題に対し、誘因戦略が存在するための条件を記述する。特に、一つのリーダーと複数のフォロワーを仮定し、フォロワー同士は、ナッシュ均衡、パレート最適戦略に基づく需給均衡を獲得するための新戦略を仮定し、リーダーのチーム最適戦略に誘引させるインセンティブの導出を行う。このとき、半正定値計画問題を基盤とする数値最適化(数値計算)アルゴリズムを確立する。最後に、理論実現するための規約の作成を行う。

4. 研究成果

確率的環境変動および確定的外乱を考慮した連続時間マルコフジャンプ確率システムに対して、従来よりその理論の有用性が示されている混合 H_2/H 制御理論に基づく誘因シュタッケルベルグゲーム問題を解くことに成功した。既存の結果と異なり、再生可能エネルギー源が直結した電力需給システムその他、航空機システムのようなシステム環境やモデルそのものが確率的に変動しても、リーダーの所望の戦略に誘因することを可能とする階層戦略の導出を行った。これらの結

果は、メカニズムデザインにおける静的な結果から動的な拡張された基礎的理論結果と考えられる。具体的な成果として、マルコフジャンプ確率システムに対して、モデル化誤差に起因する確定的外部入力に対し、 H 制約を考慮したリーダーのインセンティブスタックベルグ戦略の存在条件を導出した。このとき、各プレイヤーの評価関数の最適性も保証される。得られた階層戦略は、大規模非線形連立型確率リカッチ方程式を解くことによって得られることを示した。さらに、インセンティブ構造は、フォロワーが協力型であるパレート戦略、もしくは非協力であるナッシュ均衡戦略のどちらを選択しても、最終的には、リーダーのチーム最適戦略に誘導されることが可能となることを示した。これらの理論的結果の有用性を示すために、再生可能エネルギー源が接続されたモデルの仮想システムである有限長通信連絡線モデルを基盤としたシミュレータにより、誘因シユタッケルベルグ戦略を数値的に解いた戦略によるシミュレーションを行った。その結果、インセンティブシユタッケルベルグ戦略集合が求められるという実現可能性と有効性を示すことに成功した。最後に、通常、フィードバック戦略を仮定しているが、実際は、そのような状況はまれであるため、出力フィードバック戦略による同一問題に対して、戦略が存在するための条件の導出も行った。一方では、複数リーダーに対しても同様な戦略存在条件を導出した。

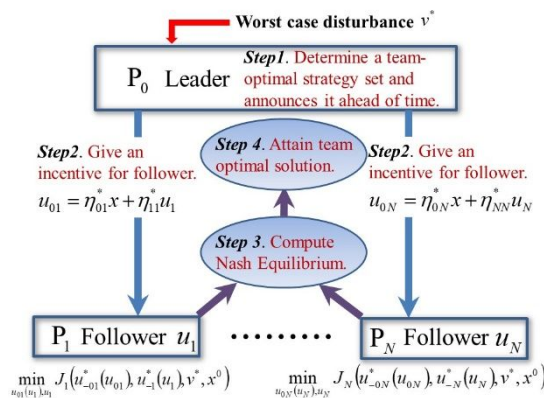


Fig.1 インセンティブシユタッケルベルグ戦略の概念図

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 10 件)

1. Hiroaki Mukaidani and Hua Xu, Differential Games for Weakly Coupled Large-Scale Linear Stochastic Systems with an H_∞ -Constraint, International Game Theory Review, 査読有, Vol. 20, No. 1, 1750025 (24 pages), DOI: 10.1142/S0219198917500256, 2018.
2. Hiroaki Mukaidani, Hua Xu, Tadashi Shima

and Vasile Dragan, A Stochastic Multiple-Leader-Follower Incentive Stackelberg Strategy for Markov Jump Linear Systems, IEEE Control Systems Letters, 査読有, Vol.1, No.2, pp.250-255, DOI: 0.1109/LCSYS.2017.2713879, 2017.

3. Hiroaki Mukaidani and Hua Xu, Open-loop Stackelberg Games for Stochastic Systems, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol.E100-A, No.4, pp.989-995, DOI: 10.1587/transfun.E100.A.989, 2017.
4. Hiroaki Mukaidani and Hua Xu, Infinite Horizon Linear-Quadratic Stackelberg Games for Discrete-time Stochastic Systems, Automatica, 査読有, Vol.76, March, pp.301-308, DOI: 10.1016/j.automatica.2016.10.016, 2017.
5. Hiroaki Mukaidani, Infinite-Horizon Team-Optimal Incentive Stackelberg Games for Linear Stochastic Systems, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol.E99-A, No.9, pp.1721-1725, DOI: 10.1578/transfun.E99.A.1721, 2016.
6. 向谷 博明, 三宅 利寛, 確率システムにおける有限時間ナッシュゲームの数値解, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol.135-C, No.7, pp.865-871, DOI: 10.1541/ieejieiss.135.865, 2015.
7. Hiroaki Mukaidani and Hua Xu, Stackelberg Strategies for Stochastic Systems with Multiple Followers, Automatica, 査読有, Vol.53, March, pp.53-59, DOI: 10.1016/j.automatica.2014.12.021, 2015.
8. Hiroaki Mukaidani, Hua Xu and Vasile Dragan, Decentralized H_2/H_∞ Control for Multi-channel Stochastic Systems, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol.60, No.4, pp.1080-1086, DOI: 10.1109/TAC.2014.2336354, 2015.
9. Hiroaki Mukaidani, Ryousei Tanabata and Chihiro Matsumoto, Dynamic Game Approach of H_2/H_∞ Control for Stochastic Discrete-Time Systems, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol.E97-A, No.11, pp.2200-2211, DOI: 10.1578/transfun.E97.A.2200, 2014.
10. 向谷 博明, 離散時間確率 H_2/H_∞ 制御問題を解くための数値計算, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.50, No.6, pp.506-508, 2014.

