

マルチエージェントシミュレーションを用いた アメリカ電力市場取引戦略の Q 学習モデル

千葉大学工学部三年：金高太輝
指導教員：荒井幸代

本研究ではアメリカの電力市場を取り上げる。1999 年から 2001 年にかけて、カルフォルニア州では停電が頻発した。その原因として、電力送電網における不備のほかにアメリカの電力市場で採用されているプール取引での大規模業者による値段操作のための供給量低下がある。そこでアメリカで失敗したプール市場を取り上げ、電力会社の価格設定戦略に Q 学習を導入し、市場価格の変動と各企業の損益に与える影響を考察する。
キーワード Q 学習, 電力自由化, マルチエージェントシミュレーション。

1 本研究の背景, 目的

1999 年から 2001 年にかけてアメリカでは停電が頻発し、大手電力会社が倒産、州政府が自ら電力を購入する非常事態に陥った。この電力危機の背景には倒産したエンロンの電力市場での価格操作が背景にあったとの疑いが浮上した。アメリカのように電力自由化の先行諸外国では市場を介して様々な電力取引が行われているが、その中でも卸電力市場の価格変動が大きな問題になっている。

日本では 2005 年 4 月の電気事業法改正により全国に 10 ある電力会社の総販売量のうち 6 割が自由化の対象になった。そして同時に日本で最初の卸売電力取引所である日本卸電力取引所 (JEPX: Japan Electric Power eXchange) が開設された。

そこで本研究ではエンロンのように大規模会社が電力市場を支配することを防ぐという目的のため、卸電力取引での価格変動の定量的な分析、評価を行う電力市場シミュレーションの基本モデルを開発し、その基本動作の検証を行う。

以下第 2 章では問題設定、アプローチを、3 章では実験方法と結果を示し、その考察を述べる。第 4 章では結論と今後の課題をまとめる。

2 問題設定, アプローチ

2.1 問題設定

電力危機発生前のカリフォルニアの電力取引の形態は電力会社の発電部門や IPP (独立系発電事業者) が電力を全て一度市場に送り、市場で取引をして供給する強制プール市場というものであった。本研究ではこのプール市場の企業の価格設定に着目する。

【プール市場】

翌日に受け渡す電力を 30 分単位で 24 時間分、合計 48 時間帯の商品として売買する市場である。図 1 にプール市場の市場決定価格の決定方法を表す。図 1 の縦軸が提示価格 (\$/mWh)、横軸は電力の量(mW)を表す。**価格決定方法**は全電力の入札額を元に提示価格の安い順に電源を並べ、総需要を満たすまでの電力が落札され、この時の落札価格が市場の落札価格(市場決定価格)となるシンプルプライスオークション方式である

2.2 電力会社のエージェントモデル

本研究では各電力会社の価格を決定するエージェントを考える。エージェントは自社が供給する電力を市場に全て投入する。一方、市場は電力の需要量を決定する。ここでは発電側の電力会社を小規模、中規模、大規模の三種類とし、それぞれエージェントを割り当てる。

【予備実験】 各エージェントの提示価格と供給量を表 1 に示す

値に設定し、各電力会社が Q 学習を用いずに、単純な価格決定方法を用いた場合の市場価格の変動を観察するための予備実験を行った。各企業の利益、損失、損益の三つの値を用いてエージェントの価格設定の効果を評価する。

表 1 各会社の売値供給量

	提示価格 (\$/mW)	供給量 (×10mW)
小規模	50	15
中規模	100	30
大規模	200	60

市場価格の決定:

- 1)各エージェントは提示価格と供給量を提示する。
- 2)市場はプール市場に習い、1)に基づいて提示価格順に並べ、需要に到達した時点の売値を市場決定値として出力する。**利益**は供給した電力が完売した場合には供給量と市場決定価格の積、完売しなかった場合には売れた分だけの供給量と市場決定価格の積、全く売れなかった場合は 0 とする。**損失**は利益とは逆に、完売の場合は 0、売れ残った場合には、売れ残った供給量と提示価格の積、全く売れなかった場合は供給量と提示価格の積とする。**損益**は利益と損失の和とする。一方、**需要量**は(1)式を用いて決定する。

$$DQ' = \theta DQ \quad (1)$$

(1)式で、 DQ は前回の需要量、 DQ' は需要量、 θ は前回の決定価格で決めることとし、需要の初期値を 100 とする。基準金額を、需要が 100 で一定とした時のモデルの売値の平均値 122 に設定する。決定価格が 122 以上なら $\alpha = 101/100$ 、以下なら $100/101$ とする。**提示価格**は(2)式を用いて変化を与えた。

$$PP' = \beta PP \quad (2)$$

(2)式で PP' を提示価格, PP を前回の提示価格, β は前回の損益によって変動する. 損益がプラス変化なら 101/100, マイナス変化なら 100/101 とした. 供給量は不変とする. この結果得られた市場決定価格を図 2 に示す. 図 2 の横軸はステップ数, 縦軸は価格を表す. 需要量が供給量を下回る場合には値段はどんどん上がっていく. しかし価格が高くなっても需要量の変化が小さいという特徴を持つ電力市場において, 消費側は高い市場決定価格で電力を買わざるをえない. また, 供給量が需要量を越えれば売れ残り分が多くなる可能性のある大規模会社も損失が多くなり損益をあまりあげられない

