

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 年度 ～ 2012 年度

課題番号：20530214

研究課題名（和文） ゲーム理論の枠組みを用いた電力取引市場における価格形成モデルとその政策への適用

研究課題名（英文） Game Theoretic Pricing Models for Electricity Markets and Applications to Economic Policy

研究代表者

石井 昌宏 (ISHII MASAHIRO)

上智大学・経済学部・准教授

研究者番号：90323881

研究成果の概要（和文）：本研究課題の主結果は次の通りである。電力需用量が不確実に変動し、発電企業が戦略的に行動するという仮定において、電力取引市場における価格評価モデルを構築した。各価格評価モデルにおいて均衡価格について考察した。さらに、これら諸モデルの中のある電力スポット均衡価格を用いて電力価格と取引量という 2 種類の時系列データから市場支配力を計測・分析する枠組みも開発し、Pennsylvania New Jersey and Maryland (PJM) market および California Power Exchange market (1998-2000) を分析した。

研究成果の概要（英文）：In this study, models for analysis of electricity markets are developed. Under the assumptions that quantity of electricity demand is uncertain and power generators use information on the distribution to choose supply functions strategically, equilibrium price formulae are derived and examined. Based on the one of equilibrium price models, a framework for measuring and investigating market power in electricity markets is constructed. When you use the framework for assessing the market performance, you need only two time series data sets, spot prices and trading volumes. Indeed, it is applied to analyze PJM market and California Power Exchange market (from 1998 to 2000).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	700,000	210,000	910,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：社会科学

科研費の分科・細目：経済学・応用経済学

キーワード：産業組織論，電力取引市場，貯蔵不可能性，市場支配力，資産価格評価，経済政策，ゲーム理論。

1. 研究開始当初の背景

イギリスのイングランド・ウェールズで

1990年に実施された発電と送電の分離に端を発する電力産業の制度改革において、電力取引市場が諸外国および日本において開設されてきた。この制度改革は市場による価格評価システムの適用範囲拡大という現代の経済における一つの潮流に位置づけられるであろう。この潮流の根幹には、「ある仮定の下では、完全競争市場における資源配分が最も効率的である」というミクロ経済学における最も重要な諸結果の一つが横たわっていることは明らかである。もちろん、現実の諸問題に共通するある部分に焦点を絞ったシンプルな分析や議論において、この結果(より正確にはこの結果を導出するモデル)は強力なツールとなり得る。ただし、分析対象に依存して注意を要する場合もある。現実の諸製品や諸サービスに広く共通する性質を抽出したモデルにおいて上述の結果が得られている。したがって、現実の市場においては、モデル化において捨象された諸要因が市場成果へ大きく影響する場合もある。

そして、電力取引市場もその一つと考えられる。例えば、Wolfram(1998)や Borenstein et al.(2002)などの研究において、電力という財の特性(非弾力的需要、キャパシティ制約、貯蔵不可能性)などに起因して市場支配力が発生することが指摘されている。

これまで、電力取引市場における市場支配力の分析に用いられた代表的な方法はクールノー・モデルの応用と供給関数アプローチである。クールノー・モデルを基礎とする研究の代表例が Borenstein and Bushnell(1999)である。供給関数アプローチを基礎とする研究の代表例が Green and Newbery(1992)である。いずれのモデルにも長所と短所がある。供給関数アプローチの嚆矢は Klemperer and Meyer(1989)である。このモデルでは、より現実的な各発電企業の戦略的行動を描出するという点において優れている。しかし、このモデル一般において、均衡の供給関数を解析的に導出することが困難であり、しかも、複数の解が存在する場合も多いようである。クールノー・モデルにおいては、発電企業の戦略的行動の描出という点において優れているとはいえない。また、いずれのモデルにおいても不確実性を考慮に入れるという点に変更の余地がある。さらに、これらのモデルを用いて現実の市場における市場支配力を計測・分析する際には、様々なデータ(一部には入手が極めて困難なデータ)を必要とする。また、データ分析に際して、モデルそれ自身との整合性が不明確な仮定が追加されることもある。

これらのことから、次の諸性質をみたすモデルを開発することの意義は大きいと考えた。

(1)不確実性下における発電企業の戦略的行動

が表現されている。

(2)均衡を解析的に(明示的に)求められる。もし可能であれば、解が一意である。

(3)そのモデルを用いて現実の市場の市場支配力を計測・分析する際に必要となるデータの種類のできる限り少ない。もし可能ならば、公開データのみで分析可能である。

[1] Borenstein, S., and Bushnell, J.B.(1999), "An Empirical Analysis of the Potential for Market Power in California's Electricity Industry," *The Journal of Industrial Economics*, Vol. 47, pp. 285-323.

