

東京大学大学院新領域創成科学研究科

基盤科学研究系

先端エネルギー工学専攻

2004 年度修士論文

マルチエージェントモデルを用いた  
自由化された電力市場における  
発電事業者の行動分析

Analysis on Generator Company Behaviors  
in Electricity Market using Multi-Agent Model

学籍番号 47-36201

氏名 稲垣 憲治

指導教員 山地 憲治 教授

(2005 年 2 月 14 日提出)

## 内容梗概

1970年代以降世界的に電気事業の規制緩和が進行している。日本においても段階的に自由化範囲が拡大され、2005年4月からは50kW以上の電力が自由化される予定である。

しかし、電力は、生活の基盤となる、需要が周期的に大きく変動する、電力を使用すると同時に発電を行わなければならないというように、通常財とは異なる特徴を持つ。そのため、通常の市場原理を安易に導入することは極めて危険である。実際に2000年のカリフォルニアでは供給力が不足し、電力危機が起こってしまった。このように、市場の制度設計を誤った時に生じる社会的損失は大きい。このことから、自由化に対しては多角的な議論及び研究が必要であるといえる。

市場における電力価格は、従来の総括原価方式と異なり、自らの利益を最大化する複数の意思決定者によって戦略的に入札が行われた結果形成される。そこで、自由競争下における電力市場の動きを分析するために、市場参加者を自律的意志決定主体であるエージェントと見なし、市場の動向を各エージェントの相互作用を通してボトムアップに評価するマルチエージェントモデルを採用した研究が注目されている。しかし、従来のマルチエージェントモデルを用いた先行研究は静的なものであり、発電事業者の市場への入退場などの動的な要素は考慮されていなかった。そこで本研究では、利益が出ている発電事業者は増設を、損失を出している発電事業者は市場からの撤退を可能にする電力市場モデルを構築し、種類別発電事業者の入退場を考慮した電力市場分析を行う事により、発電事業者の行動及び市場の動きを解析した。

また、2005年4月から日本卸電力取引所(JEPX)が取引を開始する事を受け、JEPXの市場アルゴリズムを用いて、連系線で結ばれた2地域を対象における発電事業者の取りうる行動および市場の動きを分析した。

第1章では、わが国の電力自由化の動向について述べ、さらにわが国に先立って自由化が行われた海外諸国の電力市場における問題点についてまとめ、本研究の意義を明確にした。

第2章では、本研究で用いた強化学習に基づくマルチエージェント市場モデルの構築手法について説明を行った。

第3章では、種類別発電事業者の入退場を考慮した電力市場モデルの分析を行った。

始めに電力市場が一日前市場のみの場合、リアルタイム市場がある場合について分析を行い、各市場においてプラントの種類別発電事業者数の推移を示すとともに、市場原理により導かれる電源構成と従来の発電システム総コストを最小化した場合の電源構成との比較を行った。

続いて、市場に大規模な発電事業者が存在する場合について分析を行い、大規模発電事業者のとりうる入札戦略を示すとともに、それに伴う市場の動きを分析した。

第4章では、JEPXモデル構築のための準備的検討を行った。

始めに連系線で結ばれた2地域を対象に、一方を寡占的な地域、もう一方を競争的な地域としてJEPXの市場決算アルゴリズムを用いて市場分析を行った。ここでは、各地域の価格の託送可能量及び価格弾力性による感度解析を行い、託送可能量及び価格弾力性がともに小さい場合、通常の市場メカニズムとは異なり、価格が高騰してしまう市場メカニズムの存在をモデル上で確認した。

続いて日本全国を東日本・西日本の2地域に分割し、実際のデータを基に企業体系・プラントの種類を考慮して市場分析を行った。

最後に第5章において、本研究によって得られた知見をまとめ、今後の課題を述べた。

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究の背景 .....	1
1.1.1 電力供給システムの変遷 .....	1
1.1.2 わが国における電力自由化の動向 .....	4
1.1.3 各国における電力自由化の問題点 .....	5
1.2 研究の概要と目的 .....	9
<b>第2章 市場モデルの構築</b> .....	<b>10</b>
2.1 市場モデルの概要 .....	10
2.2 強化学習理論に基づく市場モデルの概要 .....	12
2.2.1 エージェントのモデル化 .....	12
2.2.2 強化学習の枠組み .....	14
2.2.3 収益 .....	14
2.2.4 マルコフ性 .....	14
2.2.5 行動価値関数 .....	15
2.2.6 探索と知識利用 .....	17
2.2.7 強化学習型市場モデル .....	18
<b>第3章 発電事業者の入退場を考慮した電力市場分析</b> .....	<b>21</b>
3.1 前提条件 .....	21
3.1.1 従来の発電システム総コスト最小化 .....	22
3.1.2 競争原理（発電事業者の入退場考慮） .....	22
3.2 競争原理に基づく電源構成 .....	23
3.2.1 一日前市場のみの場合 .....	23
3.2.2 リアルタイム市場ありの場合 .....	27
3.3 大規模な発電事業者が存在する場合の電力市場分析 .....	32
3.3.1 発電エージェントのモデル化 .....	32
3.3.2 計算結果 .....	35
3.4 まとめ .....	37
<b>第4章 JEPX モデル構築に向けた準備的検討</b> .....	<b>38</b>
4.1 JEPX の解説 .....	38
4.1.1 JEPX とは .....	38
4.1.2 JEPX 市場方式 .....	39
4.2 発電事業者の意思決定の分析 .....	40
4.2.1 前提条件 .....	40
4.2.2 価格の託送可能量による感度解析 .....	40
4.3 JEPX 市場分析 .....	44
4.3.1 日本の電力系統 .....	44

4.3.2 前提条件 .....	44
4.3.3 市場価格 .....	47
4.4 まとめ .....	48
<b>第5章 結論 .....</b>	<b>49</b>
5.1 本研究の成果 .....	49
5.2 今後の課題 .....	50
<b>謝辞 .....</b>	<b>51</b>
<b>発表実績 .....</b>	<b>52</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>53</b>

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

従来、電力・ガス・水道・通信・鉄道などの公益事業は規制が必要であると考えられ、それぞれの事業について、政府は様々な制約を与えてきた。電気事業に規制が必要である理由は、自然独占が成立することや、電力は日常生活や産業に不可欠であること、設備投資額が大きく事業リスクが高いこと、国策としてエネルギーを確保しておく必要があることなどが挙げられる。そのように政府は、事業者に対して多くの規制をかける代わりに地域独占を認めて、電力の安定供給を最大限保障する仕組みを作り上げてきた。

しかし議論が進むにつれて、規制にかかる費用や規制そのものの非効率などが指摘されるようになり始めた。一方で、分散電源の普及による自然独占性の崩壊や、電力・ガス・熱需要などのエネルギー間の競争、同時同量供給を可能にする情報技術の発達などといった技術的な発展が見られるようになった。このように経済学的にも工学的にも規制緩和への要望が高まってきた結果、1970年代以降アメリカ、イギリスや日本などの主要国を中心に、電気事業を始めとする多くの公益事業に対して規制緩和が実施され始めた。

### 1.1.1 電力供給システムの変遷

電力供給システムは各地域の競争導入や自由化の度合いによって、次のように大きく4つに分類することができる<sup>1</sup>。

#### 独占的な供給システム

独占的な供給システムにおいて、電気事業者は発送配電のすべての設備を所有し、発電から送電、配電にいたるまでのすべての事業を担う。このような形態は垂直統合型の事業者と呼ばれる。このシステム構造を図 1-1 に示す。

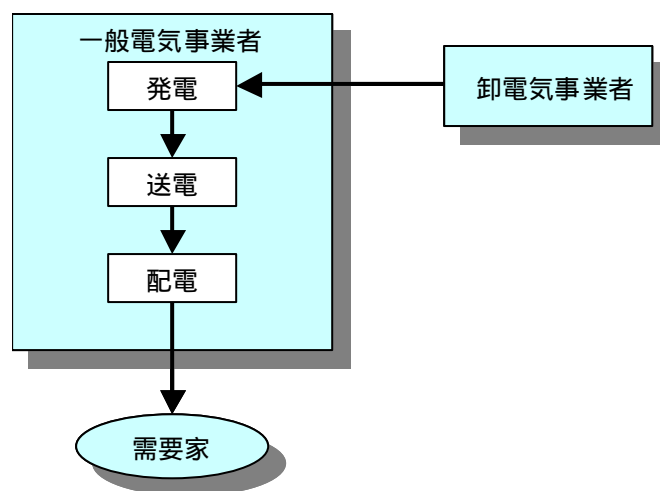


図 1-1 独占的な供給システムの構造

これらの電気事業者は一定の供給地区に独占的に需要家に電力を供給している。この独占構造を保つために、電気事業への新規参入は厳しく制限され、発送配電のどの部門にも競争は導入されない。これらに電力の卸売りをを行う卸発電事業者が存在する場合もあるが、一般的に規制下に置かれ、競争は行わない。

## 発電市場自由化型の供給システム

発電市場自由化型の発電システムは、発電部門に競争が導入されたシステムである。送配電部門は既存の電気事業者による独占的な所有と利用が認められる一方で、発電部門では独占が撤廃され、新規参入が自由化される。既存の電気事業者は、必要とする供給力の一部を規制緩和により参入してきた独立系発電事業者（IPP：Independent Power Producer）などから買電する。このシステム構造を図 1-2 に示す。

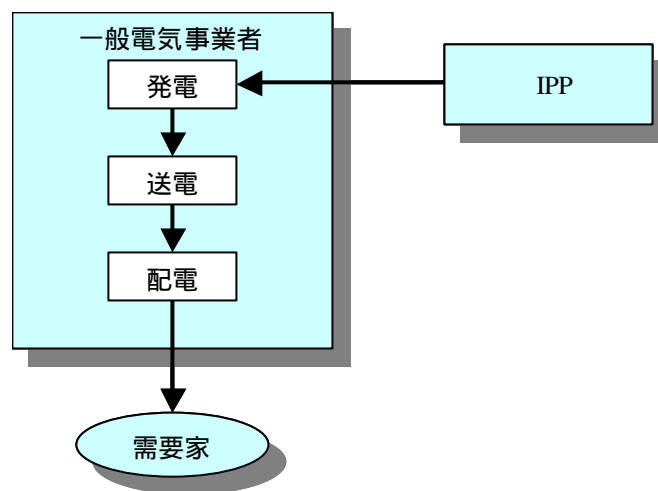


図 1-2 発電市場自由化型供給システムの構造

ここでは発電部門の一部に競争が導入されるが、既存の電力会社が所有する発電設備までは競争の対象とはならず、需要増に対応する新規発電設備の導入についてのみ、IPP との設備調達競争が行われる。

## 送電線開放型の供給システム

送電線開放型の供給システムは、発電部門の自由化に加え、送電線へのアクセスが開放されたシステムである。このシステム構造を図 1-3 に示す。

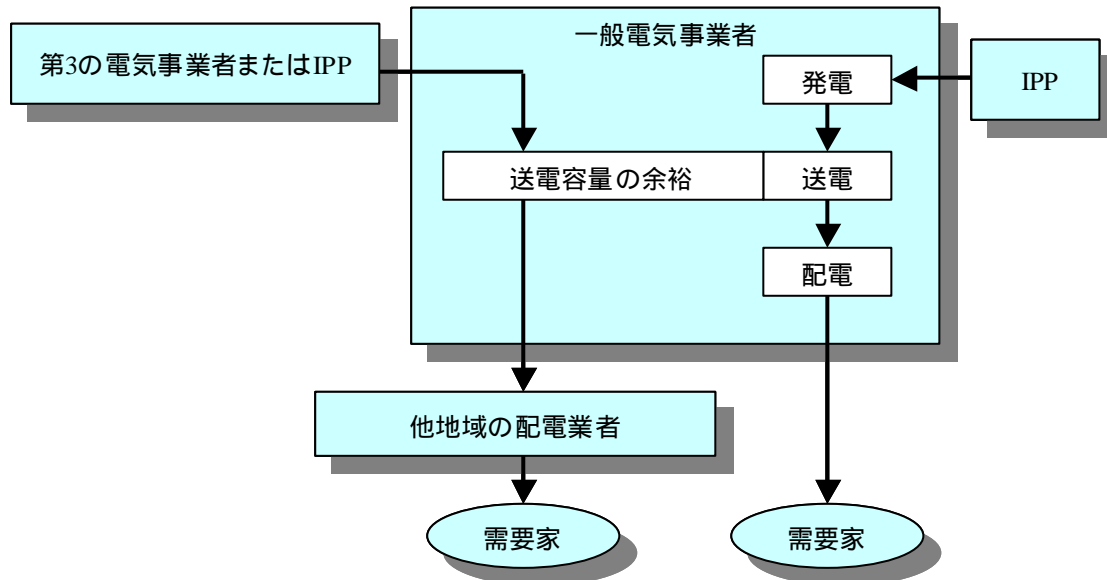


図 1-3 送電線開放型供給システムの構造

このシステムにおいて既存の電気事業者は、任意の発電事業者に対して送電サービスを行うことを義務付けられる。従って IPP や第 3 の電気事業者が、地域によらずに電力の卸売りを行うことが可能となる。このシステムは卸売り電力市場の競争を活発化するために考案された。

## 完全競争型の供給システム

完全競争型の供給システムは、発電部門や送電線のアクセスに加え、最終需要家への小売事業の自由化が認められたシステムである。このシステム構造を図 1-4 に示す。

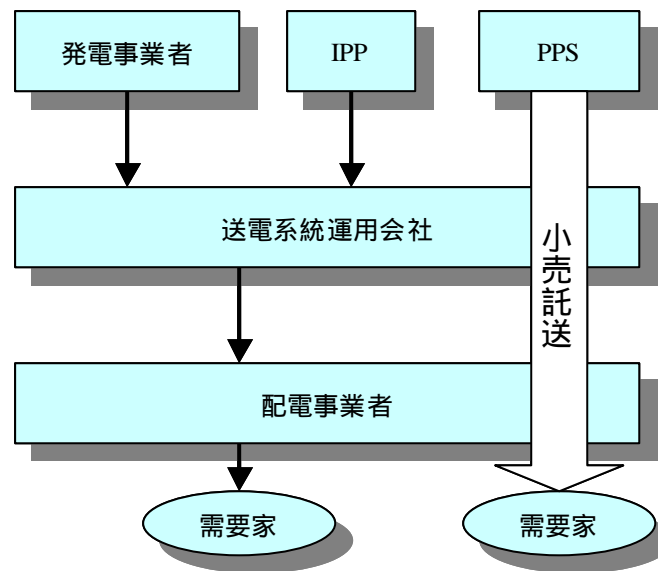


図 1-4 完全競争型供給システムの構造

このシステムになると、最終需要家が電力購入元を選択することができるようになるため、競争が大きく促進されることになる。尚、すべての需要家への小売事業が自由化されたシステムを完全競争型と呼ぶが、大口需要家などの特定の需要家への小売事業のみが自由化されたシステムを部分競争型と呼ぶ。

### 1.1.2 わが国における電力自由化の動向

わが国においては従来、地域ごとに独占的な民間の電力会社が存在し、発送配電のすべての事業をそれぞれの電力会社が垂直統合的に担ってきた。この体制は戦後から長い間、電力の安定供給を達成してきた。しかし、公益事業への規制緩和や、効率的な電力供給システム構築への要望が高まり、1995 年 12 月に卸電気事業の自由化が行われ、発電市場自由化型のシステムへと移行した。ここで競争が導入されたのは新規設備に対してのみであったため、実質的な競争とはならなかったが、この施行が今日に至るまでの電力自由化議論の第一歩となったと言える。

その後 2000 年 3 月より、電圧 2 万 V 以上および、契約電力 2000kW 以上の大口需要家（総電力需要のおよそ 27%）を対象とした部分自由化が行われた。ここで全面自由化としなかったのは、競争促進による事業の効率化を図ると同時に、ユニバーサルサービスや供給信頼性、



エネルギーセキュリティ，環境対策などの公益的課題に配慮したことが理由である。この法改正により，部分的とはいえ完全競争型のシステムとなった。

その後、2004年には契約電力500kW以上に自由化が拡大され、2005年度には50kW以上の高圧需要家まで自由化範囲が広げられる予定である。この場合の自由化範囲は、総需要のおよそ63%となり、大きく広がることとなる<sup>2</sup>。さらにこの際、同時に日本卸電力取引所(JEPX)が取引を開始する予定である。また、2007年以降には家庭用も含めた全面自由化の議論が開始される事になる。

### 1.1.3 各国における電力自由化の問題点

イギリス，アメリカ等の欧米諸国や一部の発展途上国では，わが国に先立ち電力市場の自由化が進んできた<sup>3</sup>。それぞれの市場形態はその国特有の背景や自由化の進捗等により様々である。しかしイギリスにおいては，当初予期したように制度が働かず，電力価格がそれほど下がらない結果となったため，制度改正を行った。またアメリカのカリフォルニアにおいては電力供給がストップしてしまうといった大惨事が起きたため，現在に至るまで電力取引は中止され，電気事業は州の管理下に置かれている。以下にそれらの例と問題点，及びその対策について紹介する<sup>4</sup>。

#### イギリスにおける電力自由化の推移

イギリスでは1990年に電気事業の再編と民営化により，イングランド・ウェールズ地方において発送配電部門を垂直的に統合していた国営電力を分割し，電力プール市場を導入することで，一挙に完全競争型の供給システムへと移行した。国営中央発電局は3社の発電会社(NP: National Power, PG: Power Gen, NE: Nuclear Electric)と1社の送電会社(NGC: National Grid Company)，12社の地域配電会社に分割・民営化された。発電市場は完全に自由化され，発電電力はすべてNGCが運営する電力取引市場を介して取引することを義務付けたプール市場を導入した。この供給システムを図1-5に示す。

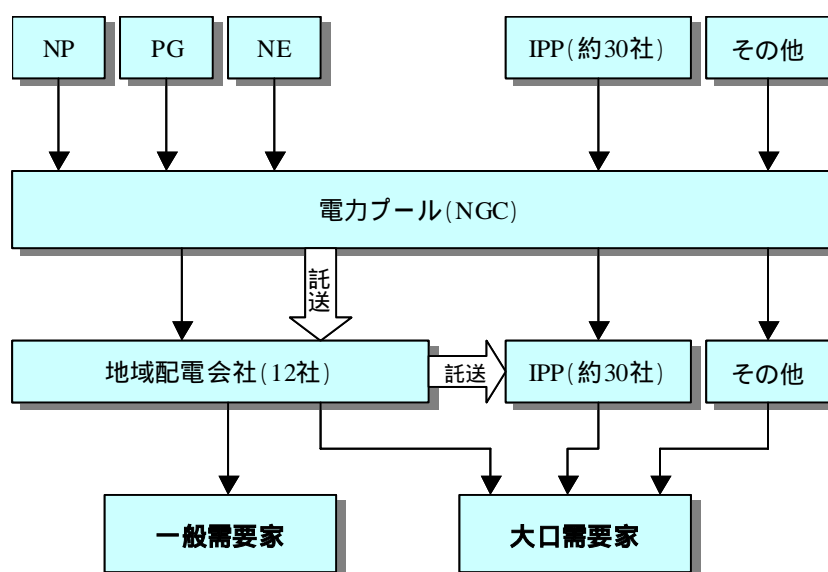


図 1-5 民営化後のイギリス（イングランド・ウェールズ地方）の電力供給システム

発電事業者は取引前日の午前 10 時までに、各ユニットごとの発電可能量、起動コスト、発電コスト、運転制約などを NGC に提示する。NGC はこれらのユニット制約を考慮して、提示データを低い価格から順に並べ、独自の需要想定量と均衡するだけの量を落札させる。このとき、落札した発電ユニットの中で、最も高い発電価格を系統限界価格（SMP：System Marginal Price）とする。ただし、ピーク時間帯においては、起動コストも考慮した価格となる。取引時にはさらに送電線制約を考慮して発電ユニットへ給電指令を行い、取引後に給電計画と実際の運用実績との誤差分を保障して最終価格が決定される。

この民営化の結果、電気料金は実質値では低下したものの、名目値としては上昇しており、競争導入による大きな価格低減効果は見られなかったといえる。この理由として、一部の大手発電会社の市場支配力により入札価格操作が可能である点、プール規則が複雑で柔軟性に乏しいため、新規事業者の市場参入の障害となっている点、発電事業者のみの入札により価格が決定されてしまうため、需要家の価格交渉力がない点などが挙げられている。

そこで 2001 年 3 月より旧プール制度が廃止され、相対取引や私設取引所を中心に電力取引が行われる新たな電力取引制度（NETA：New Electricity Trading Arrangements）が始まった。従来のプール取引は NGC から分離・廃止され、原則的に市場参加者に任せることになった。但し、需給調整取引のみは系統運用の必要があるため、NGCに残された。また、3.5 時間前より手前での取引においては需要曲線が導入されるようになった。この供給システムを図 1-6 に示す。この時点までに Nuclear Electric は British Energy と改名されている。