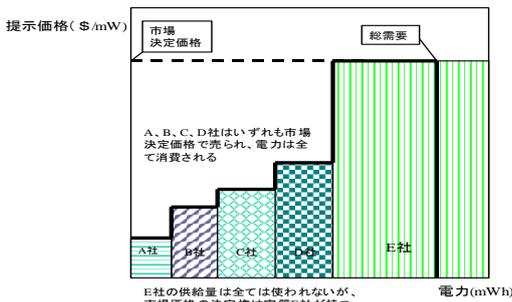


図 1 市場価格決定

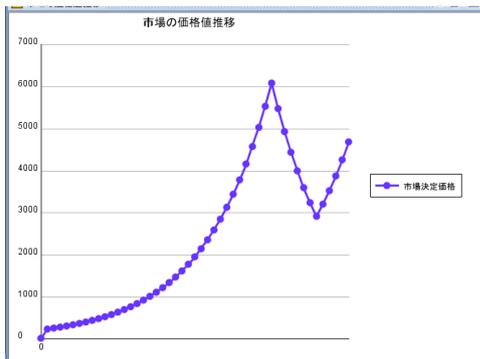


図 2 市場価格の変異

3 提案手法 : Q 学習による価格決定モデル

3.1. エージェントの学習

2.2 節の予備実験の結果, 単純な価格決定で損益を安定的に高く維持することは難しい. そこで, 損益を最大化するために発電エージェントの売値を Q 学習に基づいて決定する. (3)式に基づいて価格を決定する.

$$PP' = PP + \alpha(r + \gamma \max PP - PP) \quad (3)$$

PP は前回の提示価格, $\max PP$ は過去の損益最大時の提示価格, r は前回の取引の結果, 完売時には 5, 売れ残り時は -1 また学習率 α と割引率 γ の値はそれぞれ $\alpha = 0.1, \gamma = 0.9$ とした. また, 供給は(4)式に基づく.

$$SQ' = SQ + \epsilon \quad (4)$$

ϵ は前回の需要量によって変化する. 需要量が多くなったら 101/100, 小さくなったら 100/101 とした. 需要量は 2.2 の設定と同じ決定方法だが基準金額として 138 を用いた.

3.2. 実験結果および考察

会社ごとの利益では最初に設定された売値と供給量通り出力

するので規模の大きい順に高くなる. しかし市場決定価格が 138 を切ると小, 中, 大規模会社いずれも緩やかな上昇になるという結果になった. この様子を図 3 に示す. 縦軸は利益, 横軸はステップ数である.

また損失においては現実の電力市場の必要電力と各会社の供給量は極端に変わらないという特性ゆえ小規模, 中規模会社は 0 で大規模会社だけ値があるという結果になった. 基本的に緩やかな下降だがここでも市場決定価格 135 を切った時点で値が上昇した. これは需要量が上昇したことにより小規模, 中規模の会社の供給量が上がり大規模会社の供給が余った為と考えられる.

また損益は大規模, 中規模, 小規模の順に大きくなった. 平均市場決定価格は 139 となり, 各ステップずつの決定価格は大規模会社の提示価格となった. これは 48 ステップ内では必要電力が大規模会社なしで補えるほどに変化せず, どうしても大規模会社の供給を市場が受けることになり最大価格として提示した大規模会社の提示価格が反映される結果となった. 価格の変動は図 4 で損益は図 5 表わす.