[2] Borenstein, S., Bushnell, J.B., and Wolak, F. A.(2002), "Measuring Market Inefficiencies in California's Restructured Wholesale Electricity Market," *American Economic Review*, Vol.92, pp.1376-1405.

[3] Green, R. J., and Newbery, D.(1992), "Competition in the British Electricity Spot Market," *The Journal of Political Economy*, Vol. 100, pp. 929-953.

[4] Klemperer, P., D., and Meyer, M. A.(1989), "Supply Function Equilibria in Oligopoly under Uncertainty," *Econometrica*, Vol. 57, pp. 1243-1277.

[5] Wolfram, C. D.(1998), "Strategic Bidding in a Multiunit Auction: An Empirical Analysis of Bids to Supply Electricity in England and Wales," *RAND Journal of Economics*, Vol.29, pp.703-725.

2. 研究の目的

本研究課題申請時における研究目的として次に述べる内容を想定していた。

(1) 本研究課題で用いるモデル(この基本モデルの説明については次節「3. 研究の方法」を参照されたい)の範囲内においてより一般的な寡占市場の仮定の下で、Nash 均衡を導出する。さらに、その結果を用いて現実の取引市場における市場支配力の程度を計測し、その要因を分析する。

(2) 本研究課題で用いる非協力ゲームにおいては、各プレイヤーの将来利潤の α -quantile を利得関数に用いている。一方、この非協力ゲームにおいて各プレイヤーの将来利潤の期待値を利得関数として用いることも可能である。これらのゲームにおける Nash 均衡の関係を明確にする。

(3) 本研究課題の基本モデルに対して、その発電企業のストラテジーへ電力デリバティブ取引も加えるという拡張を行う。そして、電力デリバティブ市場と市場支配力の関係を分析する。特に、電力フォワード取引を発電企業の戦略へ加える場合について、非協力ゲームの枠組みにおける企業行動モデルを構築する。そして、その Nash 均衡を導出し、

その Nash 均衡における電力スポット価格および電力フォワード価格を求める。これらの結果を道具として、電力フォワード取引市場の存在が市場支配力抑制効果を持つか否かについて議論する。

3. 研究の方法

本研究課題において、その分析に主に用いた基本モデルを説明する。なお、過度な複雑さを避けるため 1 期間モデル(期間の初めを 0 時点、期間の終わりを 1 時点とする)を用いた。

電力取引市場において複数の発電企業が電力を供給する。ここで、発電企業が電力を需要することは考慮しないこととした。各発電企業の限界費用関数はある単調増加関数を用いて表されていると仮定する。

まず、0 時点における各発電企業の行動を説明する。各発電企業は「1 時点の供給に関する供給関数」を市場へ提示する。このとき、各発電企業が市場へ提示する供給関数は各発電企業の限界費用関数と一致するとは限らない。限界費用関数以上となる関数から構成されるある集合から供給関数は選択されることとする。そして、これらの供給関数を合計することにより市場全体の供給関数が作成される。

次に、1 時点において生ずる取引を説明する。1 時点で電力需用量が判明する。ただし、0 時点において、「1 時点で判明する電力需用量の確率分布」についての情報のみを発電企業は持っていることとする。「1 時点において実現した電力需用量」と「0 時点で作成された市場の供給関数」を用いて、電力価格が定まる。さらに、その価格と各発電企業が 0 時点で提示した供給関数から、各発電企業の供給量も定まる。