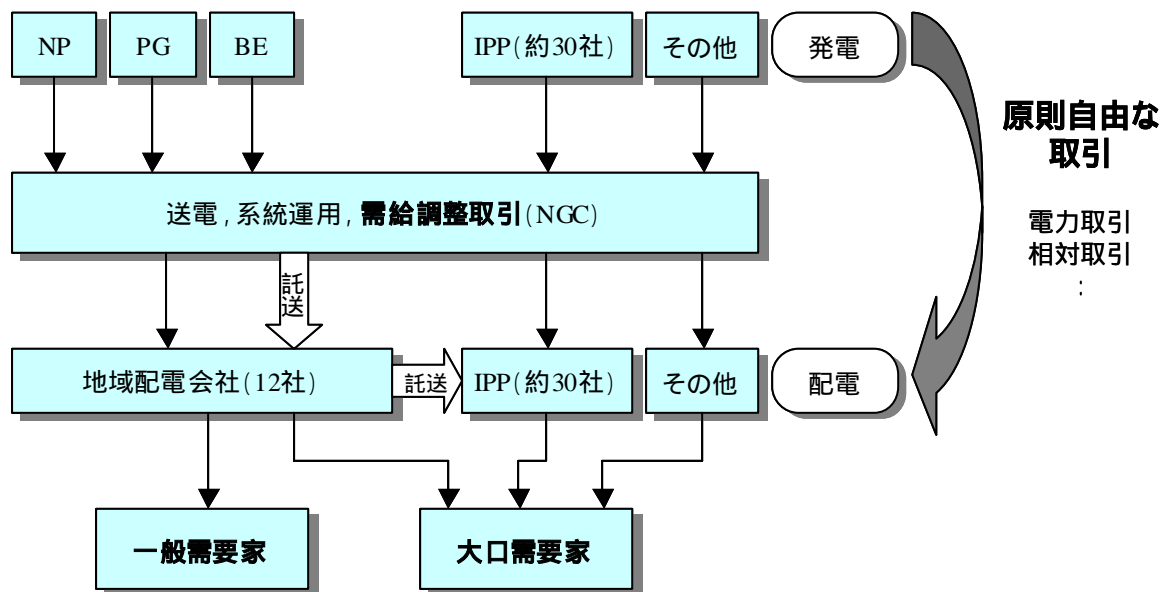


図 1-6 NETA による電力供給システム

## カリフォルニアにおける電力自由化の推移

アメリカにおける電気事業への競争制度導入は、1978 年の公益事業規制政策法（PURPA：Public Utility Regulation Policies Act）成立に始まる。これにより発電市場自由型の供給システムとなり、既存の電気事業者は一定の制約をみだす発電事業者から、余剰電力を回避可能原価にて購入することを義務付けられるようになった。さらに卸電力市場を活性化させ

るために、連邦エネルギー規制委員会( FERC : Federal Energy Regulatory Commission )は 1996 年 4 月に最終規則 ( FERC Order No.888, No.889 ) を発行し、各電気事業者に対し連邦のすべての送電線の解放を義務付けることにより、送電線開放型供給システムへと移行した。この最終規則は回収不能投資の完全回収を認めている。

カリフォルニア州においては、1998 年 3 月 31 日より電力小売の前面自由化が行われた。その際に円滑な電力取引を行うため、電力取引を行う電力取引市場 ( PX : Power Exchange ) と、送電系統を一括管理し公平な送電系統へのアクセスと信頼度を確保する独立系等運用者 ( ISO ; Independent System Operator ) などが設けられた。

カリフォルニアにおいてはスケジューリングコーディネータ ( SC : Scheduling Coordinator ) を通じて、PX 以外の市場での取引や、発電事業者と小売事業者が直接契約を結ぶ相対取引が認められていたが、大手私営 3 社に対しては、PX における電力取引が義務付けられた。これらの電力会社は発電設備の売却勧告を受け、配電会社 ( UDC : Utility Distribution Company ) としての業務に特化するよう要請された。この際に回収不能投資の回収を認めるシステムとして、低下する見込みのある卸電力価格に対し、一定期間中の小売価格を凍結させた。これらの供給システムを図 1-7 に示す。

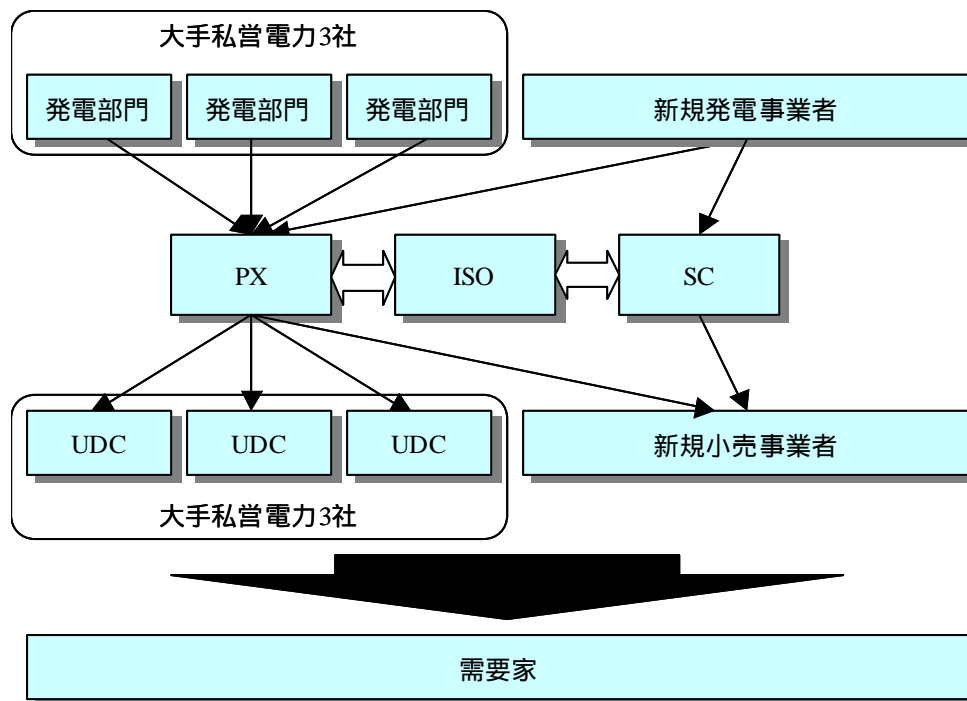


図 1-7 アメリカにおける一般的な電力供給システム

しかし 2000 年の夏、猛暑により電力需給が逼迫したために輪番停電が発生してしまいました。それに伴い卸電力価格の高騰が起こり、ISO による系統運用に混乱が生じた。大手私営電力 3 社は卸電力価格が高騰したにもかかわらず、PX からの電力調達義務をもち、さらに小売電力料金が凍結されていたために、おおきな逆ザヤが発生した。回収不能投資の回収を認めるシステムが、その意図とは逆に、大きな損失を生じさせる結果となってしまった。

さらに 2000 年の冬から 2001 年にかけて供給予備力が逼迫したことによる輪番停電が度々起こるようになり、2001 年 1 月にカリフォルニア PX の取引業務は停止された。その後大手私営電力会社のひとつが破産申請を行うなど、大きな経済的損失と混乱を残すこと

となった。

この原因については様々な議論がなされている。それらのうち電力システムの外部に存在する要因として、シリコンバレーに代表される好景気や気温の急激な上昇に伴う需要の予想以上の伸び、厳しい環境規制による発電単価の高騰、天然ガス価格の上昇などが挙げられる。これらはどのような電力システムにも存在するリスクであり、システムを設計する際にはこれらに対するリスクに耐え得る制度設計を行わなければならない。

カリフォルニアにおける電力システムは、これらの外的環境リスクに対して、以下のような問題点を抱えていた。

- ・新規投資へのインセンティブが弱く、構造的な供給力不足に陥っていた
- ・UDC が長期相対取引などの卸電力価格変動のリスクヘッジ手段を制限されていた
- ・小売価格が凍結されていたため、UDC に大きな逆ザヤが発生した
- ・小売価格が凍結されていたため、卸電力価格の高騰が需要家側に伝わらず、価格に対する需要の弾力性が働かなかった

## 1.2 研究の概要と目的

以上の背景に見られたように、各地域で電力市場の自由化が進められているものの、その自由化の形態は地域により様々であり、それぞれの問題点を抱えている。わが国においても電力自由化の導入に関する議論は活発であり、自由化の範囲はますます広がる方向へと進んでいるが、問題点は山積している。

従って、新たに電気事業に対して規制緩和を導入するにあたって、電力市場の制度設計をどのように行っていくかということは非常に大きな課題である。これらの問題の難しさのひとつには、それぞれの制度の影響を実験により確かめることができないことが挙げられる。どの制度にも一長一短があり、その有効性と、それに伴うリスクを完全に見極めることはほぼ不可能である。さらに電力市場に関して言えば、制度設計を失敗した時の損失が他の市場と比較してとてつもなく大きい。これはカリフォルニアの例より明らかである。このような問題に対し、発電事業者や需要家や市場の様々な特性や制度を計算機上でモデル化し、結果を生み出す要因やプロセスを把握しようとする研究が盛んに行われるようになった。

市場モデルを構築する手法には、数理計画法やゲーム理論、強化学習理論を用いるもの、さらには実際に人間による実験を行うものなど様々なものが存在する。例えば数理計画法によるモデルには、市場への入札戦略を利益の最大化問題を解いて決定するものがある<sup>5</sup>。これは解がひとつに決まるためわかりやすい一方、需要や相手の戦略の不確実性を考えることは難しい。自由化された電力市場における電力価格は、従来の総括原価方式と異なり、自らの利益を最大化する複数の意思決定者によって戦略的に入札が行われた結果形成される。そこで、自由競争下における電力市場の動きを分析するために、市場参加者を自律的意志決定主体であるエージェントと見なし、市場の動向を各エージェントの相互作用を通してボトムアップに評価するマルチエージェントモデルを採用した研究が注目されている<sup>6,7,8</sup>。しかし、従来のマルチエージェントモデルを用いた先行研究は静的なものであり、発電事業者の市場への入退場などの動的な要素は考慮されていなかった。そこで本研究では、利益が出ている発電事業者は増設を、損失を出している発電事業者は市場からの撤退を可能にする電力市場モデルを構築し、種類別発電事業者の入退場を考慮した電力市場分析を行う事により、発電事業者の行動及び市場の動きを解析する。

また、2005年4月から日本卸電力取引所(JEPX)が取引を開始する事を受け、JEPXの市場アルゴリズムを用いて、連系線で結ばれた2地域を対象として、発電事業者の取りうる行動および市場の動きを分析する。

## 第2章 市場モデルの構築

本章ではまずエージェントの概念について述べる。エージェントとは独自の目的を持ち、それを効率的な方法で実現しようとする実行主体を意味する。このようなエージェントが複数存在するモデルをマルチエージェントモデルと呼ぶ<sup>9</sup>。

本研究では、電力市場をマルチエージェントモデルとみなす。すなわち、自身の利益を最大化することを目的として戦略的に入札を行う市場参加者をエージェントとしてモデル化し、発電事業者の行動や市場の動きを推測する。また、市場方式はかつてイングランド・ウェールズ地方において採用されていた強制プール市場とする。

### 2.1 市場モデルの概要

強制プール市場において、市場参加者はプール市場(スポット市場)のみを介して電力取引を行う。市場決済の手段としては、発電側のみが入札を行い価格が決定されるシングルオークション形式と、発電側・需要側双方の入札によって価格が決定されるダブルオークション形式の2種類が考えられる。図 2-1,図 2-2 に強制プール市場モデルのシングルオークション形式及びダブルオークション形式の模式図を示す。

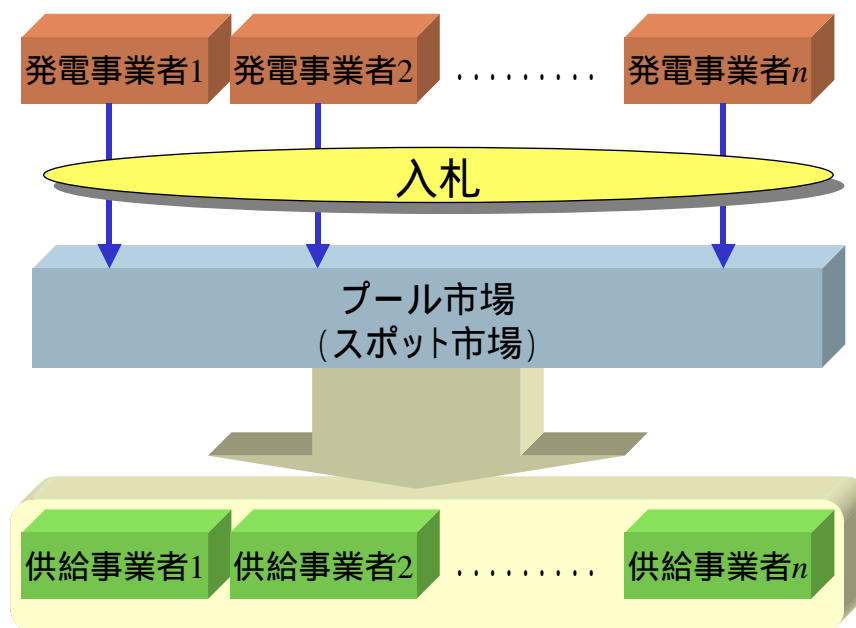


図 2-1 強制プール市場モデル(シングルオークション)

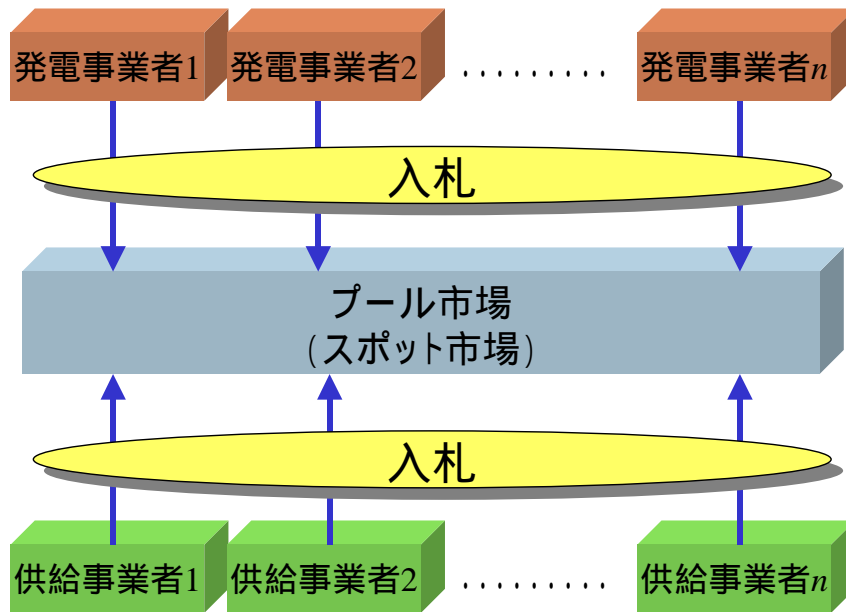


図 2-2 強制プール市場モデル(ダブルオークション)

図 2-1 のシングルオークション形式による強制プール市場においては、需要側(供給事業者)からの入札はないため、各需要は全体として一つの需要として捉えることができる。

次に、シングルオークションとダブルオークションによる市場決済方法を図 2-3、図 2-4 に示す。

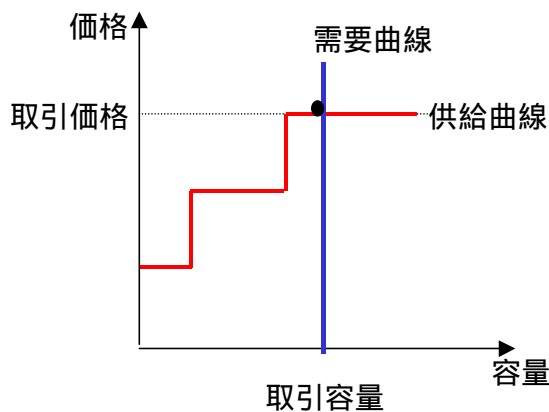


図 2-3 シングルオークションによる市場決済

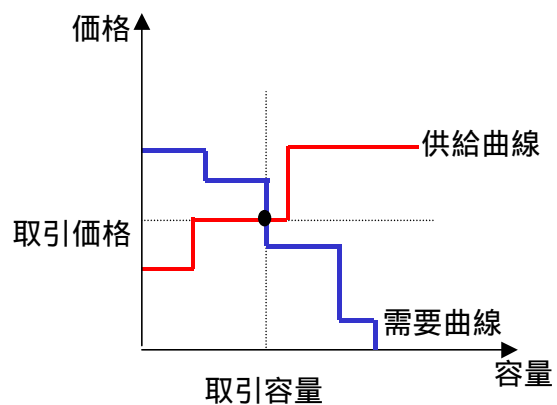


図 2-4 ダブルオークションによる市場決済

図 2-3 のシングルオークションでは、発電事業者が売値を入札し、その累積入札量が全需要量に達した点における入札額が、取引価格として全市場参加者に対して適用される。一方、図 2-4 のダブルオークションでは、発電事業者、供給事業者が、それぞれ電力の売値、買値をプール市場に対して入札する。さらに、その結果描かれる需給曲線の交点を求めることにより、取引価格と取引量を決定し、全市場参加者はこの取引価格に従って取引を行う。

本研究では一日前市場をダブルオークション形式とし、リアルタイム市場をシングルオークション形式としてモデル化を行った。

## 2.2 強化学習理論に基づく市場モデルの概要

### 2.2.1 エージェントのモデル化

本研究では電力の特徴を踏まえ、限界費用や限界効用に基づく入札モデルを用いた。市場には発電エージェント  $n$  人  $G=\{A_{gi} : i=1, \dots, n\}$  と 1 人の需要エージェント  $D=\{A_{dj} : j=1\}$  がいるものとする。

発電エージェント  $G=\{A_{gi} : i=1, \dots, n\}$  が、発電するために必要なコスト関数  $C_i(q)$  は次のように表される。

$$C_i(q) = a_{gi}q^2 + b_{gi}q + c_{gi} \quad (2.1)$$

また、限界費用は、次のように表される。

$$\frac{dC_i(q)}{dq} \equiv MC_i(q) = 2a_{gi}q + b_{gi} \quad (2.2)$$

本モデルにおいて発電エージェント  $A_{gi}$  は式

で表される限界費用曲線を基に、その切片  $g_i$  を戦略として決定するものとしてモデル化を行った<sup>10</sup>。従って発電エージェント  $A_{gi}$  の入札曲線  $p_{gi}(q)$  は次式で表される。

$$p_{gi}(q) = 2a_{gi}q + b_{gi} + \alpha_{gi} \quad (2.3)$$

また、その様子を図 2-5 に示す。

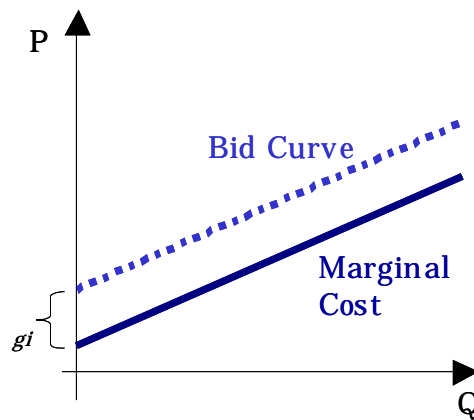


図 2-5 発電エージェントの入札モデル

次に、需要エージェント  $D=\{A_{dj} : j=1\}$  の限界効用  $U_j(q)$  について述べる。

電力は生活必需品であり、需要家はたとえ電力価格が高騰しても、電力消費を抑えるという行動をとりにくい。すなわち需要の価格弾力性はとても小さいとすることができる。日本に先行する海外諸国の電力市場を分析した研究によると、電力需要の価格弾力性はおよそ-5%程度と見積もられている<sup>11</sup>。本モデルにおいても、これを基にした限界効用を用いることにする。

需要の価格弾力性は一般的に

$$\eta = \frac{dq/q}{dP/P} \quad (2.4)$$

と定義されている。これを微分方程式として解くと次のようになる。



$$P = Cq^{1/\eta} \tag{2.5}$$

但し  $C$  は定数である。もし式(2.5)が基準点( $Q_0, P_0$ )を通るならば、式(2.5)は次のように変形できる。

$$P = \frac{P_0}{q_0^{1/\eta}} q^{1/\eta} \tag{2.6}$$

本モデルでは、この需要曲線を基本限界効用関数と見なすことにする。この関数は無限大へと発散してしまうが、発電エージェントの入札戦略の上限値を 80[¥/kWh]としているため、実質のプライスカップは 80 + 限界費用 [¥/kWh]となる。図 2-6 に例として、基準点( $Q_0, P_0$ )を(100000MWh, 5 ¥/kWh)とした時の  $Q$  と  $P$  の関係を示す。

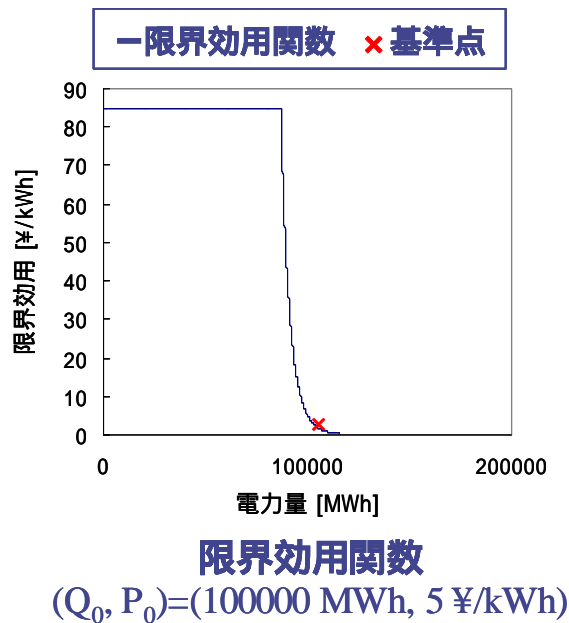


図 2-6 電力市場モデルにおける限界効用関数

本研究では、図 2-7 のようなある一日の日本全国（沖縄を除く）一時間ごとの需要を基準需要  $\{Q_0(h) : h=1, \dots, 24\}$  として設定した。また基準価格  $P_0$  については 5 ¥/kWh とした。また、需要エージェントは戦略を持たず、限界効用をそのまま入札するものとする。

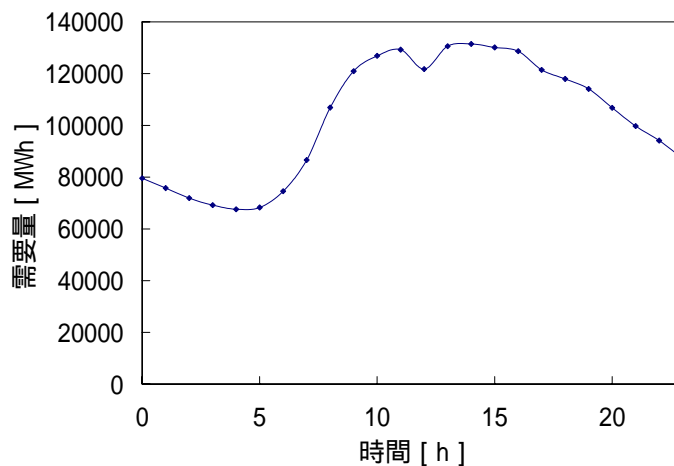


図 2-7 基準需要パターン

## 2.2.2 強化学習の枠組み

強化学習<sup>12</sup>では、エージェントはある環境の中で、試行錯誤的に知覚と行動を繰り返し、報酬を受け取る。ここでの行動とは、ゲーム理論における戦略を意味する。この一連の動作をエピソードと呼ぶ。各エージェントは報酬を最大化することを目的を効率的に達成するために、エピソードを繰り返してそれぞれの持つ意思決定機構を修正する。この様子を図 2-8 に示す。