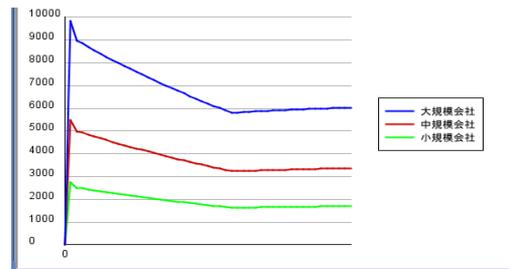


図 3 各会社の利益

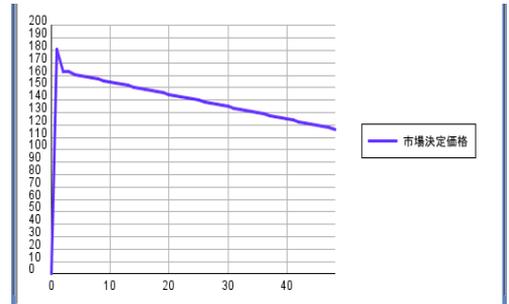


図 4 市場決定価格

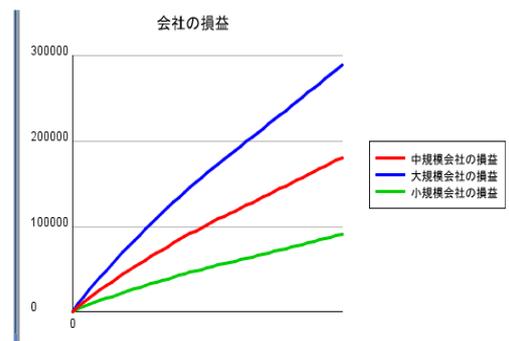


図 5 損益の変動

3.3. 市場の規模の変化

実際の市場に近づけるためにエージェントの数を6社に増やした。各会社の規模は以下の表の通りである。

表のように同じ小規模、中規模、大規模でも(1)より(2)の提示価格、供給量を大きく設定する。

供給量、提示価格、需要量の出力の仕方は3.1と同様とするが需要量の初期値は3.1の需要量と総供給量の比率と同じくするために300(×10MW)とした。

表2 各会社の規模

	提示価格 (\$/mW)	供給量 (×10mW)
小規模(1)	50	15
小規模(2)	75	30
中規模(1)	100	45
中規模(2)	125	60
大規模(1)	150	75
大規模(2)	200	90

3.4.市場規模変化後の実験結果および考察

各会社の損益は大規模(2)が大規模(1),中規模(2)よりも損益が上げられないことがわかった。その理由としては大規模(2)の損失額が全エージェントの中で一番多いからといえる。前回の実験では大規模会社が一番損益を得ることが出来たが、今回は会社間の提示価格、供給量の値が近く大規模会社の損益とその他の会社の損益との値の差が小さく、大規模(2)の損失によりその差が埋められ大規模(1)と中規模(2)の損益が上回ったと考えられる。

また市場決定価格に関しては大規模(2)に決定権がある事がわかる。これを図6で表す。しかし平均決定価格は127と3.1の実験時よりも低くなった。理由としては会社が多くなったことで自社の供給量を全て売るのが難しくなったことがあげられる。各会社が提示価格を下げる事によりおこったと考えられる。

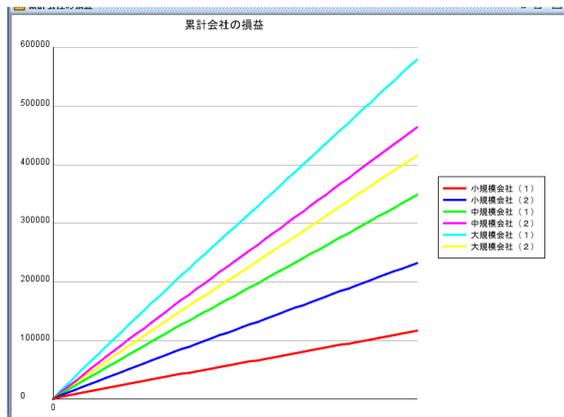


図6 規模変化後の各会社の損益

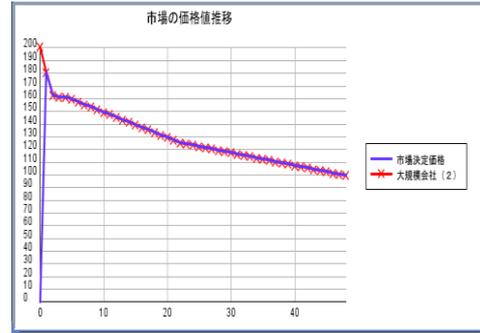


図7 規模変化後の大規模会社(2)と市場決定価格の比較

4.結論および今後の課題

Q学習を用いることで大規模会社がプール市場では圧倒的に大規模会社が取引の主導権を持ち、市場を支配しているということを再現することが出来た。またエージェントを増やすことで実際のカリフォルニア州の電力市場での取引会社を再現することが出来た。(当時のカリフォルニア州での電力会社の発電部門は6社である。)

また本実験では市場に一般市民の声を反映させる意図で市場決定価格に138という基準点を設けた。各会社は一つ次のステップ(実際の市場においては30分先の取引)で最大の利益が出るように供給量や提示価格を決めそれを市場に出している。しかし実際の市場では確実に売るために提示価格を0で供給する、大規模会社が供給をストップし、市場の電力価格が高騰するという問題もある。電力発電は一度ストップすると再度電気を作るまで時間がかかる。さらに電気は貯蔵しておけないので足りない分を他から補うということではできない。したがって、実際は長期の経営方針を元に電力市場での行動を決めていると考えられる。今後の課題としては長期経営方針を考慮した学習モデルエージェントを作ること考えている。

電力自由化に向けて、相対取引を多用する等の解決策もあるがプール取引を改善し会社間の質、値段、技術競争を促進させることが大切になっていくと思われる。カリフォルニア州のような失敗をしないために市場に新たな制約、システム構築を加えることが大切である。

参考文献

- [1] 山影進:人工社会構築指南,書籍工房早山,2007
- [2] 吉田紀彦:やわらかい情報処理,サイエンス社,2003
- [3] 大田弘子:ネットワーク事業(電力・都市ガス・航空等)の競争政策ー海外の経験に学ぶことー,経済財政分析ディスカッション・ペーパー・シリーズ,2003
- [4] 長山浩章:世界の自由化は今,日本電気協会新聞部,2004