この設定において、0 時点において、各発電企業は戦略的意思決定に基づき(1 時点における供給に関わる)供給関数を市場へ提示する。この提示にあたっては、1 時点の電力需用量の確率分布と他の発電企業の戦略が考慮される。また、各発電企業は「1 時点における自社の利潤の確率分布の α -quantile」を最大にすることを目的とする。すなわち、供給関数を純戦略の集合とし、利得関数を「1 時点における自社の利潤の確率分布の α -quantile」とする戦略型ゲームを考える。

ここで、限界費用関数および供給関数の範囲を限定することにより、Nash 均衡を求める。そして、その Nash 均衡および Nash 均衡における電力スポット価格を基に考察を行った。なお、このモデルの特徴の一つとして、電力需用量の確率分布を仮定しないことをここでは挙げておく。求められる Nash 均衡

は電力需用量の確率分布の α -quantile には依存する。しかし、その導出方法は電力需用量の確率分布には依存しない。さらに、Nash 均衡における電力スポット価格において、電力需用量の確率分布への依存はその α -quantile のみである。したがって、このモデルの価格を用いたデータ分析において、適用できる電力需用量の確率分布の範囲は極めて広い。この意味で、このモデルは頑健(robust)である。

4. 研究成果

(1) 同質的ではない(heterogenous)2 社から構成される複占市場を仮定する。ただし、各発電企業の限界費用関数を 1 次関数とし、市場へ提示する供給関数をその上方への平行移動とする。そして、「3. 研究の方法」で説明した非協力ゲームの Nash 均衡を求め、その Nash 均衡における電力スポット価格も導出した。この電力スポット価格を用いて、mark-up についての考察を行った。なお、このモデルは手塚・石井(2006)の拡張にあたる。

(2) 同質的ではない(heterogenous)2 社から構成される複占市場を仮定する。ただし、発電企業 j の限界費用関数を $f_j(x)=e^{a_jx+b_j}$ とし、市場へ提示する供給関数を $g_j(x, \lambda_j)=e^{a_jx+b_j+\lambda_j}$ とする。そして、「3. 研究の方法」で説明した非協力ゲームの Nash 均衡が存在するための必要十分条件を求めた。さらに、Nash 均衡が存在する場合には一意であることも示した。なお、このモデルは Tezuka and Ishii(2007)の拡張にあたる。

(3) 同質的な(homogeneous)n 社から構成される寡占市場を仮定する。ただし、各発電企業の限界費用関数を 1 次関数とし、市場へ提示する供給関数をその上方への平行移動とする。そして、「3. 研究の方法」で説明した非協力ゲームの Nash 均衡がただ一つ存在することを示し、それを具体的に求めた。その Nash 均衡における電力スポット価格も導出した。さらに、このモデルを用いて PJM および California(1998-2000)における市場支配力について分析した。このモデルを用いることで、価格と取引量という 2 種類の時系列データのみから市場支配力を計測することができることもここに記しておく。このモデル(データ分析方法を除く)もやはり手塚・石井(2006)の拡張にあたる。なお、このモデルは「1. 研究開始当初の背景」の最後に述べた 3 条件をみたすモデルの一つであることもここに記しておく。

(4) 「3. 研究の方法」で説明した基本モデ

ルに対して、電力フォワードも戦略に加えた場合についても一つの成果を得た。これを具体的に説明する。同質的な(homogenous)2社から構成される複占市場を仮定する。ただし、各発電企業の限界費用関数を1次関数とし、市場へ提示する供給関数をその上方への平行移動とする。さらに、各発電企業にはフォワードの売りポジションが許されていることとする。これらの仮定において、各発電企業をプレイヤー、供給関数とフォワードのポジションを戦略、将来の利潤の α -quantileを利得関数とする非協力ゲームのNash均衡を求めた。そして、フォワード取引においては、フォワード価格がある値以上であれば、各発電企業は自社の限界費用関数に沿ってフォワードポジションを形成して行くことが示された。

(5) 電力取引市場における供給力確保に対して、「発電企業がコールオプションの売りポジションを持つこと」の有効性に関わる研究についてもその一部に成果を得た。このモデルにおいても、同質的な(homogenous)2社から構成される複占市場を仮定する。ここでは「限界費用関数にmark-upを上乗せするような形の供給関数を発電企業が市場へ提示する」というモデル化をしていない。発電企業は限界費用関数そのものを市場へ提示するが、その限界費用関数の形状は発電企業が戦略的に選択した発電設備に依存するという仮定をおいた。