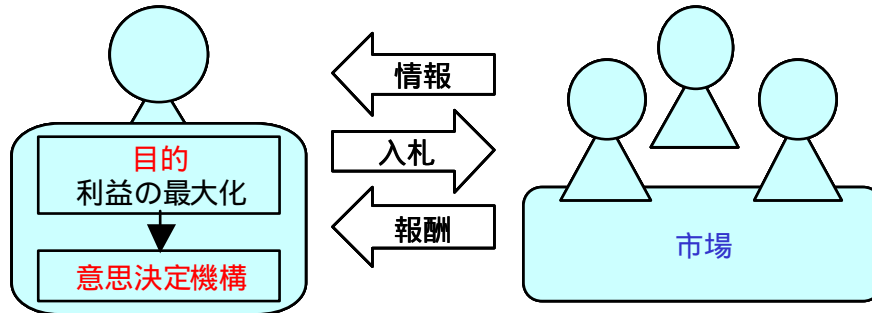


図 2-8 強化学習の流れ

## 2.2.3 収益

各エージェントは報酬を最大化することを目的とする。ここでの報酬とは、将来における割引期待収益を指す。時間ステップ  $t$  の後に受け取った報酬の系列を  $r_{t+1}, r_{t+2}, r_{t+3}, \dots$  と表すならば、割引率を  $\gamma$  として、割引期待報酬  $R_t$  は次のように表される。

$$R_t = r_{t+1} + \gamma r_{t+2} + \gamma^2 r_{t+3} + \Lambda + \gamma^{T-t-1} r_T \quad (2.7)$$

ここで  $T$  は最終時間ステップである。このように、初期状態と終端状態が存在し、終端状態において、標準的な初期状態へとリセットが行われるようなタスクをエピソード的タスクと呼び、初期状態から終端状態へと至る一連の流れをエピソードと呼ぶ。

## 2.2.4 マルコフ性

強化学習の枠組みにおいて、エージェントは環境からの信号の関数として意思決定を行い、この信号は環境の状態と呼ばれる。この状態は、どのようなものであれ、エージェントが利用可能な情報を指す。理想的には、状態信号は過去の知覚をコンパクトに集約し、さらに過去の関連情報をすべて保持していることが望ましい。このように、すべての関連情報を保持する状態信号はマルコフ性を持つという。例えば、チェスにおける盤面上のすべての駒配置は、マルコフ性を持つ状態信号である。というのはどのような経緯でその駒配置となったとしても、次を取る手を考える際に重要となる情報は、現在の盤面上に集約されているためである。

ここで強化学習問題のために、マルコフ性の形式的定義を行う。時刻  $t$  で取られた行動に対して、環境が時刻  $t+1$  においてどのように応答するか考える。最も一般的な場合では、この応答は以前に起こったあらゆることに依存する。この場合、時刻  $t+1$  に状態が  $s'$ 、報酬が  $r$  となる確率分布  $\Pr$  は次のように表される。

$$\Pr\{s_{t+1} = s', r_{t+1} = r \mid s_t, a_t, r_t, s_{t-1}, a_{t-1}, \Lambda, r_1, s_0, a_0\} \quad (2.8)$$

一方、信号状態がマルコフ性を持つなら、 $t+1$ における環境の応答は $t$ における状態と行動表現のみに依存することになり、この時の確率分布  $\text{Pr}$  は次のように表すことができる。

$$\text{Pr}\{s_{t+1} = s', r_{t+1} = r \mid s_t, a_t, r_t\} \quad (2.9)$$

逆に、式(2.8)(2.9)の確率分布が等しい場合、状態信号はマルコフ性を持つといえる。

もし環境がマルコフ性を持ち、現在の状態と行動が与えられるなら、式(2.9)の1ステップダイナミクスから、次の状態と行動を予測することができる。この式の反復計算を行うことにより、現時点までの完全な履歴が与えられた場合と同様に、現在の状態のみから将来の状態と期待される報酬のすべてを予測することができる。

## 2.2.5 行動価値関数

### モンテカルロ法

強化学習理論において、意思決定は各エージェントが持つ行動価値関数に基づいて行われる。この関数は状態行動対の関数で、エージェントがある状態において、ある行動を行うことがどれだけよいのかを評価する。ここでは「どれだけよいか」という概念は、将来において期待される報酬、つまり割引期待報酬に関して定義される。あるエピソード  $k$  について、知覚できる環境の状態が  $s$  の時に、行動  $a$  を取ることの行動価値関数を  $Q_k(s, a)$  として定義する。ある時刻  $t$  において、状態が  $s$  であった時に行動  $a$  を取ったときの行動価値関数  $Q_k$  は、将来の割引期待報酬を  $R_t$  として、次のように定義される。

$$\begin{aligned} Q_k(s, a) &= E\{R_t \mid s_t = s, a_t = a\} \\ &= E\left\{\sum_{i=0}^T \gamma^i r_{t+i+1} \mid s_t = s, a_t = a\right\} \end{aligned} \quad (2.10)$$

行動価値関数は経験に基づいて見積もることができる。例えば、ある状態においてとられた各行動に対して、個別に平均値が保持されるなら、それらの平均値は行動価値  $Q$  に収束する。このようにして価値を見積もる方法をモンテカルロ法という。

あるエピソード  $k$  について、状態  $s$  の時に  $a$  の行動を取った結果、エピソードの終了時までには報酬  $R$  が得られた時、行動価値関数  $Q_k$  を次のように更新する。

$$Q_{k+1}(s, a) = Q_k(s, a) + \alpha [R - Q_k(s, a)] \quad (2.11)$$

ここで  $\alpha$  は学習速度を表すパラメータであり、 $0 < \alpha < 1$  の値をとる。例えば  $\alpha = 1/k$  とおくと、式(2.11)は次のように変形することができる。

$$\begin{aligned} Q_{k+1}(s, a) &= Q_k(s, a) + \frac{1}{k} [R - Q_k(s, a)] \\ &= \frac{R + (k-1)Q_k(s, a)}{k} \end{aligned} \quad (2.12)$$

すなわちこの行動価値  $Q_k$  が、エピソード毎に得られる期待報酬の平均値を表していることがわかる。もし十分なエピソードを経験すれば、行動価値が、大数の法則に従う精度にて期待報酬へと収束する。 $\alpha$  を定数とした場合、各エピソード毎に実際に得られた報酬を  $R_k$  と置くと、式(2.11)は次のようになる。

$$\begin{aligned}
Q_{k+1} &= Q_k + \alpha[R_k - Q_k] \\
&= \alpha R_k + (1-\alpha)Q_k \\
&= \alpha R_k + (1-\alpha)\alpha R_{k-1} + (1-\alpha)^2 Q_{k-2} \\
&= M \\
&= (1-\alpha)^k Q_0 + \sum_{i=1}^k \alpha(1-\alpha)^{k-i} r_i
\end{aligned} \tag{2.13}$$

これは割引率のような意味を持ち， $\alpha$  が大きいと，最近得られた利益に大きな重みを，過去の利益には小さな重みをつけて，現在の行動価値として認知するということになる。どちらにせよ，行動価値が，過去の行動により得られた報酬の平均値または重み付け平均値を表している。

但し， $\alpha$  を定数とした場合，推定値は収束条件を満たさず，常に最新の報酬に対応して変化し続けることになる。実質的に，強化学習が扱う問題は非定常環境となる場合が多いため，これはむしろ望ましいことである。そこでパラメータの設定は，きわめて収束が遅いか，満足に行く収束率を得るための調整が必要となる。

この様なエピソードを十分に繰り返す，行動価値が完全に収束した場合には次式が成立する。

$$Q_{k+1}(s, a) = Q_k(s, a) \tag{2.14}$$

従って式(2.11)及び式(2.14)により，行動価値が収束した時には次式が成立する。

$$Q_k(s, a) = R \tag{2.15}$$

すなわち十分なエピソードを繰り返す，完全に収束が終了した時には，行動価値関数が，状態  $s$  の時に行動  $a$  をとった時の期待報酬を正確に表すようになる。

## Q 学習

過去のエピソードの経験を用いて，行動価値関数を式(2.11)のように更新するのがモンテカルロ法である。このモンテカルロ法と動的計画法の考え方を組み合わせたものに TD (Temporal Difference) 学習がある。このうち最も一般的な Q 学習について触れる。

モンテカルロ法では，エピソードの終了時まで待って，式(2.11)のように期待報酬をフィードバックするが，TD 法では同一エピソード内の，次の時間ステップを待つだけでよい。

各エージェントの行動価値関数は式(2.10)に定義されたように，割引期待報酬を表す。この式(2.10)は次のように変形される。

$$\begin{aligned}
Q_k(s, a) &= E\{R_t | s_t = s, a_t = a\} \\
&= E\left\{\sum_{i=0}^T \gamma^i r_{t+i+1} | s_t = s, a_t = a\right\} \\
&= E\left\{r_{t+1} + \gamma \sum_{i=1}^T \gamma^{i-1} r_{t+i+1} | s_t = s, a_t = a\right\} \\
&= E\{r_{t+1} + \gamma Q_k(s_{t+1}, a_{t+1}) | s_t = s, a_t = a\}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

式(2.16)より，時刻  $t$  における行動価値関数は，時刻  $t+1$  に得られた報酬と，時刻  $t+1$  に行う行動  $a_{t+1}$  の価値を割り引いたものの和として表される。大まかに言うと，式(2.10)のようにエピソード全体の割引期待報酬をフィードバックして，行動価値を推定するのがモンテカルロ法であるのに対し，式(2.16)のようにエピソード内の次の時間ステップにおける行動価値を

利用して、行動価値を推定するのが TD 学習であるということが出来る。

TD 学習のうち最も一般的な  $Q$  学習は、次のような行動価値関数の更新アルゴリズムを用いたものである。時刻  $t$  において、状態  $s_t$  の時に  $a_t$  の行動を取った結果、次ステップに報酬  $r_{t+1}$  が得られた時、行動価値関数  $Q_k$  を次のように更新する。

$$Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha \left[ r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t) \right] \quad (2.17)$$

つまり、 $Q$  学習のアルゴリズムは、次ステップにとる行動が、行動価値が最大のものであるとの前提の下で、現在の行動価値を更新するというものである。式(2.17)は、単に状態行動対がすべて更新され続ければ正しく収束が行われることが証明されている。

## 2.2.6 探索と知識利用

### ボルツマン選択手法

$Q$  値が正確に期待報酬を表しているのであれば、ある環境における行動の選択肢のうち、最も  $Q$  値の高い行動をとればよい。しかしまだ学習途中であったり、市場ゲームのようなマルチエージェント環境下では、よりよい行動を探索しなければならず、探索と知識利用の間にジレンマが発生する。そこで、行動価値の学習を重ねつつ、行動を合理的なものにしていくエージェントが必要とされる。

式(2.11)のような学習を行う時、すべての行動が十分なエピソード回数の試行をされること、それぞれの行動価値を正しく推定するための必要条件となる。しかし、いつまでも報酬の得られない行動を繰り返すわけにはいかない。そこで、大きな報酬が期待される行動の探索と利用を効率よく行う手法の 1 つとして、ボルツマン選択手法が挙げられる。これは、現時点までに推測された行動価値を正しいものと仮定し、大きな報酬が得られるとされる行動の選択確率を大きく、小さな報酬しか得られないとされる行動の選択確率を小さくする。状態  $s$  で行動  $a$  を選択する確率  $\pi(s, a)$  は次式で表される。

$$\pi(s, a) = \frac{\exp\left[\frac{Q(s, a)}{T}\right]}{\sum_b \exp\left[\frac{Q(s, b)}{T}\right]} \quad (2.18)$$

ここで  $T$  はボルツマン温度と呼ばれ、 $T$  を大きくするとほぼランダムな選択確率となり、小さくすれば  $Q$  値の高い行動を出しやすくなる。その様子を図 2-9 に示す。

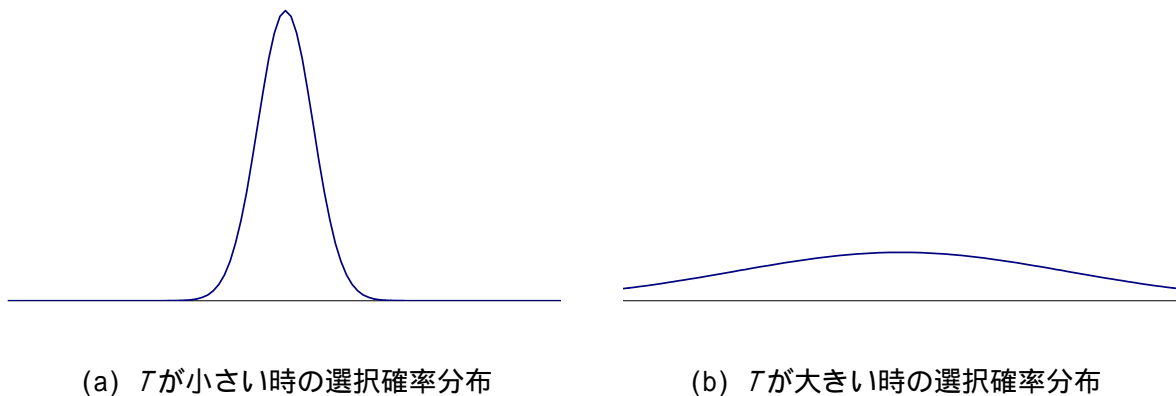


図 2-9 戦略の選択確率

## オプティミスティック初期値

今まで述べてきた学習手法は、すべて行動価値の初期値にある程度依存する。しかし学習速度が定数値である場合、最近の標本値に重み付けがされるため、時間と共に初期値の影響は薄れていく。そこで、この初期値依存性をむしろ利用するのが、オプティミスティック初期値であり、行動価値の初期値として楽観的な値をとるというものである。つまり行動価値の初期値を大きく設定し、価値を過大評価しておく、いずれの行動が最初に選択されても、受け取る報酬は最初の推定量よりは小さい。従って学習機構は報酬に「失望」して、別な行動へと切り替える。その結果、価値推定量が収束する前に、すべての行動が数回試みられることになる。

行動価値が正確な期待報酬へと収束するための必要条件として、すべての状態行動対が十分な回数だけ試行されることが挙げられており、オプティミスティック初期値はこれを満たしやすくするための工夫である。

### 2.2.7 強化学習型市場モデル

強化学習を行うためにすべての値を離散化している。また本モデルでは、戦略決定から入札、そして利益が得られるまでを1エピソードとして見なす。複数の時間設けるが、自分の行動に依存する状態遷移を考慮しないため、モンテカルロ法を用いる。以下に通常の市場モデルについて述べる。

強化学習型市場モデルにおいて戦略は離散化して表される。各エージェントはエピソード  $k$  において、それぞれの戦略  $\{a_{gil} : l=1, \dots, N\}$  対し、行動価値関数  $Q_{gi}^k(a_{gil})$  を持つ。そして、この時にとる戦略は次式の確率分布に従う。

$$\pi(a_{gil}) = \frac{\exp\left[\frac{Q_{gi}^k(a_{gil})}{T}\right]}{\sum_{k=1}^N \exp\left[\frac{Q_{gi}^k(a_{gik})}{T}\right]} \quad (2.19)$$

各エージェントは式(2.3) 式(2.6)に従い、離散化して入札を行う。市場において、発電側の入札を価格の低いものから、需要側の入札を価格の高いものから並べなおすことにより、市場価格  $P^*$ 、および市場取引量  $Q^*$  が得られる。この様子を図 2-10 に示す。

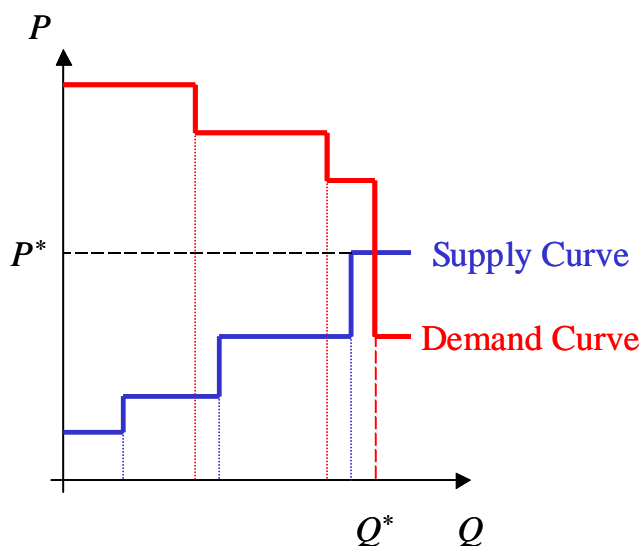


図 2-10 市場決済の様子

このように市場プロセスが行われ，発電エージェントは市場価格  $P^*$  より低い入札分だけが約定され，需要エージェントは  $P^*$  より高い入札分だけが約定される。するとそれぞれの報酬が，次のように表される。

$$R_{gi}^k = P^* q_{gi} - C_i(q_{gi})$$

$$R_{dj}^k = U_j(q_{dj}) - P^* q_{dj}$$

(2.20)

そして発電エージェントはこのとき得られた報酬  $R_g^k$  を次のように行動価値へとフィードバックさせる。

$$Q_{gi}^{k+1}(a_{gil}) = Q_{gi}^k(a_{gil}) + \alpha [R_{gi}^k - Q_{gi}^k(a_{gil})]$$

(2.21)

このように入札から報酬を得るまでのエピソードを十分な回数だけ繰り返すことにより，行動価値を正しく見積もり，期待報酬の高い戦略の選択確率をあげていく。この一連の流れを図 2-11 に示す。

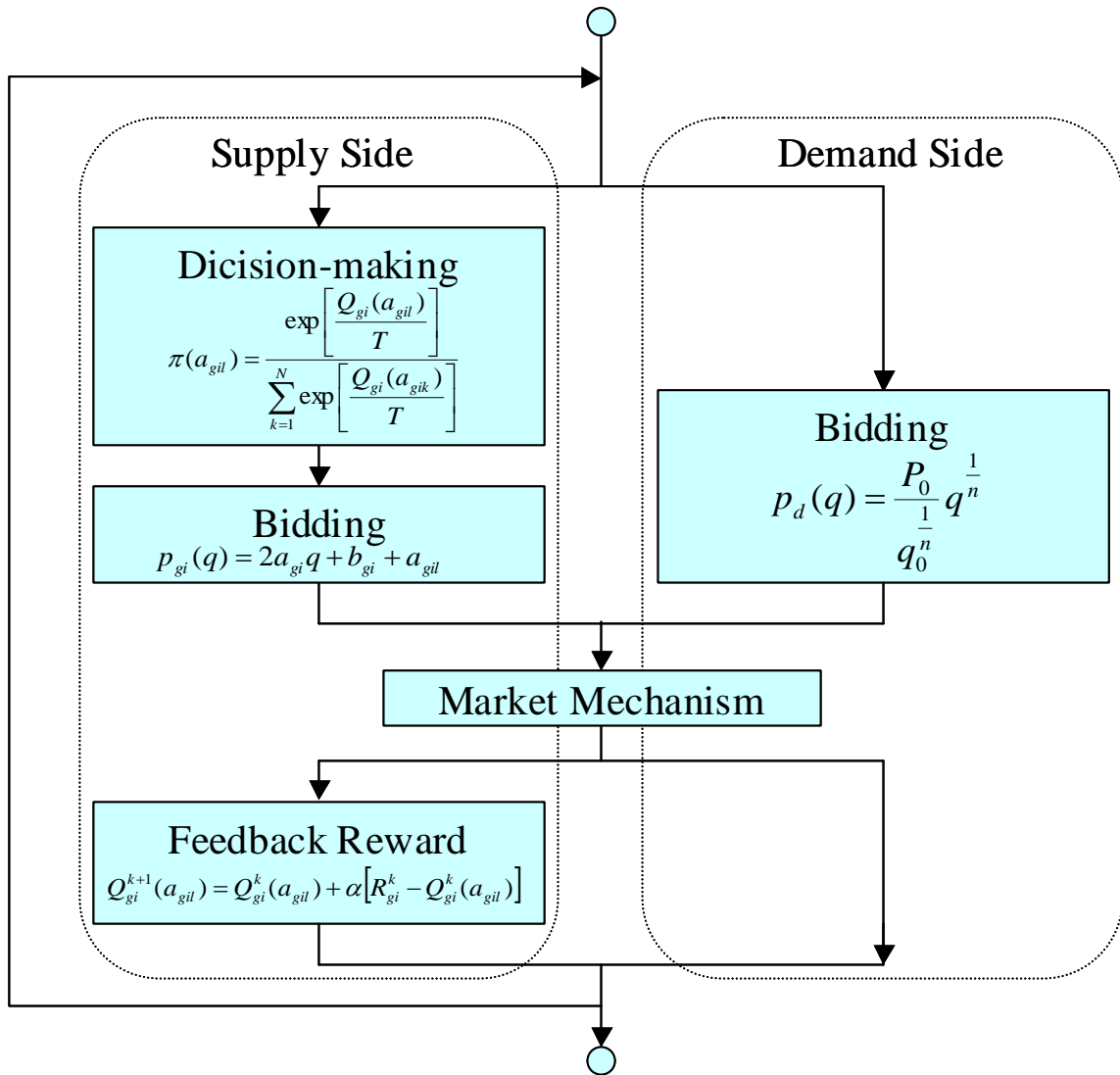


図 2-11 強化学習型市場モデルの計算フロー



### 第3章 発電事業者の入退場を考慮した電力市場分析

電力供給システムに市場原理が導入され、激しい競争の中で発電者が利益を上げようとするれば、投資対効果の低いプラントを建設するインセンティブは働かない。利益の上がないプラントは売却されると考えられる。一方、電力は貯蔵が困難であり同時同量の供給が必要である点と生活の基盤であり供給信頼性へのニーズが高いという特徴がある。これらの理由から本章では、以上のような強化学習理論によるマルチエージェント電力市場モデルを用いて、発電事業者の入退場を考慮した電力市場分析を行い、発電事業者の入退場が行われた場合の市場の動きを解析した。