[学会発表](計 15 件)

1. Hiroaki Mukaidani, Ippo Ishibashi and Shouhei Furuya, Pareto Optimal Control for

- Uncertain Markov Jump Linear Stochastic Systems, 4th Int. Conf. Control, Dynamic Systems, and Robotics, No.102, Toronto, Canada, August, 2017.
2. Hiroaki Mukaidani, Masaru Unno, Hua Xu and Vasile Dragan, Gain-Scheduled Nash Games with H_∞ Constraint for Stochastic LPV Systems, 20th IFAC World Congress, IFAC PapersOnLine 50-1, pp.1478-1483, Toulouse, France, July 2017.
 3. Hiroaki Mukaidani, Tadashi Shima, Masaru Unno, Hua Xu and Vasile Dragan, Team-optimal Incentive Stackelberg Strategies for Markov Jump Linear Stochastic Systems with H_∞ Constraint, 20th IFAC World Congress, IFAC PapersOnLine 50-1, pp.3780-3785, Toulouse, France, July 2017.
 4. Hiroaki Mukaidani, Mostak Ahmed, Tadashi Shima and Hua Xu, H_∞ Constraint Incentive Stackelberg Game for Discrete-Time Stochastic Systems, American Control Conf., pp.5257-5262, Seattle, WA, May 2017.
 5. Hiroaki Mukaidani, Gain-Scheduled H_∞ Constraint Pareto Optimal Strategy for Stochastic LPV Systems with Multiple Decision Makers, American Control Conf., pp.1097-1102, Seattle, WA, May 2017.
 6. Hiroaki Mukaidani, Nash Equilibrium Strategy for Uncertain Markov Jump Linear Stochastic Systems with Multiple Decision Makers, SIAM OP17, CP3 Optimal Control, Vancouver, BC, Canada, May 2017.
 7. Hiroaki Mukaidani and Mostak Ahmed, Group Differential Game Approach of H_2/H_∞ for Large-Scale Linear Stochastic Systems, American Control Conf., pp.2959-2964, Boston, MA, July 2016.
 8. Hiroaki Mukaidani, Hua Xu, Vasile Dragan and Toru Yamamoto, Finite-Horizon Dynamic Games for a Class of Nonlinear Stochastic Systems, 54th IEEE Conf. Decision and Control, pp.519-524, Osaka, Japan, December 2015.
 9. Hiroaki Mukaidani, Mostak Ahmed and Hua Xu, Finite Horizon H_∞ Control for Stochastic Systems with Multiple Decision Makers, 54th IEEE Conf. Decision and Control, pp.513-518, Osaka, Japan, December 2015.
 10. Hiroaki Mukaidani, Finite-Horizon Closed-Loop Nash Game for Stochastic Large-Scale Systems with Multiple Decision Makers, American Control Conf., pp.1481-1486, Chicago, IL, July 2015.
 11. Hiroaki Mukaidani and Toru Yamamoto, Finite-Horizon H_2/H_∞ Control for Discrete-Time Stochastic Systems with Multiple Decision Makers, American Control Conf., pp.1493-1498, Chicago, IL, July 2015.
 12. Hiroaki Mukaidani, H_2/H_∞ Control Problem for Stochastic Delay Systems with Multiple Decision Makers, 53rd IEEE Conf. Decision and Control, pp.2648-2653, Los Angeles, CA, December 2014.
 13. Hiroaki Mukaidani, Stackelberg Strategy for Discrete-Time Stochastic System and Its Application to Weakly Coupled Systems, American Control Conf., pp.4506-4511, Portland, OR, June 2014.
 14. Hiroaki Mukaidani, Stackelberg Strategy for Discrete-Time Stochastic System and Its Application to H_2/H_∞ Control, American Control Conf., pp.4488-4493, Portland, OR, June 2014.
 15. Hiroaki Mukaidani, Chihiro Matsumoto and Ryousei Tanabata, Nash Game Approach of H_2/H_∞ Control for Stochastic Discrete-Time Systems with (x,u,v) -Dependent Noise 5th Int. Symp. Advanced Control of Industrial Processes, pp.43-48, Hiroshima, May 2014.
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/ami>
- 6 . 研究組織
(1)研究代表者
向谷 博明 (MUKAIDANI HIROAKI)
広島大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70305788