(6) これらの他にも、本研究課題を遂行する過程で得られた副産物へ修正を施して、shipping freight rateや港湾間競争を分析するモデルを構築した。また、本研究課題における予備的データ分析結果から派生して、ある産業に関わる制度とその産業に属する企業の株価の関係にも分析は及んだ。これに関してもある一定の研究成果は得られたと考えている。

[1] Tezuka, K. and Ishii, M. “A Game Theoretical Analysis of the Spot Prices in Wholesale Electricity Markets,” The 30th Annual IAEE Conference.

[2] 手塚広一郎・石井昌宏(2006), 『電力取引市場におけるマイクロストラクチャー』, 公益事業研究, Vol.58, pp.83-89.

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)

[1] 石井昌宏(2013), 『電力取引市場における供給力確保とコールオプション』, 上智経済

論集, Vol.58, pp.265-275. 査読無

[2] Ishii, M., Lee, P. T. W., Tezuka, K. and Chang, Y. T.(2013) “A game theoretical analysis of port competition,” Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review Vol. 49, pp. 92-106. 査読有

[3] Tezuka, K., Ishii, M. and Ishizaka, M.(2012), “An equilibrium price model of spot and forward shipping freight markets,” Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 48, pp.730-742. 査読有

[4] Tezuka, K., Ishii, M. and Ishizaka, M.(2012), “Relationship between CAPM- β and market changes in the Japanese liner shipping industry,” Maritime Policy and Management, Vol. 39, pp.297-319. 査読有

[5] Ishii, M. (2011), “Nash Equilibrium in a Duopole Electricity Market,” 上智経済論集, Vol.56, pp.27-41. 査読無

[6] Ishii, M. (2008), “A Duopoly Model for Electricity Spot Prices,” 経営論集, Vol.16, pp.113-124. 査読無

〔学会発表〕(計10件)

[1] Ishizaka, M., Ishii, M. and Tezuka, K.(2012/9/7), “Assessing the risk attitude in shipping freight markets,” 2012 IAEE Conference(Taipei, Taiwan)

[2] Ishizaka, M., Tezuka, K., and Ishii, M.(2012/6/26), “Systematic risks and market changes in the Japanese electricity industry,” The 35th Annual IAEE International Conference(Perth, Australia).

[3] Ishii, M., and Tezuka, K.(2012/2/20), “Strategic Behavior and Mark-Ups in an Electricity Market,” The 3rd IAEE Asian Conference, Kyoto University(Kyoto, Japan).

[4] Ishii, M., and Tezuka, K.(2011/10/11), “Assessing the Impact of Strategic Behavior on Spot Prices in an Electricity Market,” The 30th USAEE/IAEE North American Conference, (Washington, DC, USA).

[5] 手塚広一郎・石井昌宏(2010/6/13), 『電力取引市場における戦略的行動と価格決定』, 公益事業学会第60回大会, 北海学園大学(北海道).

[6] 石井昌宏・手塚広一郎(2010/3/7), 『 n 社寡占の電力取引市場におけるスポット価格評価』, 日本応用数理学会2011年研究部会連合発表会, 電気通信大学(東京都).

[7] 石井昌宏・手塚広一郎(2009/12/13), 『電力取引市場における先渡し価格評価の枠組

み』,日本リアルオプション学会, 信州大学(長野県).

[8] Ishizaka, M., Tezuka, K., and Ishii, M.(2008/11/7), “The Effects of the Regulatory Reform on Market Risk in the Japanese Electricity Industry”, The 2nd IAEE Asian Conference.

[9] Ishii, M. and Tezuka, K.(2008/11/7), “A Study on an Asset Valuation Framework for Electricity Markets”, The 2nd IAEE Asian Conference.

[10] Ishii, M. and Tezuka, K.(2008/6/18), “A Study on a Non-cooperative Game Theoretic Pricing Framework in a Oligopolistic Electricity Market”, The 31st IAEE Conference(Istanbul, Turkey).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井昌宏 (ISHII MASAHIRO)
上智大学・経済学部・准教授
研究者番号：90323881