まず、3.1 節で前提条件を示した後、3.2 節で電力市場を 一日前市場のみの場合、 一日前市場の後にリアルタイム市場がある場合に分けて分析を行った。ここでは同時に、市場原理により導かれる電源構成と従来の発電システム総コストを最小化した場合の電源構成との比較を行った。

次に、3.3 節においては、大企業による市場支配力の問題がしばしば指摘されている事を踏まえ、電力市場に大規模な発電事業者が存在する場合の電力市場分析を行い、大規模発電事業者のとりうる入札戦略を示すとともに、それに伴う市場の動きを分析した。

#### 3.1 前提条件

本節では解析に用いた前提条件について述べる。電力市場には様々な種類の電源プラントを持つエージェントが存在する。本モデルでは、水力、原子力、石炭火力、LNG 火力、石油火力の 5 種のプラントを想定する。また、各種プラントの燃料費<sup>13</sup>、電源設備費<sup>8,14</sup>を表 3-1 のように設定した。

表 3-1 電源設備費用

	水力	原子力	石炭火力	LNG 火力	石油火力
燃料費 [¥/kWh]	0	1.12	2.05	3.6	4.8
建設単価 [¥/kW]	404000	387000	310000	224000	191000
耐用年数 [year]	40	50	50	50	50
年経費率	0.105	0.097	0.096	0.090	0.084

次に、強化学習に基づく電力市場モデルの計算に用いた初期条件を表 3-2 のように設定した。戦略の刻み幅は非線形にし、限界費用に近い入札は細かい刻み幅で、入札上限値に近い入札は大きな刻み幅で戦略を決定できるようにし、80¥/kWh 以上の入札戦略は制限した。また、負荷追従制約などは考慮していない。

表 3-2 電力市場モデルの計算に用いた初期条件

	発電エージェント	需要エージェント
ステップ数	8760 時間 × 15000 年	
	0.25	-
入札ブロック	200MWh 毎	
状態数	24 時間	-
行動 $a$	0, ..., 20	-
戦略下限値	0	-
戦略刻み幅	$0.2 a^2$	-
入札戦略上限値	80 [¥/kWh]	-
入札上限値	80 + 限界費用 [¥/kWh]	-

### 3.1.1 従来の発電システム総コスト最小化

原価総括主義の時代には、各地域の電力会社が地域独占的に電力を供給しており、電力会社はその地域の電源計画を決定していた。その結果、電源構成は総発電システムのコスト最小化によって求められてきた。以下に、総発電システムのコスト最小化のための定式化を行う。また、ここでは負荷追従制約などは考慮していない。

#### 目的関数

$$TC = \sum_{i=1}^5 (g_i \times P_{Fi} \times Capa \times K_i + 365 \times H \times \sum_{t=0}^{23} P_{Vi} \times X_{i,t}) \rightarrow \min \quad (3.1)$$

TC：年間総発電システムコスト (k¥/year)

$X_{i,t}$ ：第  $i$  種発電エージェントの時間帯  $t$  における総発電電力 (MWh)

$K_i$ ：第  $i$  種発電エージェントの数

$g_i$ ：第  $i$  種発電設備償却期間均等化年経費率

$P_{Fi}$ ：第  $i$  種発電設備建設単価 (¥/kW)

$H$ ：時間帯幅 (ここでは一時間)

$P_{Vi}$ ：第  $i$  種発電設備の発電電力量 1kWh 当たりの燃料費(¥/kWh)

Capa：1 発電エージェントの設備容量(MW)

ただし、 $i \in \{1: \text{水力}, 2: \text{原子力}, 3: \text{石炭火力}, 4: \text{LNG火力}, 5: \text{石油火力}\}$

#### 制約条件式

電力需給バランス制約

$$\sum_{i=1}^5 X_{i,t} = Load_t \quad (t = 0, 1, \dots, 23) \quad (3.2)$$

設備容量制約

$$X_{i,t} \leq K_i \times Capa \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5)(t = 0, 1, 2, \dots, 23) \quad (3.3)$$

発電エージェント数の整数制約

$$K_i \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad (3.4)$$

水力発電エージェントの上限制約

$$K_1 \times Capa \leq Load_{14} \times 0.2 \quad (3.5)$$

$Load_t$ ：時間帯  $t$  における電力負荷 (MW)

### 3.1.2 競争原理 (発電事業者の入退場考慮)

電力供給システムに市場原理が導入されると、利益が出ている発電事業者は市場への入場が、損失を出している発電事業者は市場からの撤退が行われると考えられる。そこで、本モデルにおいて、発電エージェントは下のような入退場条件に応じて入退場を行うとした。また入場条件を満たした場合、同種のプラントが入場するものとし、水力は入退場しないものとする。

- ・入場条件 (図 3-1 のように純利益に応じて確率を変化) かつ (確率 20 分の 1)
- ・退場条件 (図 3-1 のように損失に応じて確率を変化) かつ (確率 20 分の 1)

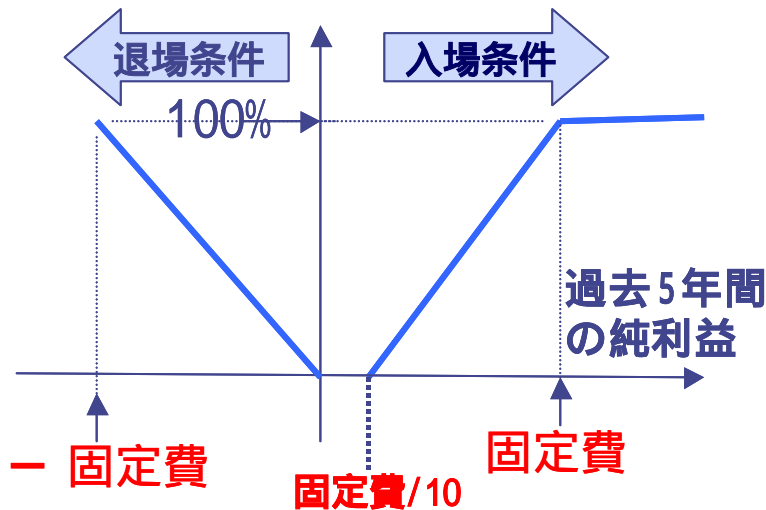


図 3-1 入退場条件

## 3.2 競争原理に基づく電源構成

### 3.2.1 一日前市場のみの場合

電力において、一日前や数時間前など通常取引であれば、価格と量の関係を入札することで、ある程度の需要量を価格に応じて調整することができる。このような市場を電力取引（PX：Power eXchange）市場という。ここでは電力の市場取引が一日前市場のみによって行われる場合について分析した。

ただし、一人の発電エージェントは一種類のプラントのみを所有し、1400 [MW]の発電容量を持つものとし、初期条件としてプラントの種類ごとに10人ずつ、計50人の発電エージェントが存在するとして計算する。

強化学習モデルにおいて、各発電エージェントは学習を繰り返し、最適な入札戦略へと行動を変化させる。そこでまず、図 3-2 に各発電エージェントの学習の様子を示す。図 3-2 は14時における全発電エージェントの入札戦略の平均値である。競争市場であるため、発電エージェントは学習により限界費用近くを入札戦略とすることが分かる。

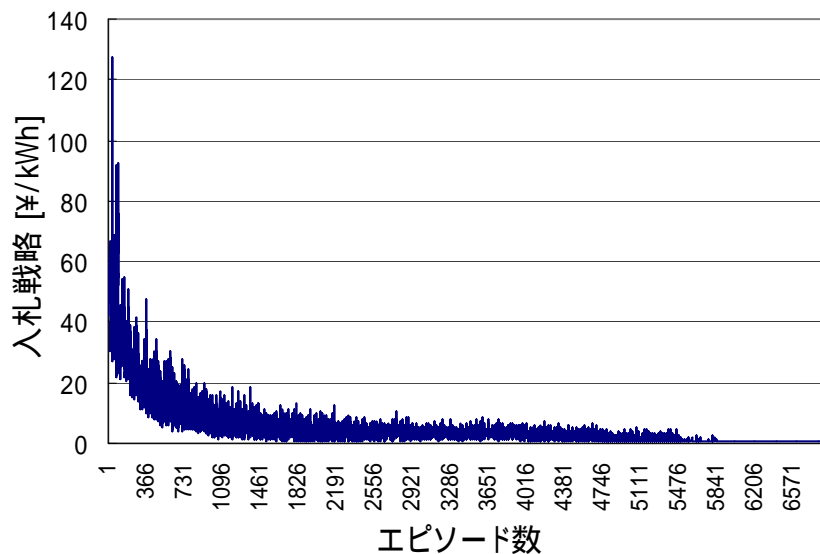


図 3-2 発電エージェントの学習の様子

また、発電エージェントは先に示した入退場条件により市場への入退場を繰り返す。種類別発電エージェント数の推移を図 3-3 に示す。

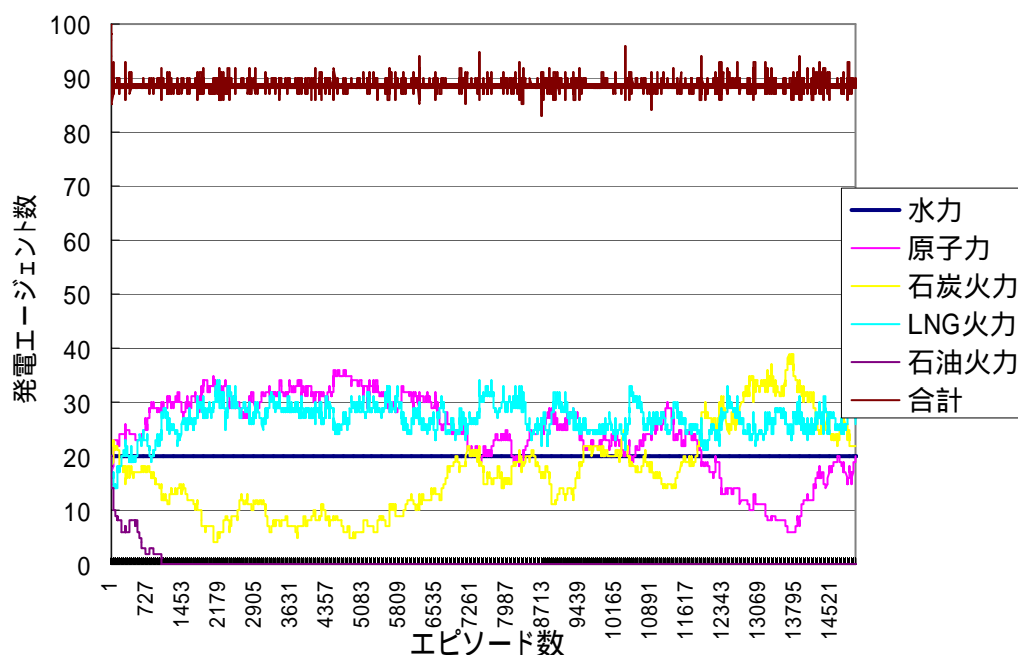


図 3-3 発電エージェント数の推移

図 3-3 より、石油火力は限界費用の低い他種のプラントに押し出される形で市場から撤退することが分かる。また、石炭火力・LNG火力・石油火力の各プラントの数は振動し、プラントの種類割合は一定に定まらない。

また、ここで原子力と石炭火力に焦点をあてる。図 3-4 は図 3-3 から原子力と石炭火力の曲線を取り出したものである。ここからわかるように、原子力と石炭火力は、一方の数が増加すれば、他方の数は減少するといった競合の関係にあることが見てとれる。これは、どちらも限界費用の値が小さく固定費の値が大きいという特徴を有し、電源のベース付近を担おうとするためであると考えられる。また、図 3-4 を見ると両者はマクロ的に見て振動しており、一定の数に収束しない。この原因としては、新しい発電エージェントは情報を持たずに市場に参入するため、自らの入札戦略を学習するのに時間がかかり、その間にさらに発電エージェントが新規に参入し、行き過ぎが生じるためと考えられる。

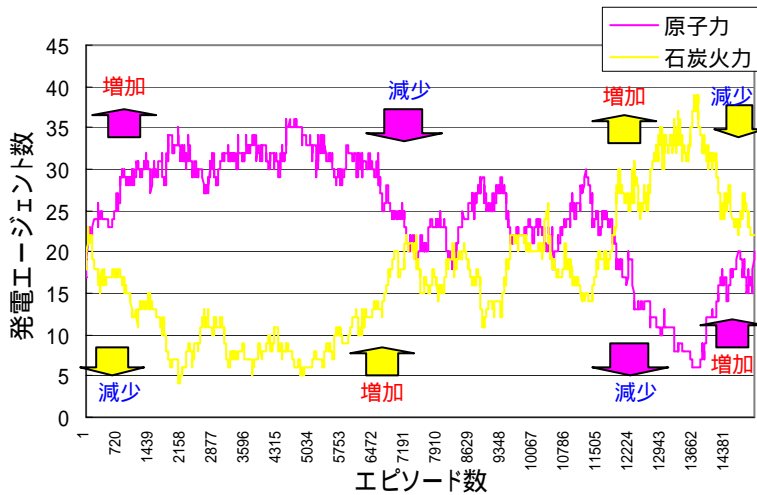


図 3-4 原子力と石炭火力の数の推移

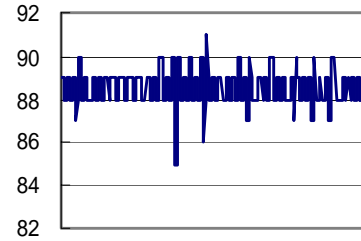


図 3-5 合計項目の拡大

次に発電エージェント数について考察する。図 3-5 に図 3-3 での合計の項目の 300 エピソード分の拡大図を示す。図 3-5 より、発電エージェント数の合計は 88 と 89 を中心に振動することが見てとれる。

続いて、図 3-6 にエピソード最終地点でのプラント種類別電力取引量を示す。また、比較のため図 3-7 に 3.1.1 節で定式化した線形計画法で求めた発電システム総コストを最小化する電源構成を示す。これらの比較から、市場原理から導かれる電源構成は振動し、発電システム総コストを最小化する電源構成とは一致しないことが確認できる。ただし、プラントの割合は振動しているため、図 3-6 は単にエピソードの最終地点での電源構成を示したに過ぎず、エピソードの他の地点ではこれとはまた異なったものになる事に注意が必要である。図 3-6 から分かるように取引量が基準需要量を満たしていない。これは、ピーク電源に十分な利益が与えられず、各発電エージェントが入退場を行った結果、ピーク電源が市場から撤退し、市場の電力供給能力が基準需要量を下回ってしまったためである。

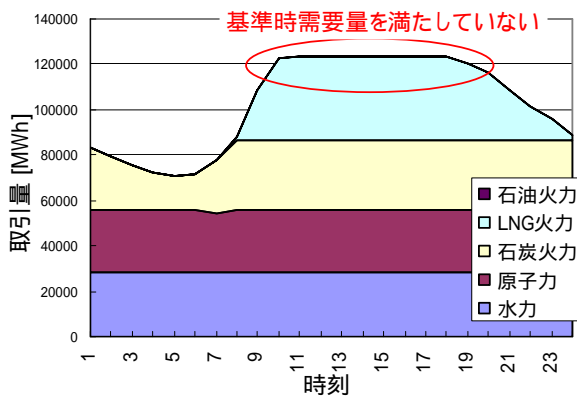


図 3-6 取引量 (競争原理)

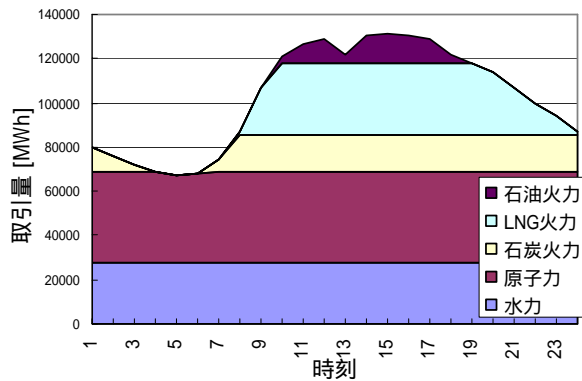


図 3-7 取引量 (発電システム総コスト最小化)

次に電力の市場価格を図 3-8 に示す。図 3-8 より、ピーク時間帯で基準需要量を満たしていないことによる価格の高騰が見て取れる。

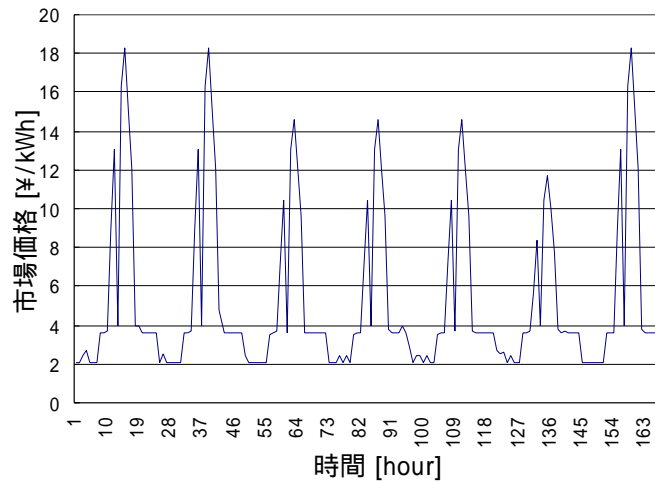
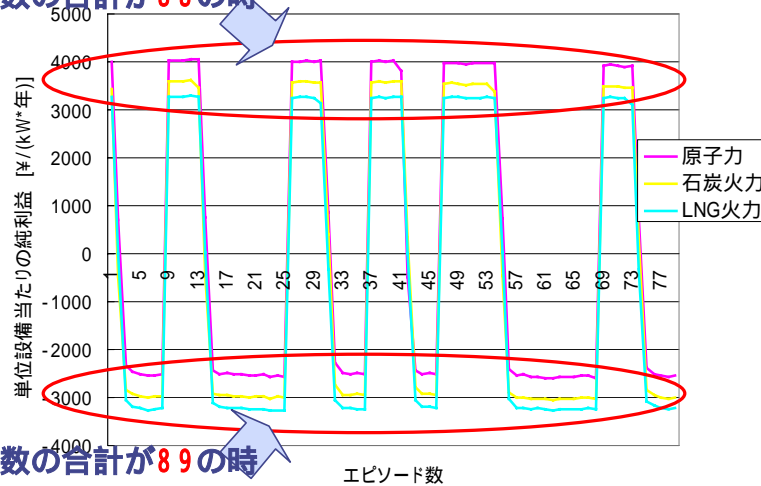


図 3-8 市場価格

これらのことを踏まえ、図 3-5 に示した合計発電エージェント数が 88 と 89 を中心に振動する現象の原因を考察する。

図 3-9 に発電エージェント数の合計が 88 または 89 であったある期間における原子力・石炭火力・LNG 火力それぞれの単位設備容量当たりの純利益を示す。図 3-9 より、発電エージェント数の合計が 88 と 89 の場合では、どのプラントも収益に大きな差が生じていることが分かる。これはピーク時間帯で価格が高騰しているため、発電エージェント数の変化が、他の発電エージェントの利益に対し大きな影響を与えるためと考えられる。これらの原因により振動が引き起こされると考えられる。

発電エージェント数の合計が 88 の時



発電エージェント数の合計が 89 の時

図 3-10 単位設備当たりの純利益

### 3.2.2 リアルタイム市場ありの場合

通常財の市場であれば、需要家は価格が高いと思えば買わなければよい。ところが電力には同時同量制約があり、需要家が実際に電力を使用する瞬間には、発電側はその需要の大きさに合わせて発電出力を調整しなければならない。そこで、ここではこのような電力は ISO が管理するリアルタイム (RT: Real-Time energy) 市場と呼ばれる市場で決済されるものとする。この市場では需要家が実際に電力を使用した後に発電者がどれだけ出力を上げたかに応じて価格が決定される。

そこで、ここでは電力市場を次のようにモデル化する。まず初めに通常市場における電力取引として前節と同じように発電エージェントと需要エージェントがそれぞれの限界費用関数と限界効用関数を基にした入札を行い、決済される。そして発電エージェントはもう一度入札を行い、需要家が実際に電力を使用する際に発生する不足電力に対して、ISO は安い入札をしたプラントから順に稼働命令を出す。そのため、実質的に需要の価格弾力性は 0 となる。本モデルでは、送電制約による潮流計算については考慮しない。その後稼働したプラントのうち最も高い入札価格が、リアルタイム市場価格として清算される。このような 2 つの市場決済手法を図 3-1-11 に示す。

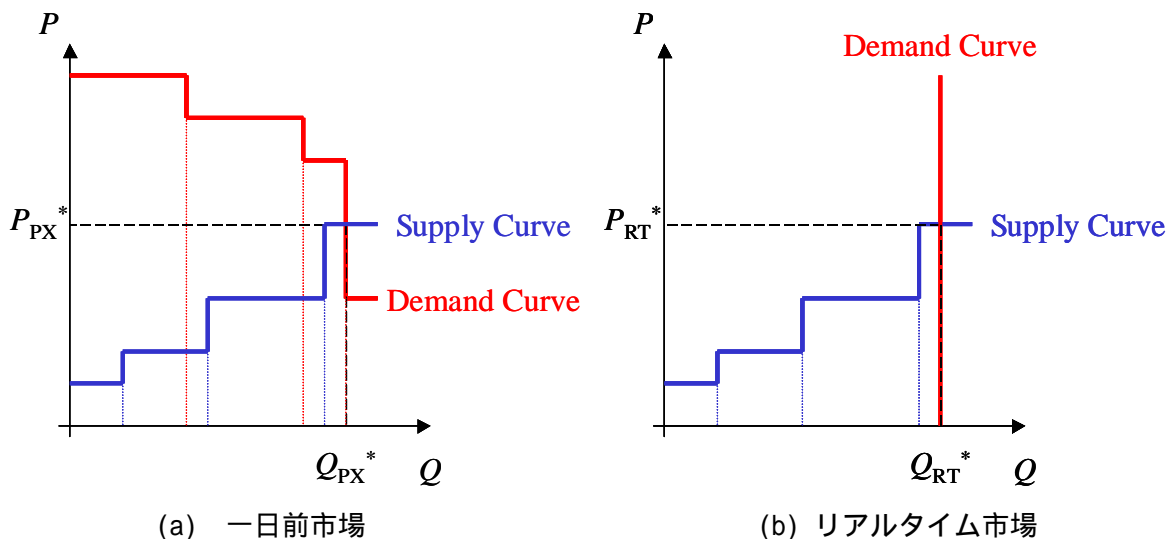


図 3-11 市場決済の様子

#### ・VOLL プライシング

リアルタイム市場の制度として、本研究では VOLL プライシング<sup>15</sup>を採用した。VOLL プライシングとは、ピーク時の価格を電力不足によって起こる限界的な価値(VOLL)を基にして設定し、この価格を上限として ISO が電力を調達するといった仕組みである。電力授受の直前における市場においては、事後的に決済が行われるため、事実上需要の価格弾力性は 0 となる。従って、発電側の電力不足が生じた際には需給均衡がなされず、価格は無限大へと発散する。これを防ぐため、上限価格を設定する手法をプライスカップという。この市場決済の様子を図 3-12 に示す。

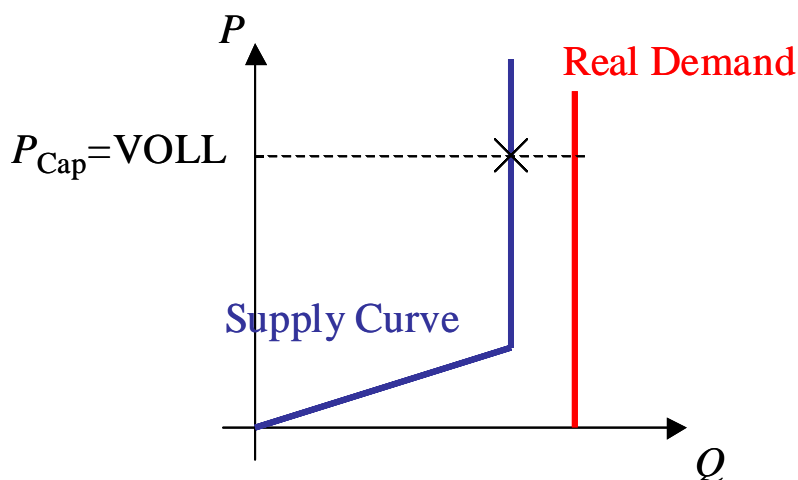


図 3-12 VOLL プライシングによるリアルタイム市場決済の様子

この仕組みの長所は、通常財と同じように限界効用を基にした市場メカニズムに基づいて価格決定がなされることである。例えば、10年に1度しか起きないような需要に対して、VOLLがプラントの固定費を回収できるほどに高ければプラントが建設され、VOLLがそれほど高くなければ負荷が遮断される。短所としては、モデルの上では限界効用を仮定することができるが、実際に電力の限界的な価値を算出することはほとんど不可能であることがあげられる。また、価格スパイクの問題がある。VOLLを見積もり、上限価格として設定すると、市場価格はごくまれに発生する需給逼迫期に、極めて高い価格をつけることになる。これは市場価格のボラティリティを大きくし、市場参加者すべてのリスクが大きくなる。特に発電事業者は、ピーク電源の建設に対して大きな投資リスクを背負うことになり、需要の伸びに対するプラント増設インセンティブが働かない。そのため急な需要増加に対して脆弱なシステムとなる危険性がある。

#### ・前提条件

ここでも一人の発電エージェントは一種類のプラントのみを所有し、1400 [MW]の発電容量を持つものとし、初期条件はプラントの種類ごとに10人ずつ、計50人の発電エージェントが存在するとして計算する。

本モデルにおける電力授受の直前に必要とされる需要は、各時間における基本需要  $Q_0(h)$  の5%が、 $\sigma=0.5$  の対数正規分布に従うと設定した。このモデル化は、カリフォルニア電力危機の際、リアルタイム市場への依存度を制限するため、既存の発電事業者が5%以上のリアルタイム取引を禁じられたという経緯<sup>4</sup>を踏まえたものである。また、一日前市場における設定は前節と同じにする。

以上に述べたように、1日のうちに電力取引を行う市場を2つ考慮し、需要エージェントは電力取引市場で約定した電力量を超える分の需要をリアルタイム市場からの調達で賄う。ただし今回、図3-12のようにVOLLに基づくプライスカップを設け、85¥/kWhとする。

発電エージェントは24時間・2市場の計48状態の行動価値関数を持ち、それぞれの戦略を決定する。発電エージェントのその他の設定は前節と同様とする。ただし、負荷追従性を考慮して、原子力と石炭火力はリアルタイム市場への参加を不可とする。

また、1時間毎の二つの市場決済により、報酬が得られるまでを1エピソードとし、ある季節、ある時間に得られた報酬を、各市場の行動価値関数へとフィードバックするモンテカルロ法を用いる。ある時間  $h$  ( $h < 24$ ) において、2つの市場  $m_{px}$ ,  $m_{rt}$  に対してそれぞれ行動  $a_{px}$ ,  $a_{rt}$  を選択した時、この1日の報酬が  $R$  であった場合、行動価値関数を次式のように更新する。



$$Q_{k+1}(h, m_{px}, a_{px}) = Q_k(h, m_{px}, a_{px}) + \alpha [R - Q_k(h, m_{px}, a_{px})]$$

$$Q_{k+1}(h, m_{rt}, a_{rt}) = Q_k(h, m_{rt}, a_{rt}) + \alpha [R - Q_k(h, m_{rt}, a_{rt})]$$

(3.6)

この一連の計算の流れを図 3-13 に示す。

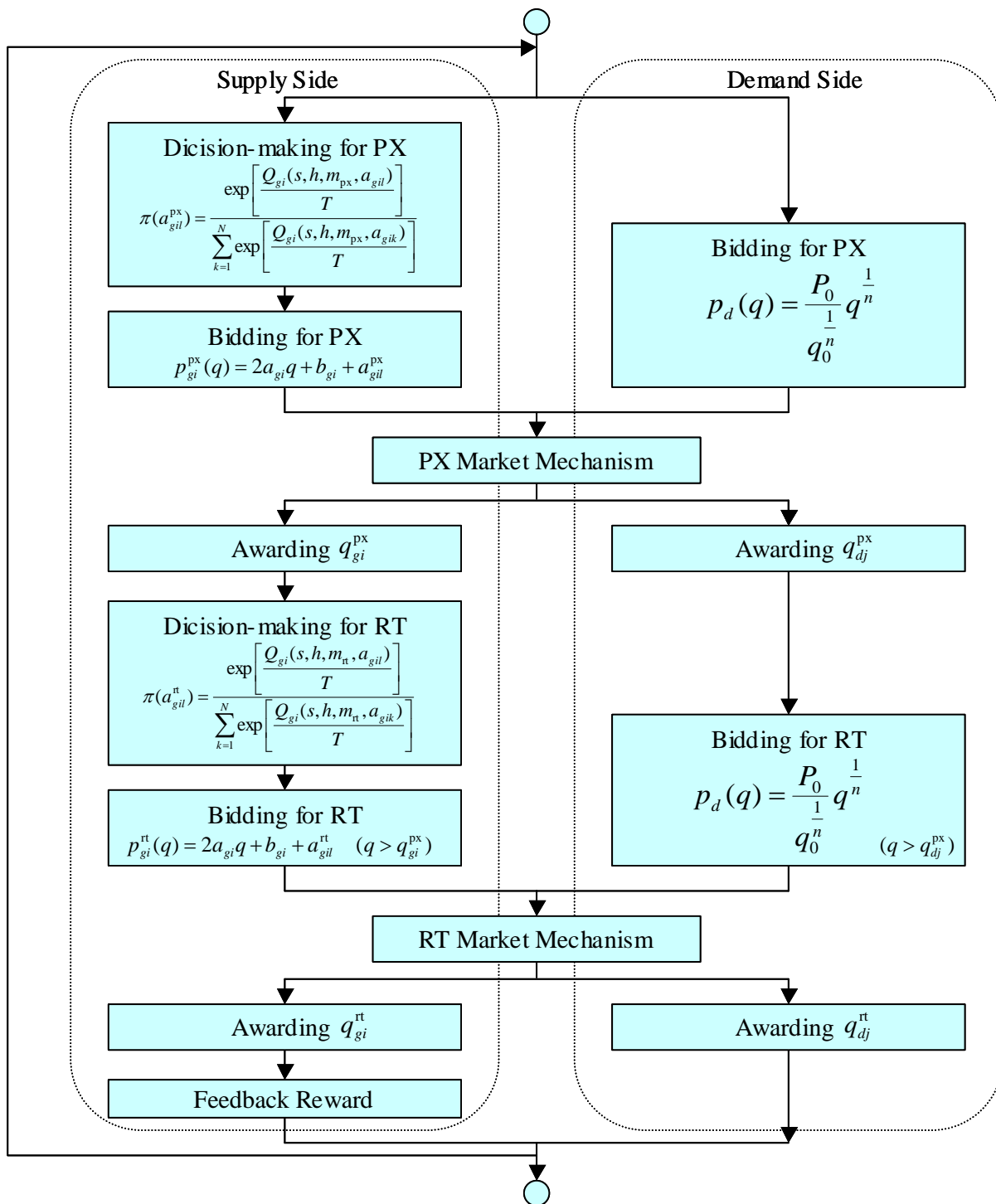


図 3-13 電力市場モデルにおける計算の流れ

・ 計算結果

リアルタイム市場を考慮した場合について、種類別発電エージェント数の推移を図 3-14 に示す。また、エピソード最終地点でのプラント種類別電力取引量を図 3-15 に示し、一日前市場のみの場合の電源構成（図 3-6）を再度示し比較する。

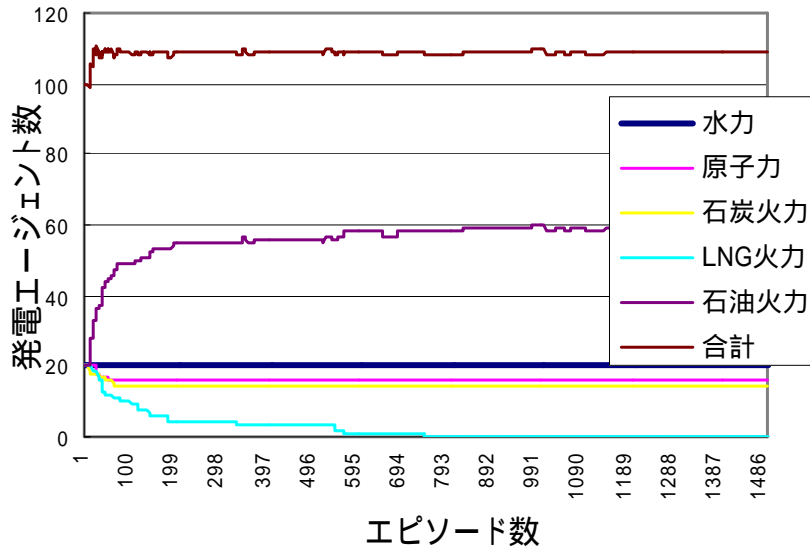


図 3-14 発電エージェント数の推移

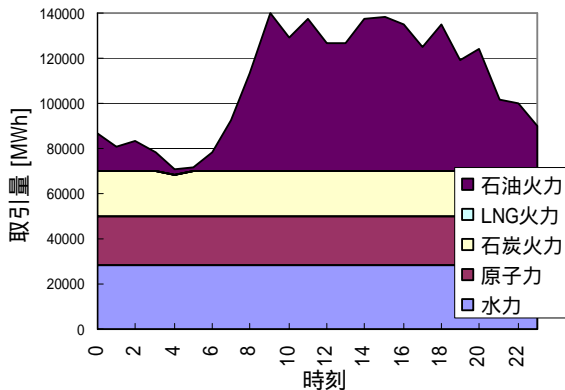


図 3-15 リアルタイム市場あり

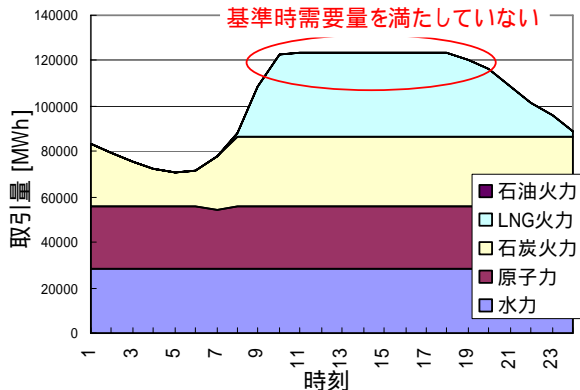


図 3-16 一日前市場のみ

図 3-14、図 3-15 よりリアルタイム市場で利益を出した石油火力がシェアを伸ばしていることが分かる。LNG火力は石油火力に押し出される形で市場から撤退する。このことから、LNG火力と石油火力は競合の関係にあるといえる。

また、図 3-15 から、リアルタイム市場がある場合、ピーク電源にも十分な利益を生み、市場は基準需要量を超える電力供給能力を保つことができることが分かる。

次に、図 3-17 に一日前市場の市場価格を示す。基準需要量を満たしているため、リアルタイム市場が無いときに比べ市場価格が低下していることが分かる。また、図 3-14 を見ると、全発電エージェント数は約 109 となり、図 6 で見られたような発電エージェント数の振動がほとんどない。これはリアルタイム市場がある場合には市場に十分な数の発電エージェントが存在しており基準需要を満たしているため、一日前市場の市場価格が低く抑えられ、発電エージェント数が変化した際の各発電エージェントの利益に対する影響が少ないことが原因と考えられる。

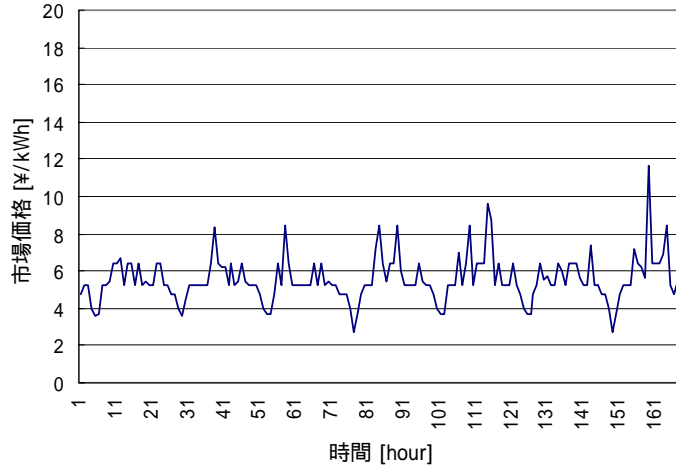


図 3-17 一日前市場の市場価格

・ プライスキャップによる感度解析

以上のように、リアルタイム市場を設けることで、ピーク電源を持つ発電エージェントの利益を増加させ、市場に基準需要量を満たすだけの供給能力が存在できることが確認された。

そこで、プライスキャップの値により、市場にどのような変化が生じるかを感度解析する。

ここでは、VOLL プライシングのプライスキャップ  $r_{cap}$  を 50¥/kWh 及び 20 ¥/kW(h) として解析を行った。その時の発電エージェント数の推移と取引量を図 3-17 ~ 図 3-20 に示す。

$r_{cap}=50¥/kWh$  の場合

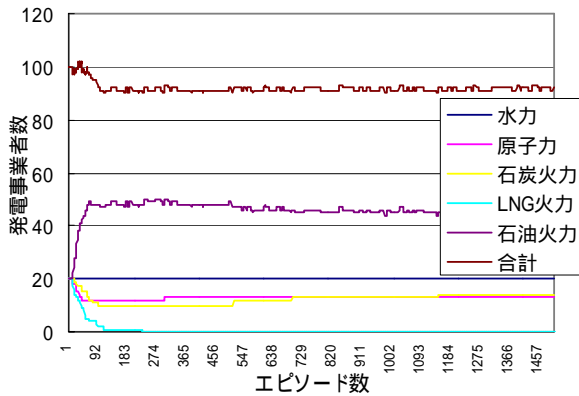


図 3-17 発電エージェント数の推移

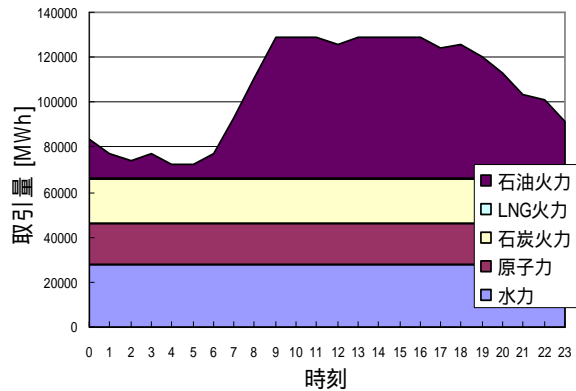


図 3-18 取引量

$r_{cap}=20\text{円/kWh}$  の場合

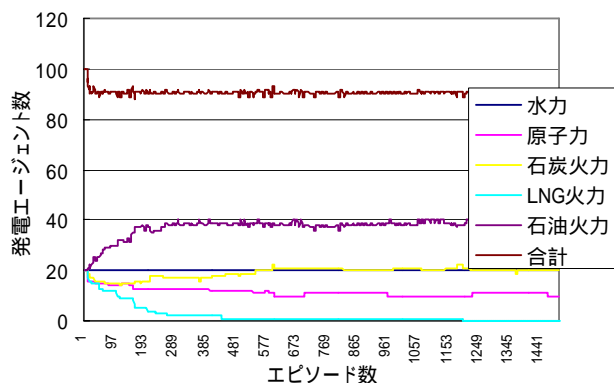


図 3-19 発電エージェント数の推移

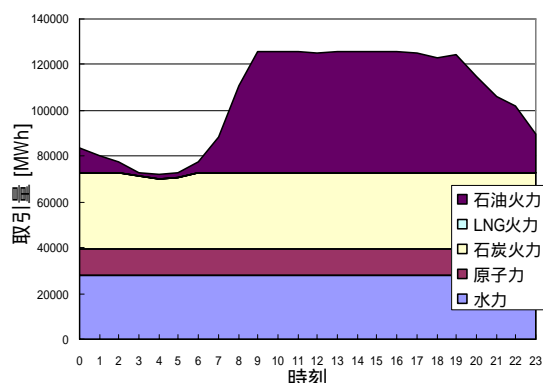


図 3-20 取引量

図 3-17 ~ 図 3-2 よりプライスカップが低くなるにつれ、ピーク電源に十分な利益が与えられず、発電エージェント数及び取引量は減少し、基準需要量を満たさなくなることが分かる。また、それに伴う発電エージェント数の振動の増加が確認できる。

### 3.3 大規模な発電事業者が存在する場合の電力市場分析

自由化により競争が導入された公益事業において、大企業による市場支配力の問題がしばしば指摘される。電力について考える場合、貯蔵が難しく、ネットワークを通して供給されるため、時間的にも空間的にも独占的な状況が生まれやすい。そこで本章では、電力市場に一人の複数の種類のプラントを所有する大規模な発電事業者が存在する場合についての分析を行う。ただし、ここでは一日前市場のみを考慮した。

#### 3.3.1 発電エージェントのモデル化

##### ・大規模発電事業者

###### 発電容量

水力・原子力・石炭火力・LNG火力・石油火力の5種類のプラントを図 3-21 の割合で所有し、初期総発電容量はピーク需要量の 110%とする。

###### 入札方法

水力・原子力は定格運転が必要であるため限界費用をそのまま入札するものとする。石炭火力・LNG火力・石油火力の入札は、戦略をとった場合、図 3-22 のようにそれぞれの限界費用に を上乗せして入札するものとする。

###### 決算方式

各種類のプラントの決済を連結する連結決算(図 3-24)とし、これを行動価値関数 Q 値の更新、設備増設・削減判定に適用する。

###### 増設・削減条件

図 3-26a のように純利益及び損失によって確率を変化させる。また、増設が行われる場合は図 3-22 の割合で全種類のプラントを増設し、削減が行われる場合は利益率の低い種類のプ

ラントを削減する。

### ・小規模発電エージェント

#### 発電容量

エージェントは石炭火力・LNG火力・石油火力いずれか1種類のプラントを所有するものとし、発電容量は大規模発電事業者の100分の1とする。

エピソードの最初は石炭火力・LNG火力・石油火力それぞれ1エージェントずつが存在するものとする。

#### 入札方式

図 3-23 のように所有しているプラントの限界費用に戦略  $g_i$  を上乗せして入札するものとする。

#### 決算方式

単独決算(図 3-25)とし、これを行動価値関数  $Q$  値の更新、入場・退場の判定に適用する。

#### 入退場条件

(図 3-26b) のように純利益及び損失によって確率を変化)かつ(確率 1/20)で入退場を行う。入場が行われる場合は自分の所有しているプラントを新たに入場させる。

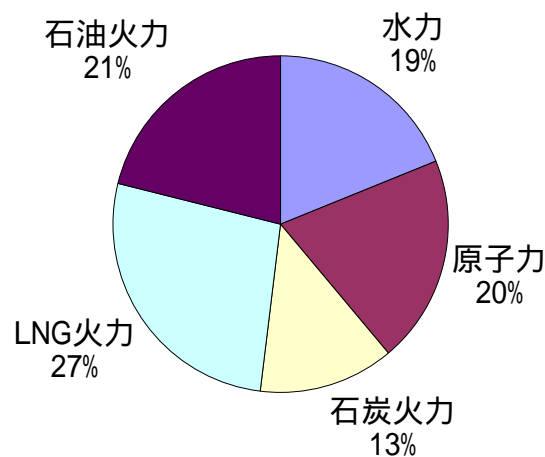


図 3-21 大規模発電事業者の初期電源構成

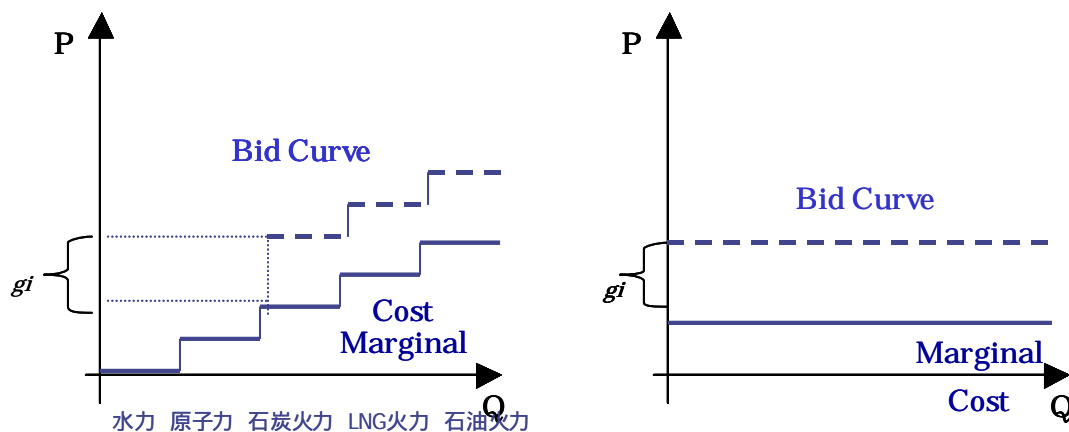


図 3-22 入札戦略(大規模発電事業者)

図 3-23 入札戦略(小規模発電事業者)

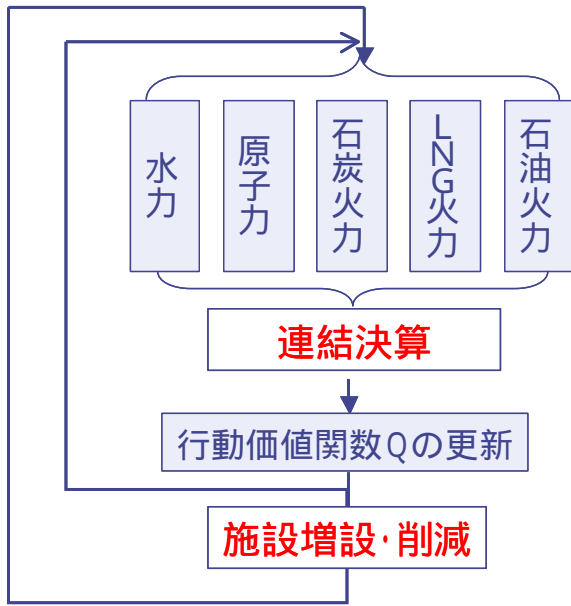


図 3-24 連結決済（大規模発電事業者）

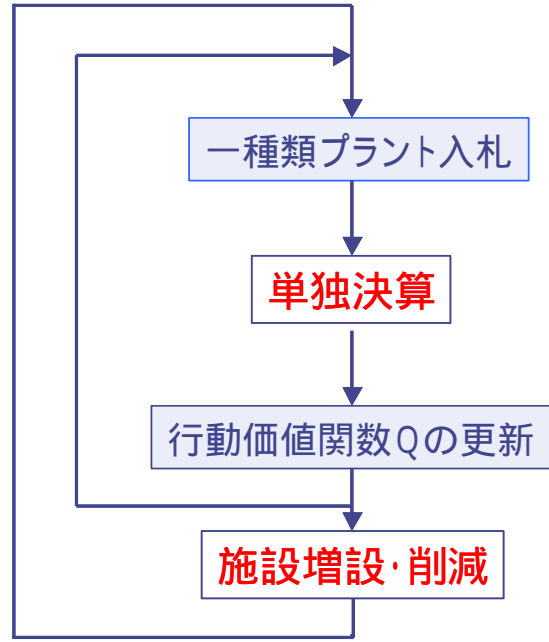


図 3-25 単独決済（小規模発電事業者）

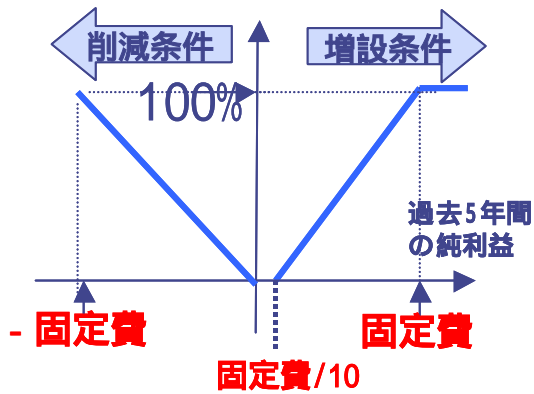


図 3-26a 大規模発電事業者の増設・削減条件

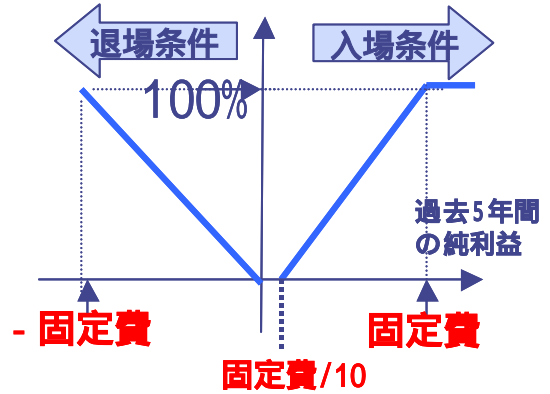


図 3-26b 小規模発電事業者の入退場条件

### 3.3.2 計算結果

図 3-27 に市場原理の基での各部門別設備容量の推移を示す。図 3-27 から小規模発電事業者（石炭）が大きく設備を増やし、大規模発電事業者の火力部門（石炭・LNG・石油）が設備を減らしていることが見て取れる。また、新規参入の合計設備容量が 68600 と 67200[MW]（小規模発電エージェント数 48 と 49）の間で振動していることが見て取れる。さらに、エピソード最終地点で総発電設備容量は 136159 [MW]となり、ピーク時間帯の基準需要量を超える。

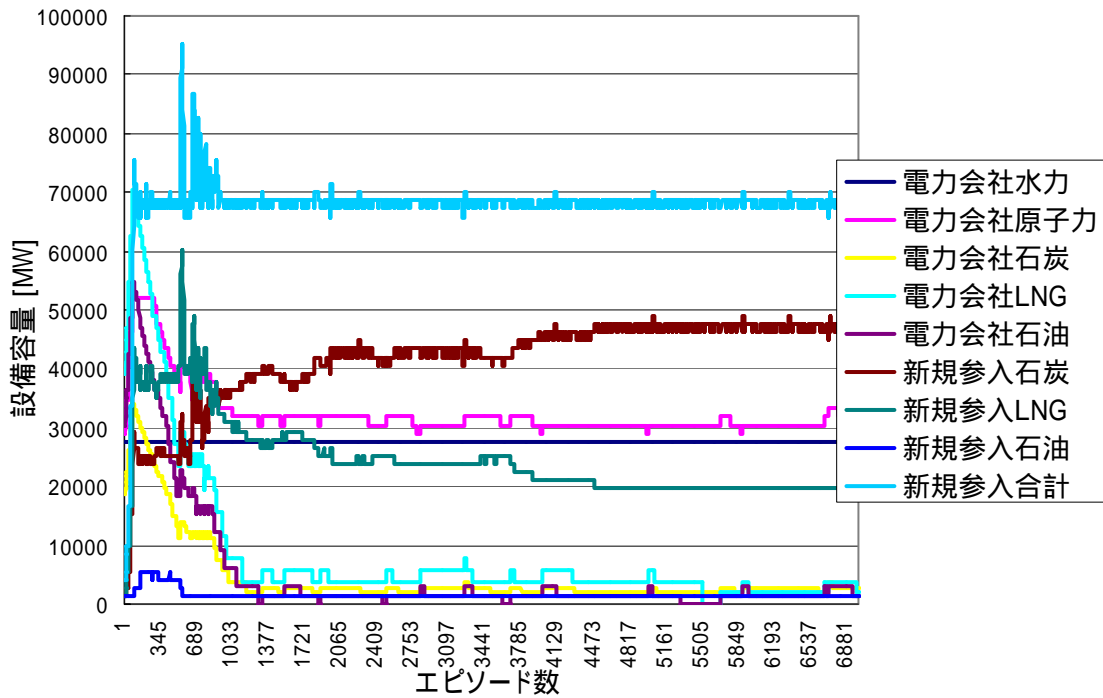


図 3-27 各部門別設備容量

続いて、図 3-28 図 3-29 に最終エピソードの取引量及び最終 7 日間の市場価格を示す。図 3-28 を見ると、市場には基準需要量を満たすだけの供給能力があるにもかかわらずピーク時間帯で取引量は基準需要量を満たしていない。また図 3-29 より、それに伴うピーク時間帯で市場価格の高騰が見て取れる。

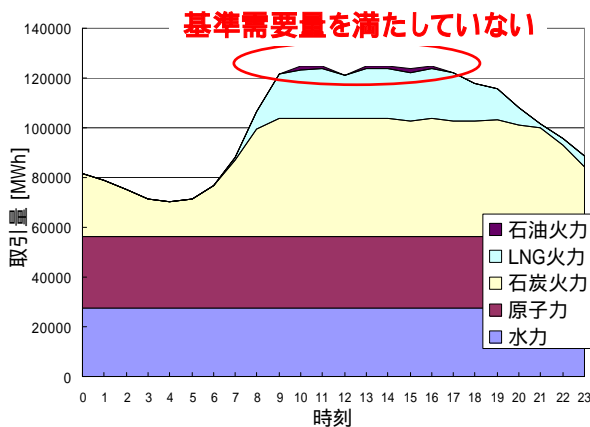


図 3-28 取引量

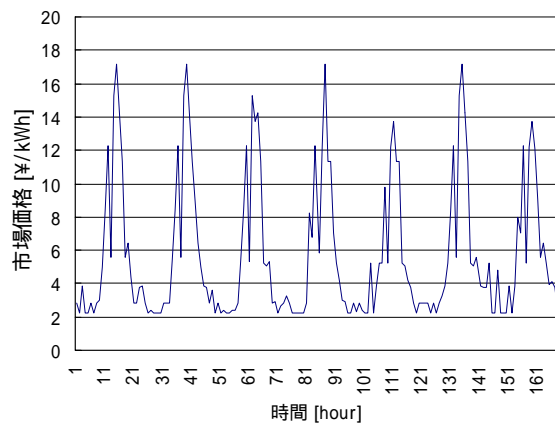


図 3-29 市場価格

ここで、なぜ市場には基準需要量を満たすだけの供給能力があるにもかかわらずピーク時間帯で取引量は基準需要量を満たしていないかを考察する。

図 3-30 及び図 3-31 に小規模発電事業者と大規模発電事業者の入札戦略の推移を示す。ただし、小規模発電事業者の値は、全小規模発電事業者の平均をとったものである。

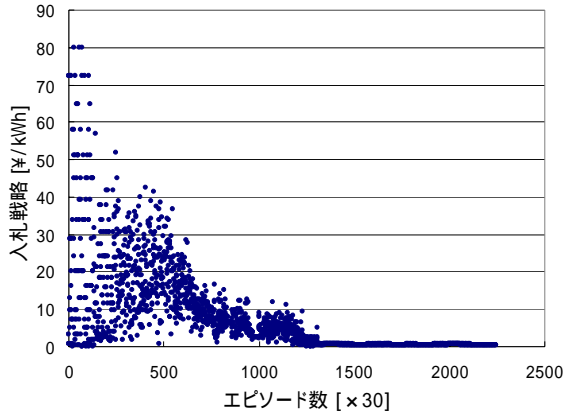


図 3-30 入札戦略の推移 (小規模発電事業者)

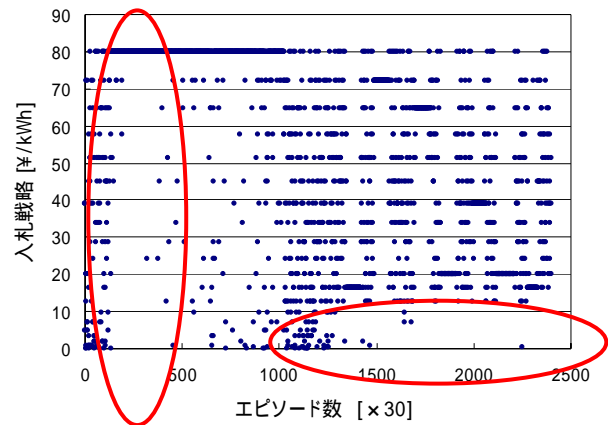


図 3-31 入札戦略の推移 (大規模発電事業者)

小規模発電事業者は確実に落札される事を望むため限界費用付近を入札戦略としていることが分かる。

大規模発電事業者は、エピソードの初期段階ではほぼ独占状態の場合のため、入札戦略の上限値を戦略とする (左の赤丸)。しかし、小規模発電事業者の入場が行われ市場が競争的になっていくため、大規模発電事業者は再び戦略の探索を始める。そして、入札戦略を 12 ¥/kWh 以上とするように学習していることが分かる (右の赤丸)。これは、小規模発電事業者の入場後も大規模発電事業者は価格操作が可能であるため、価格をつり上げる入札戦略をとっている事を示している。具体的に図 3-32 によって説明する。

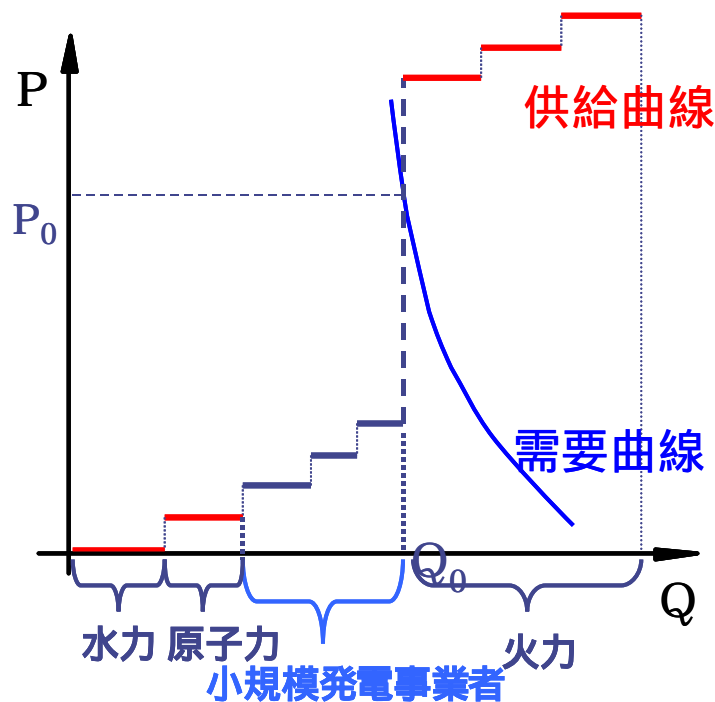


図 3-32 大規模発電事業者の入札戦略



大規模発電事業者の水力と原子力は設定により限界費用を入札しており、小規模発電事業者は学習により限界費用付近を入札しているため、もしも大規模発電事業者が火力部門（石炭・LNG・石油）も低い入札をすると、市場価格も低い額に決定してしまう。そこで、大規模発電事業者は、市場価格をつり上げて自身が所有する水力と原子力部門に利益をもたらすために、自身の火力部門の落札量を捨てて火力部門の入札額を  $P_0 \text{ ¥/kWh}$  以上にする。 $P_0$  は需要曲線と水力・原子力と小規模発電事業者の合計入札量の垂線との交点である。また、大規模発電事業の火力部門の入札額が  $P_0$  以上ならば市場価格に影響しないため、図 3-31 において、大規模発電事業者は  $(P_0 - \text{限界費用})$  以下の入札戦略はとらないが、 $(P_0 - \text{限界費用})$  以上の入札戦略は収束していない。

### 3.4 まとめ

本章では、強化学習理論に基づくマルチエージェントモデルを用いて、発電事業者の入退場を考慮に入れた電力市場モデルを構築し分析を行った。まず始めに、各エージェントが動的環境の中でも学習し、最適な行動へと変化させることを示した。

市場方式として一日前市場のみの場合及びリアルタイム市場がある場合について分析を行った。

一日前市場のみの場合、市場原理に委ねるとピーク電源に十分な利益が与えられず、石油火力が市場から撤退し、市場全体の電力供給能力はピーク時間帯の基準需要量を満たさない事を示した。また、それに伴うピーク時間帯での価格の上昇を示した。続いて、市場原理により導出される電源構成と発電システム総コストを最小化する電源構成との比較を行った。競争原理により導出される電源構成は振動し、割合は一定にならないことを示すとともに、その振動の動きから原子力と石炭火力は競合の関係にある事を示した。さらに市場全体の発電容量が細かく振動するメカニズムについても解説した。

リアルタイム市場がある場合、リアルタイム市場で利益を出すことが可能になった石油火力が大きくシェアを伸ばし、市場全体の電力供給能力はピーク時間帯の基準需要量を満たす事を示した。しかし一方で、石油火力と競合の関係にある LNG 火力は市場から撤退してしまう結果となった。しかし、このような状況は  $\text{CO}_2$  排出削減やエネルギーセキュリティーの面からは好ましいとはいえない。何らかの政策的対応が必要といえる。また、リアルタイム市場がある場合にはプラントの種類が一定になる事及び市場全体の発電容量の振動が少なくなる事を示した。最後にプライスカップによる感度解析を行い、プライスカップの市場に対する影響を示した。

続いて、複数の種類のプラントを所有する大規模な発電事業者が存在する場合について分析を行った。大規模発電事業者の火力部門（石炭・LNG・石油）は小規模発電事業者（石炭）に大きくシェアを奪われる事を示した。また、大規模発電事業者は小規模発電事業者の市場への参入度合いに応じて入札戦略を変化させ、最終的には自身が所有する水力と原子力部門に利益をもたらすために、自身の火力部門の落札量を捨てて火力部門の入札戦略を高く保ち、市場価格をつり上げることを示した。その結果、市場には基準需要量を満たすだけの供給能力があるにもかかわらずピーク時間帯で取引量は基準需要量を満たさなくなる事態が起ることを確認した。以上から、大規模な発電事業者が存在する場合、電力は価格弾力性が小さいため、小規模発電事業者の入場後もピーク時間帯で大規模電気事業者が価格決定権を持つことが分かった。



## 4.1.2 JEPX 市場方式

ここでは、JEPX の市場方式<sup>16</sup>について解説する。以下の段階を踏んで市場決済が行われる。

- 1 発電及び需要エージェントは各自、価格・電力量・地域を市場に入札する。
- 2 入札が締め切られたら、まずは地域を考慮せず1つの市場と考慮して決済する(図4-2)。

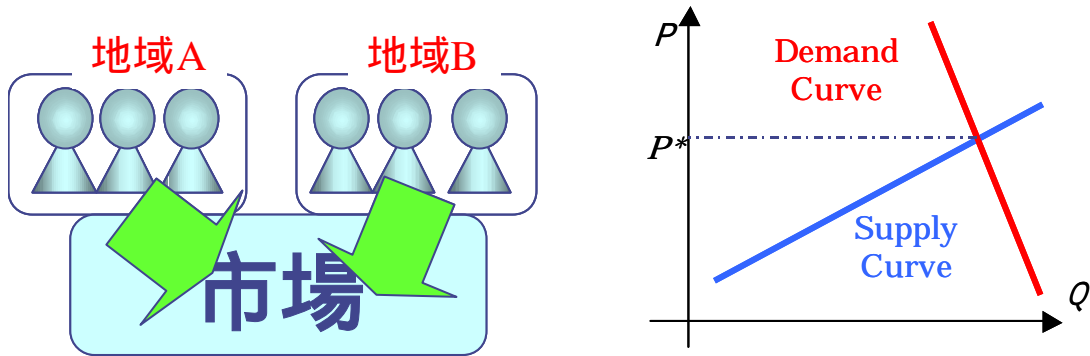


図 4-2 JEPX 市場方式 1

- 3-1 連系線制約を満たした場合には決済が確定する。
- 3-2 連系線制約を満たさなかった場合は、地域毎に市場を分断した後、託送可能量の最大値を送電するよう処理し、再度それぞれの市場で決済する。この場合、価格は地域ごとに異なることになる(図4-3)。

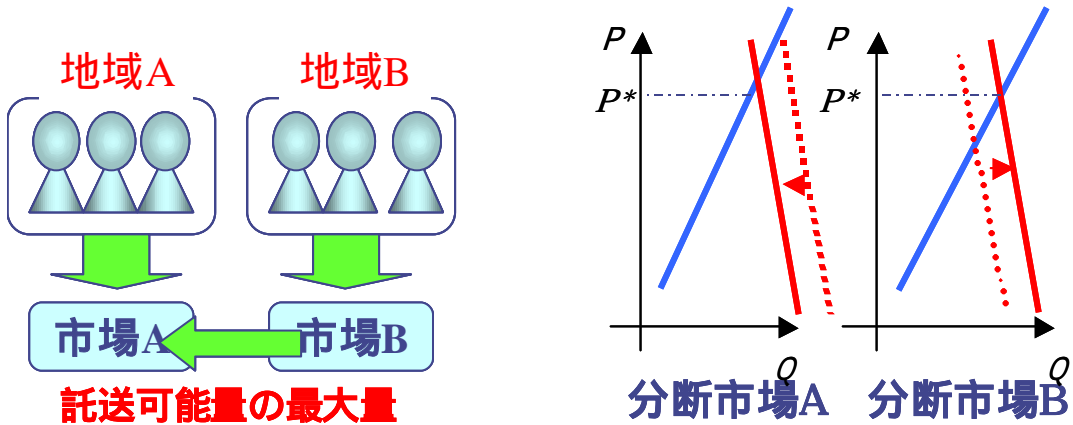


図 4-3 JEPX 市場方式 2

## 4.2 発電事業者の意思決定の分析

### 4.2.1 前提条件

JEPX モデル構築に向けた準備的検討として、連系線で結ばれた2地域を対象に JEPX の市場アルゴリズムを用いて分析を行った。まず図 4-4 のように地域 A を寡占的、地域 B を競争的な市場とし、表 4-1 のような前提条件を定め強化学習理論によるマルチエージェントモデルを用いて分析を行った。

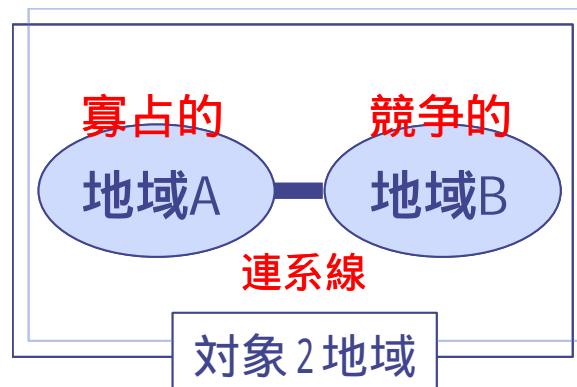


図 4-4 地域の条件設定

表 4-1 前提条件

	地域 A	地域 B
エピソード数	10000	
発電エージェント数	2 (寡占的)	10 (競争的)
1 エージェントの設備容量 [MW]	30000	6000
発電コスト [k¥/MW] $C(q) = aq^2 + bq + c$	$a : 0.00008 / (1/2),$ $b : 0, c : 0$	$a : 0.00008 / (1/10),$ $b : 0, c : 0$
行動数	21	
入札戦略の上限値 [¥/kWh]	80	
入札上限値 [¥kWh]	80 + 限界費用	
需要エージェント数	1	1
需要量 [MWh]	50000	50000

### 4.2.2 価格の託送可能量による感度解析

電力は価格弾力性が小さく、市場支配力が大きくなるという特徴を有している。特に日本のような電力系統がくし型で地域間の連系線の託送可能量が小さいため、自由化後も市場が競争的にならないという指摘がされている。そこで、地域 A・B それぞれの市場価格について連系線の託送可能量を変化させて感度解析を行った。図 4-4 図 4-5 に地域 A 及び B の託送可能量による感度解析の結果を示す。ただし、託送料金は考慮していない。

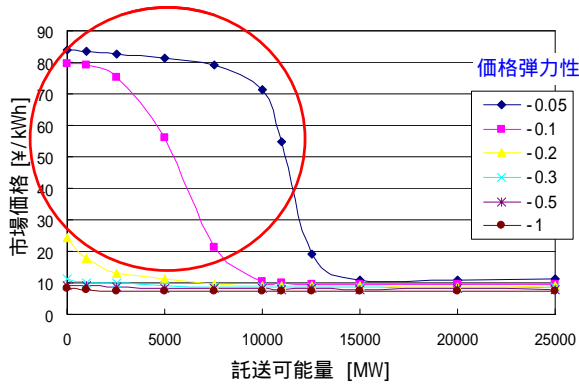


図 4-4 託送可能量による感度解析 (地域 A)

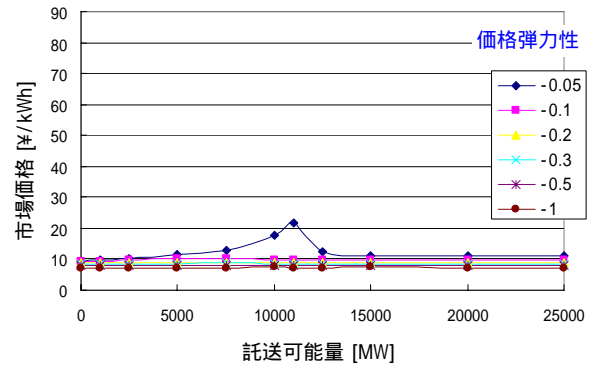


図 4-5 託送可能量による感度解析 (地域 B)

図 4-4 より、連系線の託送可能量が増えるほど市場が競争的となるため、地域 A の市場価格は低くなるのがわかる。また図 4-5 を見ると、地域 B から地域 A への託送が行われているため、託送可能量 11000[MW]付近で B 地域の価格は上昇することが分かる。

ここで、市場価格が高騰する価格弾力性が小さいケース(-0.05,-0.1)の発電エージェントの入札戦略を詳しく考察する。図 4-6 と図 4-7 に価格弾力性が-0.05 及び-0.1 である場合の地域 A の発電エージェントの入札戦略の託送可能量による感度解析を示す。

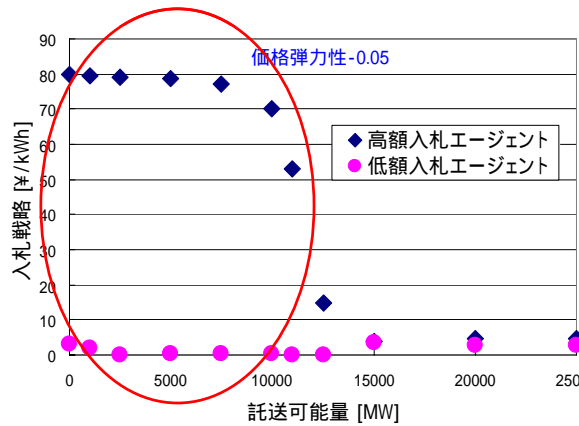


図 4-6 地域 A の発電エージェントの入札戦略 (-0.05)

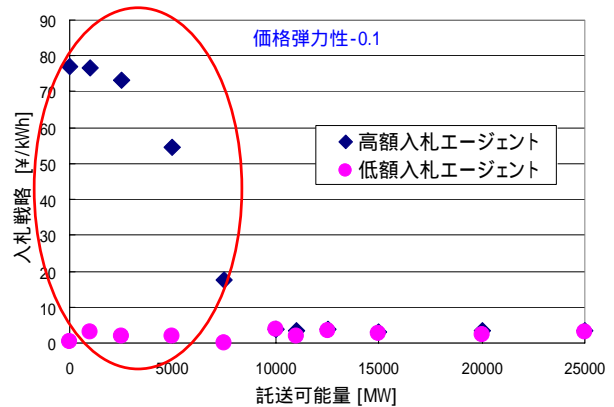


図 4-7 地域 A の発電エージェントの入札戦略 (-0.1)

価格弾力性が-0.05 及び-0.1 のどちらのケースにおいても託送可能量が小さい場合、2人の発電エージェントは高額入札エージェントと低額入札エージェントにはっきりと分かれることが確認される(ただし、2人の発電エージェントは等質であるため、託送可能量を変化させるごとに高額入札と低額入札が入れ替わることもある)。この原因を以下に示す<sup>8</sup>。

通常の理想的な市場を考える場合、等質なエージェントは等しい入札をするものと考えられる。この様子を図 4-8 に示す。

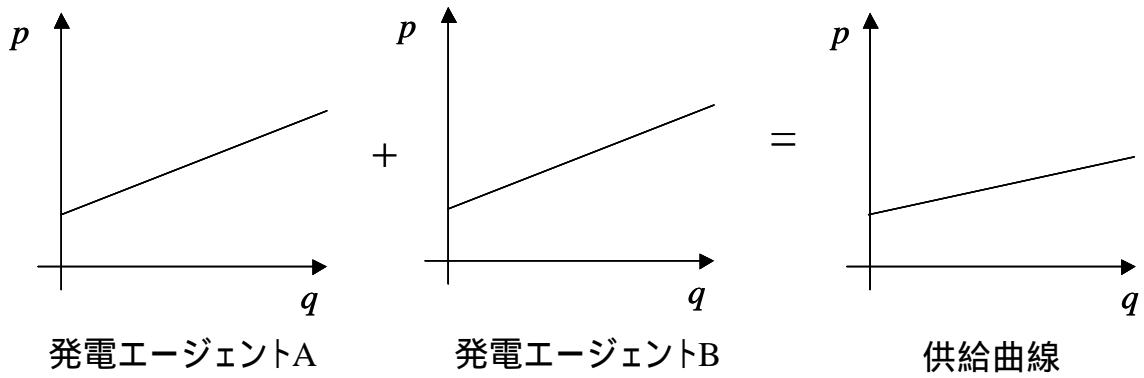


図 4-8 等質なエージェント 2 人による通常の入札メカニズム

ところが、強化学習モデルにより試行錯誤を重ねて戦略を探索するモデルにおいては、必ずしも両者が同じ戦略を出さない場合が存在し、また両者の最大出力量は制限されているため、市場の供給曲線は図 4-9 のようになる場合が存在する。

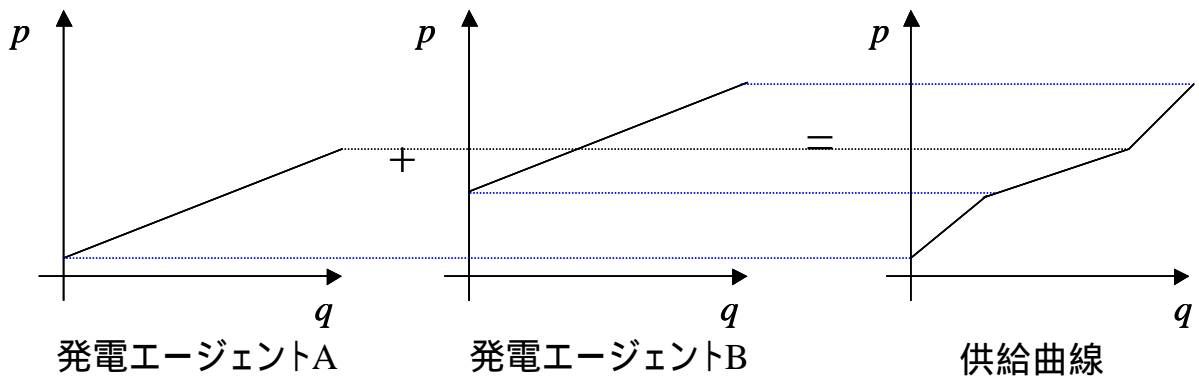


図 4-9 両者の入札が異なる場合の入札メカニズム

この時需要の価格弾力性が十分に大きく、供給力に余裕がある場合には、図 4-10 のような通常の市場メカニズムが働く。

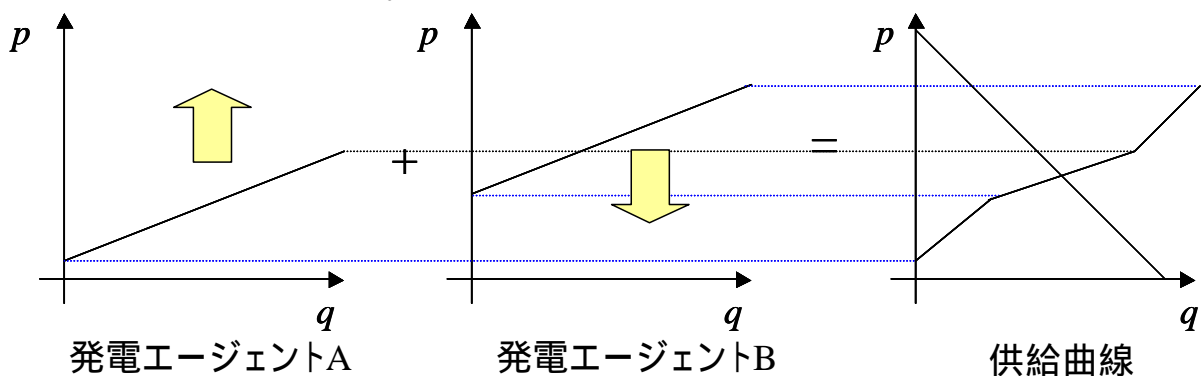


図 4-10 通常の市場均衡点へと収束する市場メカニズム

低い入札を行った発電エージェントには、入札を高くして、自分の落札量を犠牲にしても取引価格を上げようとするインセンティブが働く。一方で高い入札を行った発電エージェントには、入札を低くして、市場価格を下げることになっても自分の落札量を増やそうとするインセンティブが働く。このようなメカニズムが働くことにより、両者の入札は次第に近づ

いていき、最終的には両者の戦略が等しくなって収束する。つまりどちらのエージェントも、自分の戦略をどのように動かしても利益が下がってしまう競争解へと落ち着く。

ところが需要の価格弾力性が小さく、託送可能量が小さい場合には、図 4-11 ような通常とは異なる市場メカニズムが働き得る。

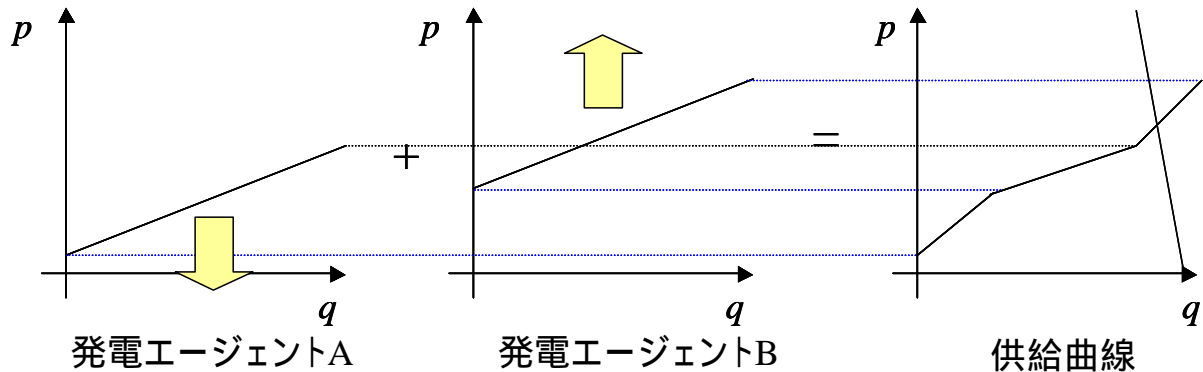


図 4-11 局所解へと収束する市場メカニズム

図 4-11 に示されるようなケースでは、発電エージェント A の入札は市場価格の決定に全く寄与していないことがわかる。従って低い入札を行った発電エージェントには、入札を高くするインセンティブは働かず、むしろ落札を確実なものにするために、入札を下げようとするインセンティブが働く。一方発電エージェント B には、市場価格が自分の入札のみに影響されるように見える。そのため高い入札を行った発電エージェントには、自分の利益が最大となる価格まで入札を高くしようとするインセンティブが働く。

以上より、価格弾力性がと託送可能量が小さい場合には、通常の競争による市場メカニズムが働かず、価格を設定するプライスセッターと、その価格を享受するプライステイカーの 2 つに分かれてしまうケースが存在するということができる。そして、このようになる条件は、プライスセッターが自らの売電量を犠牲にして独占的な価格を設定しても、競争時よりも大きいか、同程度の利益が見込める場合である。

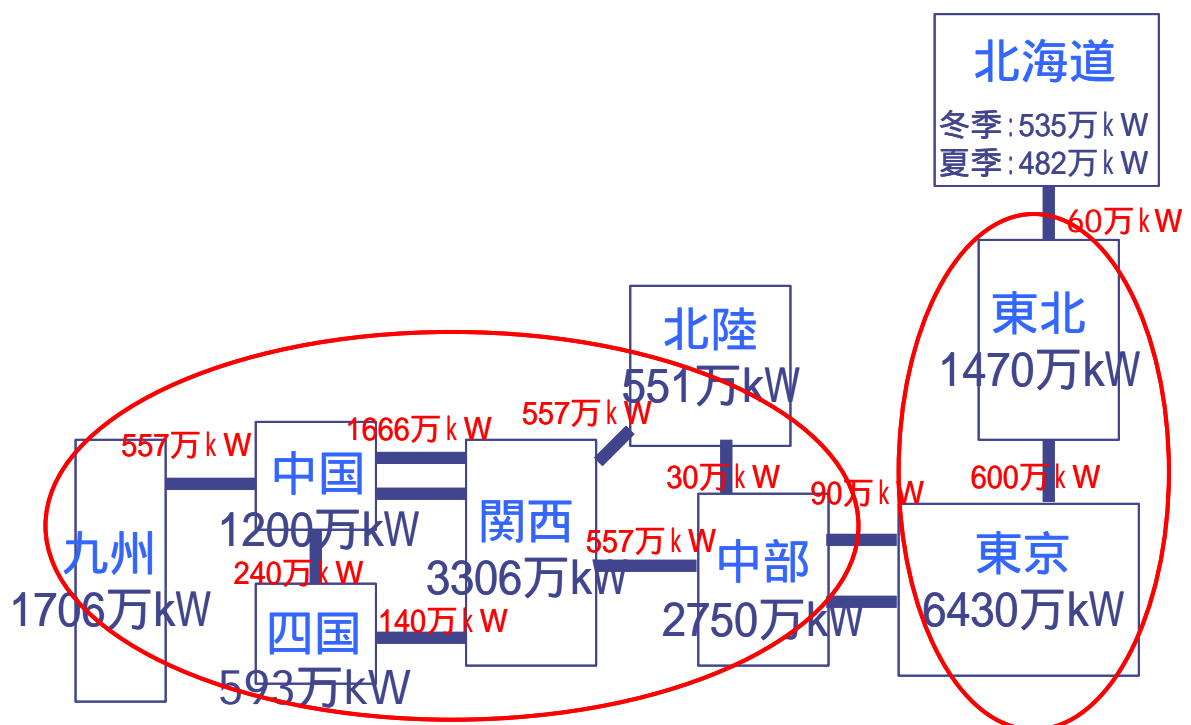
電力市場においては必ず需給逼迫期が存在し、需要の価格弾力性が小さい。また電力はネットワークを通じて供給されるため、容量制約などのために地域的な寡占状態が起こりやすいといえる。さらにプラントの特性毎に限界費用が異なり、限界費用の安い水力や原子力を燃料とするプラントはベース電源に、限界費用の高い石油プラントはピーク電源に用いるという役割分担がある程度決まっているため、市場においても図 4-11 に示したような役割分担が発生しやすいといえる。

### 4.3 JEPX 市場分析

続いて前節のモデルを実際の JEPX 市場に応用する。図 4-12 のように日本全国を東日本と西日本とにまとめて連系線でつながれた 2 地域とし、プラントの種類、企業体系を考慮に入れ分析を行う。ただし、沖縄と北海道は考慮しないものとする。

#### 4.3.1 日本の電力系統

図 4-12 に日本の電力系統を示す<sup>18</sup>。系統の特徴としてくし型の電力系統であり、送電容量があまり大きくない事が分かる。そのため自由化後も市場が競争的にならないという指摘がされている



注 数値は最大電力実績値 (青字) と送電容量 (赤字)

図 4-12 日本の電力系統

#### 4.3.2 前提条件

東日本及び西日本の 2 地域を対象を対象とし、企業体系・プラントの種類を考慮して分析を行う。各電力会社と電源開発はそれぞれ 1 エージェントとする。これらはプラントの種類を複数持つことになる。また、電力会社と電源開発以外の水力・原子力・火力は種類ごと地域ごとにまとめてそれぞれ 1 エージェントとする。よって各設備容量の割合は図 4-13, 図 4-14 のようになる。



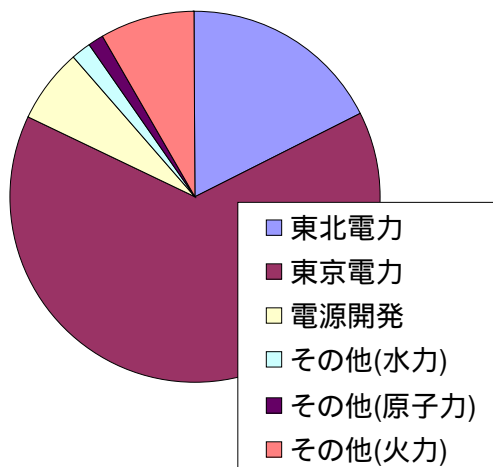


図 4-13 東日本の設備容量の割合

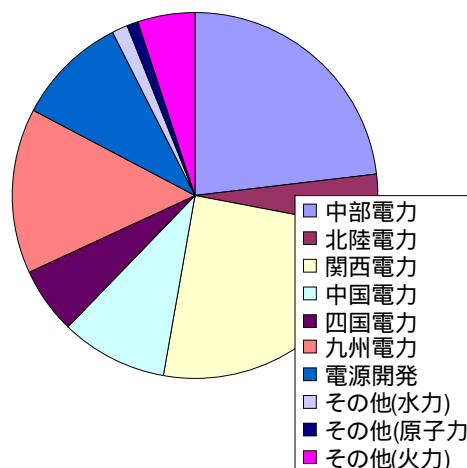


図 4-14 西日本の設備容量の割合

入札方法・決済方法は以下のように設定する。さらに、計算のための前提条件を表 4-2 に示す。

・電力会社及び電源開発

**入札方法**

水力・原子力は定格運転が必要であるため限界費用をそのまま入札するものとする。火力の入札は、戦略をとった場合、図 4-15 のように限界費用に を上乗せして入札するものとする。

**決算方式**

各種類のプラントの決済を連結する連結決算（図 4-17）とし、これを行動価値関数 Q 値の更新に適用する。

・電力会社及び電源開発以外

**入札方式**

図 4-16 のように所有しているプラントの限界費用に戦略 を上乗せして入札するものとする。

**決算方式**

単独決算（図 4-18）とし、これを行動価値関数 Q 値の更新に適用する。

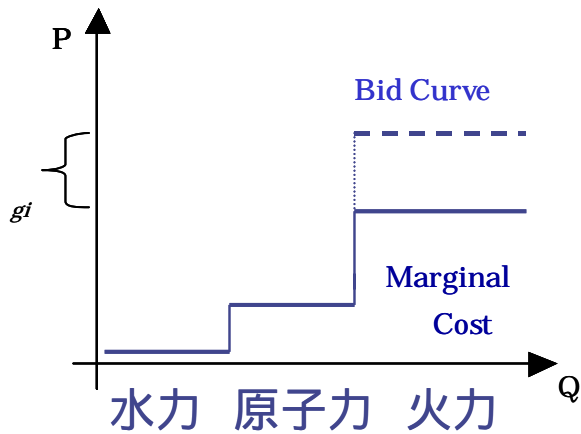


図 4-15 電力会社・電源開発の増設・削減条件

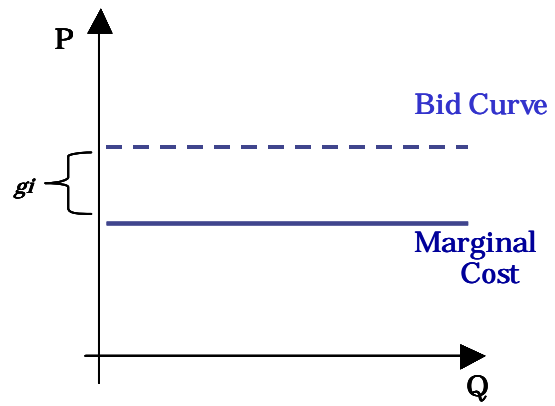


図 4-16 電力会社・電源開発以外の入退場条件

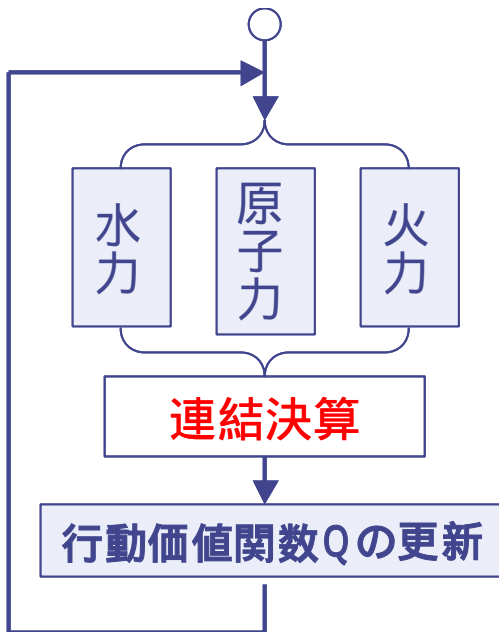


図 4-17 連結決済（電力会社・電源開発）

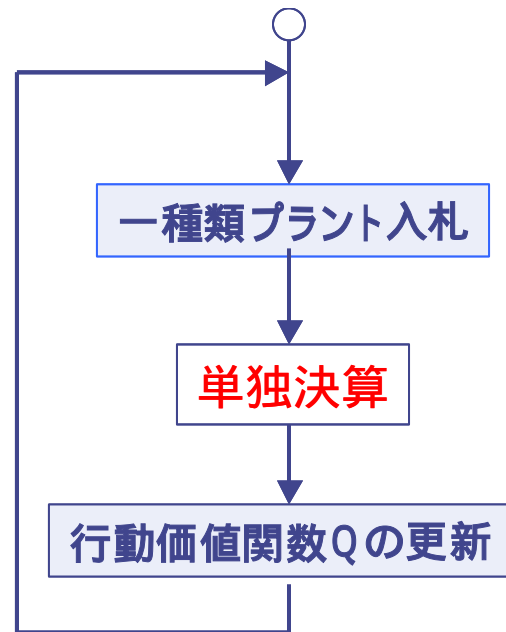


図 4-18 単独決済（電力会社・電源開発以外）

表 4-2 前提条件

	東日本	西日本
エピソード数	3000	
発電エージェント数	6	10
全エージェントの設備容量 [MW]	80764	106492
燃料費 [k¥/MW]	水力：0, 原子力：1.12, 火力：3.8	
建設単価 [k¥/kW]	水力：404, 原子力：387, 火力：224	
年経費率	水力：0.105, 原子力：0.097, 火力：0.090	
行動数	21	
入札戦略の上限値 [¥/kWh]	80	
入札額の上限值 [¥/kWh]	80 + 限界費用	
需要エージェント数	1	1
需要量 [MWh]	夏季の 24 時間	

### 4.3.3 市場価格

以上の前提条件の下、東日本及び西日本の電力市場について強化学習に基づくマルチエージェントシミュレーションを行った。

強化学習モデルにおいて、各エージェントは試行錯誤を繰り返して最適戦略を求める。そこで、始めに例として価格弾力性が $-0.2$ の場合について発電エージェントの学習の様子を図4-19に示す。値は全発電エージェントの一日の合計純利益である。

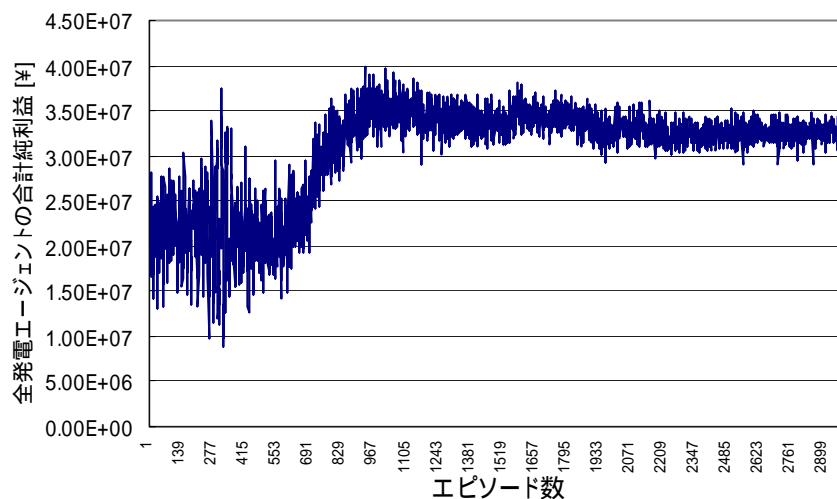


図 4-19 発電エージェントの学習の様子

続いて、各地域の電力市場価格を図4-20及び図4-21に示す。ただし、2005年2月現在JEPXは取引を開始しておらず、需要の価格弾力性に関する情報がないため、需要の価格弾力性が $-0.05 \sim -0.5$ のケースについてそれぞれ行った。なお、託送料金は考慮していない。

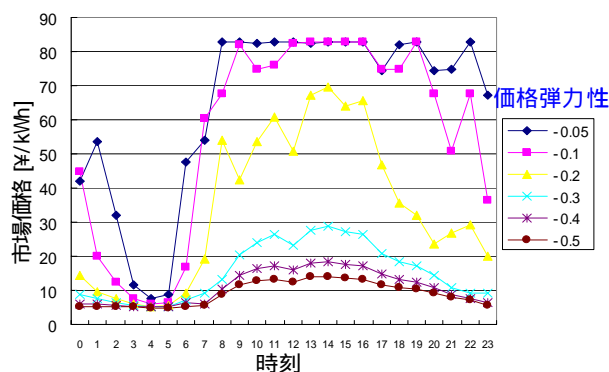


図 4-20 市場価格 (東日本)

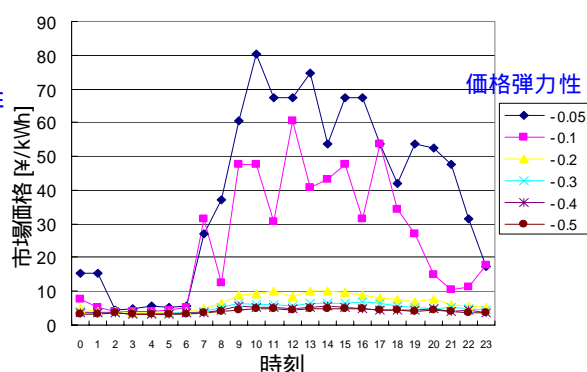


図 4-21 市場価格 (西日本)

図4-20及び図4-21を見ると、両地域とも価格弾力性が小さいほど価格が上昇することがわかる。また、西日本のほうが東日本より発電エージェント数が多く競争的であるため市場価格が低くなるが見て取れる。さらに、ここでも価格弾力性が小さい場合には特に東日本で顕著に4.2節の価格高騰メカニズムが働いていることが確認された。

## 4.4 まとめ

本章ではまず、JEPX モデル構築に向けた準備的検討として連系線で結ばれた寡占的な地域 A と競争的な地域 B を対象に JEPX 市場のアルゴリズムを用いて分析を行い、発電事業者のとり行動を定量的に示した。ここでは価格弾力性及び託送可能量を変化させて分析を行い、価格弾力性・託送可能量が共に小さい場合において、寡占的な地域 A において先行研究でも示されている通常の市場メカニズムとは異なる価格が高騰してしまう市場メカニズム<sup>8</sup> が現れることを確認した。このメカニズムは市場参加者が、非常に低い価格で入札を行うプライステイカーと、独占的に振舞うプライスセッターに二極化するものである。このメカニズムは次のような条件がある場合に起きうる。

- ・ 託送可能量が少なく市場が寡占的であり、需給が逼迫しているためプライスセッターが高い価格を入札してもいくらかは約定される場合
- ・ 需要の価格弾力性が小さくプライスセッターが独占的に振舞った場合の利益が、競争をした場合の利益よりも大きい場合又は同程度である場合

電力市場においては必ず需給逼迫期が存在し、さらにプラントの特性毎に限界費用が異なり、限界費用の安い水力や原子力を燃料とするプラントはベース電源に、限界費用の高い石油プラントはピーク電源に用いるという役割分担がある程度決まっている。さらに電力はネットワークを通じて供給されるため容量制約が存在し、地域的な寡占状態が起りやすいといえる。

日本において、供給力の調達はあくまで発電所の自社建設や長期的な相対契約によって確保することが基本とされ、JEPX はこれらを補完するものとされており、価格弾力性は強制プール市場よりも大きくなると予想される。しかし、まだ JEPX は取引を開始しておらずその価格弾力性は未知数である。しかも日本の電力系統はくし型構造であり、地域間の送電容量は小さい。加えて、巨大資本を持つ電力会社が各地域に存在する。もしも予想以上に価格弾力性が小さくなってしまうと、上記の価格高騰メカニズムの条件にとてはまりやすい構造であるといえる。このような事態が起きた場合には、価格の高騰を抑えるためになんらかの政策的手段を考慮に入れる必要がある。

続いて、具体的に対象を東日本・西日本とし、企業体系やプラントの種類を考慮に入れた JEPX 市場の分析を行い、各地域の市場価格を導出した。価格弾力性を変化させて分析を行い、両地域とも価格弾力性が小さいほど価格が上昇することを確認した。また、西日本のほうが東日本より発電エージェント数が多く競争的であるため市場価格が低くなることを示した。さらに、ここでも価格弾力性が小さい場合には特に東日本で顕著に上記の価格高騰メカニズムが働くことを確認した。

## 第5章 結論

### 5.1 本研究の成果

本研究では、強化学習理論に基づくマルチエージェントモデルを構築し、自由化された電力市場における発電事業者の行動を分析した。以下に本研究にて得られた成果及び知見を要約する。

第1章では、自由化された電力市場における供給システムを、市場構造の違いと電力供給上の特徴から分類し、現時点におけるわが国における電力自由化の動向について述べた。さらに、わが国に先立って自由化が行われた海外諸国の電力市場における問題点についてまとめ、本研究の意義を明確にした。

第2章では、本研究で用いた強化学習理論に基づくマルチエージェントモデルについての説明を行った。本研究で最も重要となるのが、自律的な意思決定主体を意味するエージェントの概念であり、電力市場をエージェントの集合体として捉えモデル化を行った。

始めに強化学習の全体の流れについて述べ、意思決定機構の基本となる行動価値関数について説明を行った。また強化学習により意思決定機構を改善するにあたって、本質的な問題となる探索と知識利用のジレンマの存在について触れ、本モデルで採用したボルツマン選択手法について紹介した。そしてこの強化学習理論を市場モデルへと適用したアルゴリズムについて説明を行った。

第3章では、強化学習理論に基づくマルチエージェントモデルを用いて、発電事業者の入退場を考慮に入れた電力市場モデルを構築し分析を行った。まず始めに、各エージェントが動的環境の中でも学習し、最適な行動へと変化させることを示した。市場方式として一日前市場のみの場合及びリアルタイム市場がある場合について分析を行い、競争原理により導出される電源構成と発電システム総コストを最小化する電源構成とを比較した。また、一日前市場のみの場合、市場原理に委ねるとピーク電源に十分な利益が与えられず、石油火力が市場から撤退し、市場全体の電力供給能力はピーク時間帯の基準需要量を満たさない事を示した。

続いて、複数の種類のプラントを所有する大規模な発電事業者が存在する場合について分析を行った。大規模発電事業者の火力部門（石炭・LNG・石油）は小規模発電事業者（石炭）に大きくシェアを奪われる事を示した。また、電力は価格弾力性が小さいため、小規模発電事業者の入場後もピーク時間帯で大規模電気事業者が価格決定権を持ち、市場価格のつり上げが行われうることを示した。その場合、市場には基準需要量を満たすだけの供給能力があるにもかかわらずピーク時間帯で取引量は基準需要量を満たさなくなる事態が起こることを示した。

第4章ではJEPXモデル構築に向けた準備的検討として連系線で結ばれた2地域を対象にJEPX市場のアルゴリズムを用いて分析を行い、発電事業者の行動を定量的に示した。

まず、2地域を寡占的な地域Aと競争的な地域Bとし、価格弾力性及び託送可能量を変化させて分析を行い、価格弾力性・託送可能量が共に小さい場合において、寡占的な地域Aにおいて価格が高騰してしまう市場メカニズム<sup>20</sup>が現れることを確認した。

続いて、具体的に対象を東日本・西日本とし、企業体系やプラントの種類を考慮に入れたJEPX市場の分析を行い、各地域の市場価格を導出した。価格弾力性を変化させて分析を行い、両地域とも価格弾力性が小さいほど価格が上昇することを確認した。また、西日本のほうが東日本より発電エージェント数が多く競争的であるため市場価格が低くなることを示した。

## 5.2 今後の課題

本研究の今後の課題として、以下の事項を考慮した検討を続けることが考えられる。

### 市場取引手法の詳細化

本論文では、市場取引形態として電力取引市場とリアルタイム市場、アンシラリーサービスのうちの運用予備力市場の3種の市場について考慮し、分析を行った。しかし実際の電力市場においては、相対取引、1日前市場、1時間前市場、先物市場、その他アンシラリーサービス市場等、様々な契約期間、決済手法に基づく取引が存在する。また、市場決済の方法として、単純にシングルオークションとダブルオークションの2種類を考慮したのみであるが、実際には1対1で行う相対契約や、プラント特性や送電制約を考慮した潮流計算による出力調整などが存在する。今後は研究目的に応じて、これら多様な取引形態をモデルに組み込むことが考えられる。

### 揚水発電所の考慮

本モデルでは単純化のため水力を一般・揚水に区分しなかった。しかし今後、揚水発電を考慮し、発電エージェントのプラント状態を考慮したQ学習の導入すれば、揚水はさまざまな戦略を取ることが可能である。また、負荷追従制約のある原子力や石炭火力との違いが明確になり、その際の発電事業者の行動は興味深い。

### 入場及び退場方法の検討

本モデルにおいて発電エージェントは市場に入場する際に情報を持たず、入場した後から報酬によって学習を開始した。現実には発電事業者が情報を持って入場することも考えられる。よって、モデル上でも発電エージェントに情報を持たせて入場させることも考えられる。

また、本モデルでは発電システム総コストを最小化する電源構成との比較を目的の一つとしたために、市場から退場した発電エージェントは消滅する形になっている。しかし、現実には損失を出している発電プラントはアセットマーケット等で売り払われ、新しい事業者の下で再度市場に戻ってきてきて運転を再開する。このようなアセットマーケットの存在を考慮することも考えられる。

### 需要エージェントのモデル化の検討

本モデルにおいて、需要エージェントの基準価格  $P_0$  をどの時間帯でも一律 5 ¥/kWh として計算を行った。しかし、基準価格はその時間毎のシャドープライスで与えられることが望ましい。今後、発電部門の単価を調査し、適切な基準価格が導出されることが期待される。

### 自由化部門・非自由化部門の考慮

2005年2月現在、日本においては契約電力 500kW 以上に自由化が拡大されており、2005年度には 50kW 以上の高圧需要家まで自由化範囲が広げられる予定である。非自由化部門はこれまで通り電力会社が供給義務を持つ事になるが、電力会社は限界費用の高い電源を非自由化部門に限界費用の安い電源を自由化部門にまわすような戦略も考えられる。このように、自由化・非自由化部門を考慮した発電事業者の行動分析も興味深い。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、数多くの方々からアドバイス、御指導を賜りました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

打ち合わせ等において、適切なお指導と叱咤激励をいただきました山地憲治教授に心より感謝いたします。研究の意義、研究に対する考え方を始め、多くの事を学びました。研究に関する事にとどまらず、私の物事に対する考え方は山地先生からとても影響を受けたように感じます。

いつも暖かく見守って頂き、グループミーティングや打ち合わせ等では研究の進捗状況に応じてその都度適切なアドバイスをいただいた藤井康正助教授に心より感謝いたします。私たちの自主性を重んじ、かつ、どうすれば研究が意義のあるものになるかを適切に指導していただきました。また、常に気を配っていただきとてもお世話になりました。

研生活全般にわたって、幅広く研究のサポートをして頂いた林武人助手に厚く御礼申し上げます。お食事をご一緒できてとても楽しかったです。

助手の竹下貴之さんには、研究はもとより就職活動・学生生活に及ぶまでとてもお世話になりました。心より感謝いたします。何度も相談にのっていただき、励ましていただきました。何事にも全力投球な姿に憧れました。

秘書の方々には研究活動及び生活全般にわたって、暖かく研究のサポートをして頂きました。心より御礼申し上げます。

同輩の岡村知暁君、北浦孝啓君、篠原剛君、室園晃徳君を始め、すでに卒業された研究室の緒先輩方及び大学院生、卒論生の方々とは、2年間の研生活を通じて、時には夜中まで議論を交わし、時には真剣に相談に乗って頂き、時には楽しく遊ぶことができ、最高の仲間と最高の2年間を過ごせたと思います。本当にありがとうございました。

研究を終えて今考えることは、私の研究は皆様に支えていただいたお陰で完成したということです。これからも自分は社会の皆様に支えられているという謙虚な気持ちを持ち続けていきたいと思います。また、これから社会人になってからは少しでも社会に恩返しができるように精一杯努力していきたいと思います。

最後に、長い学生生活を経済面、精神面で支え、私の自主性を尊重し暖かく応援してくれた家族に心より感謝し、謝辞といたします。

2005年2月  
稲垣憲治

## 発表実績

稲垣憲治，最所祐一，岡村知暁，林武人，藤井康正，山地憲治  
“ マルチエージェントモデルによる発電事業者の入退場を考慮した電力市場分析 ”  
平成 16 年度電気学会全国大会，2004 年 3 月

藤井康正，岡村知暁，稲垣憲治，山地憲治  
“ Basic Analysis of the Pricing Processes in Modeled Electricity Markets with Multi-Agent Simulation ”  
IEEE , The 2nd International Conference on Electric Utility Deregulation , Restructuring and Power Technologies, 2004 年 4 月

稲垣憲治，林武人，藤井康正，山地憲治  
“ マルチエージェントモデルによる種類別発電事業者の入退場を考慮した電力市場分析 ”  
エネルギー・資源学会第 21 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2005 年 1 月

稲垣憲治，林 武人，藤井康正，山地憲治  
“ マルチエージェントモデルによる JEPX モデル構築に向けた準備的検討 ”  
平成 17 年度電気学会全国大会，2005 年 3 月（発表予定）



## 参考文献

- <sup>1</sup> 横山隆一，“電力自由化と技術開発 21世紀における電気事業の経営効率と供給信頼性の向上を目指して”，東京電機大学出版局，2001年
- <sup>2</sup> 特集「電力自由化関連情報」，“[http://www.shimbun.denki.or.jp/topics/topic02\\_doukou.html](http://www.shimbun.denki.or.jp/topics/topic02_doukou.html)”，電気新聞ホームページ
- <sup>3</sup> K.Bhattacharya, M.H.J. Bollen, J.E. Daalder, “OPERATION OF RESTRUCTURED POWER SYSTEMS”, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2001
- <sup>4</sup> 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部，“海外諸国の電力改革の現状と制度的課題”，2001年
- <sup>5</sup> Irene Otero-Novas, Claudia Meseguer, Carlos Battle, and Juan J. Alba, “A Simulation Model for a Competitive Generation Market”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No.1, February 2000
- <sup>6</sup> Charles W. Richter, Jr., Gerald B. Sheble, “Genetic Algorithm Evolution of Utility Bidding Strategies for the Competitive Marketplace”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No.1, February 1998
- <sup>7</sup> 種村健志，“自由化された電力市場のマルチエージェントシミュレーション分析”，東京大学修士論文，2002年
- <sup>8</sup> 下村貴裕，“マルチエージェントモデルを用いた電力市場における価格形成過程の分析”，東京大学修士論文，2003年
- <sup>9</sup> 大内東, 山本雅人, 川村秀憲, “マルチエージェントシステムの基礎と応用 - 複雑系工学の計算パラダイム - ” コロナ社, 2002年
- <sup>10</sup> Benjamin F. Hobbs, Carolyn B. Metzler, and Jong-Shi Pang, “Strategic Gaming Analysis for Electric Power Systems: An MPEC Approach”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000
- <sup>11</sup> Janusz W. Bialek, “Gaming the Uniform-Price Spot Market: Quantitative Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, August 2002
- <sup>12</sup> 三上貞芳, 皆川雅章, “強化学習”, 森北出版株式会社, 2000年
- <sup>13</sup> 日坂仁, “流通設備の樹状構造を考慮した系統モデルによる分散発電・電力貯蔵の導入可能性評価”, 東京大学修士論文, 2002年
- <sup>14</sup> 西尾健一郎, “わが国における再生可能エネルギー導入基準制度 RPS の評価”, 東京大学修士論文, 2002年
- <sup>15</sup> Steven Stoft, “POWER SYSTEM ECONOMICS: Designing Markets for Electricity”, IEEE Press, WILEY-INTERSCIENCE, 2002
- <sup>16</sup> 日本卸電力取引所ホームページ <http://www.jepx.org/>
- <sup>17</sup> 関西電力ホームページ <http://www.fururu.net/e-patio/e-fo/e-fo6.html>
- <sup>18</sup> 第12回電気事業分科会資料