

自律分散電源ネットワークのための新しい電力流通方式構築に向けた基礎検討  
Basic study toward the development of new power distribution systems for building  
decentralized autonomous power generations

第 1 章	序論	3
1.1	本研究の背景	3
1.2	本研究の目的・新規性	6
1.3	本論文の構成	9
第 2 章	家庭間小市場モデル	10
2.1	家庭間小市場モデルの概要	10
2.2	家庭間小市場モデルの取引に関する諸条件	16
2.3	家庭間小市場モデル内における電力取引方法	17
第 3 章	家庭間小市場モデルを用いた単一市場内取引	24
3.1	家庭間小市場モデルによるシミュレーションに関する予備検討	24
3.2	単一市場内取引に関する諸前提	31
3.3	単一市場内取引シミュレーション結果	33
第 4 章	家庭間小市場連系モデルを用いた複数市場取引	39
4.1	市場間における電力融通に関する諸前提	39
4.2	2 市場 1 送電エージェント裁定取引シミュレーション	42
4.2	2 市場間における送電エージェント競合ケース	51
4.4	3 市場及び 4 市場間裁定取引シミュレーション結果	55
第 5 章	結論	65
5.1	本研究により得られる知見及び成果	65
5.2	今後の課題	66
	謝辞	67
	参考文献	68
	発表文献	69

# 第1章 序論

本章においてはまず、本研究を行う上での背景及び現状の問題点を明らかにする。そして本研究の目的・新規性について述べる。最後に本論文の構成についても述べていく。

## 1.1 本研究の背景

現在我が国においては、地球規模の問題として二酸化炭素等の温室効果ガス排出に伴う地球温暖化問題、更には化石燃料枯渇の可能性についての問題に取り組む必要に迫られている。また国内の電気エネルギー需給環境の問題として、先日 J E P X 市場が開始されたことに象徴されるような電力市場の自由化が検討されており、その発電の一形態としても現在分散電源が注目を浴びつつある。

分散電源は既存のほかの電源と比較して以下のようなメリットがある。

- ① オンサイト型電源を設置することにより電気料金を低減可能
- ② 自身で発電することによる供給信頼性の向上
- ③ 投資回収年数及びリードタイムが短い
- ④ 需要者側までの送電距離が短いため送電ロスが少ない

そのような分散電源の中で特に普及が期待されているのが再生可能エネルギーである<sup>[1]</sup>。再生可能エネルギーの電源種としては代表的なものとして、太陽光発電・風力発電が挙げられるが、これら固有の利点として以下の二つが挙げられる。

- ① 運用時に化石燃料等を使用せず、かつほぼ恒久的に利用できる自然現象に基づくエネルギーを利用するために、資源枯渇関係の問題から開放される
- ② 二酸化炭素等の温室効果ガスについては、発電機の生産時に少量排出が行われるだけであり、耐用年数内の温室効果ガスの排出原単位が従来型の電源と比較して圧倒的に少ない

特に太陽電池は近年、研究開発による技術の向上に伴った変換効率の向上・生産コストの低減化が進み、次世代のエネルギー源として注目されている。その一方で行政もこれらの電源を普及すべく RPS 法制定、ニューサンシャイン計画の策定をはじめとした様々な施策を行っている。

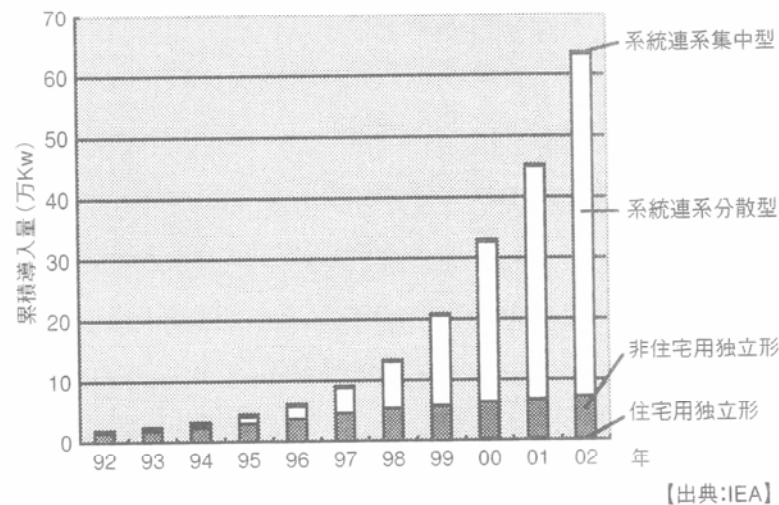


Fig.1-1 日本における太陽光発電システムの累積導入量

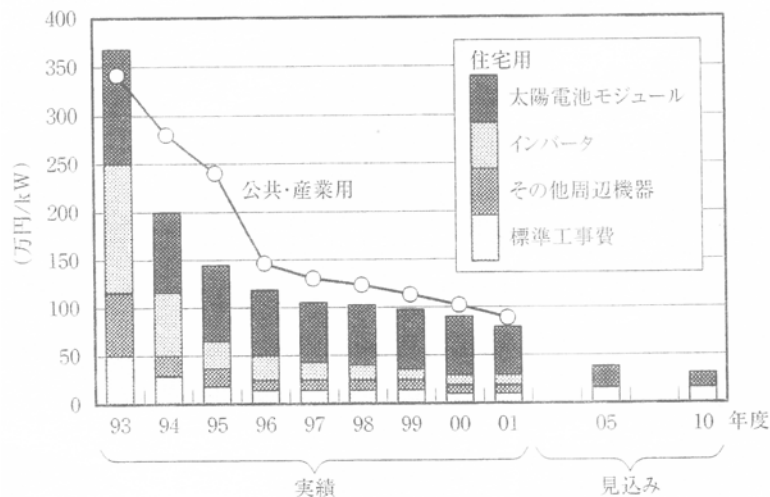


Fig.1-2 日本における太陽光発電システムの価格推移<sup>[1]</sup>

また再生可能エネルギーと同様に分散型電源の形態として現在注目されているのが、ガソエンジン発電機等を用いて電力とともにその発電時に放出される廃熱を利用することでエネルギー利用効率を高めようとするCGS（コージェネレーションシステム）である。将来的には燃料電池を用いたコージェネレーションシステムが有力な分散電源として期待されている。

その一方で、発電した電力を貯蔵するためのいわゆる二次電池のような分散型電力貯蔵装置関連技術が年々発展しており、その普及が見込まれている。二次電池の技術開発例としてはエネルギー密度が高い、自己放電しないという性質を持つNaS電池をはじめとして、

保守が容易で設置しやすいレドックスフロー電池といったものがある。更には鉛蓄電池やリチウムイオン電池といったものの低価格化が進んできており、今後も二次電池の技術の進展が見込まれる。

また他方、情報関連技術の進歩により実時間料金制実現の可能性も広がってきている。実時間料金制を採用すると合理的な分散電源の運用が可能となり、省エネに寄与する事が出来、負荷平準化が可能になると考えられる。

このような背景を考慮すると、分散型電源を用いた間欠的な電力の取引を行うような電源ネットワークを構築することも検討課題となってくる。そこで本研究においては自律分散型電源を用いたネットワーク構築についての経済的な面について基礎検討を行うこととした。

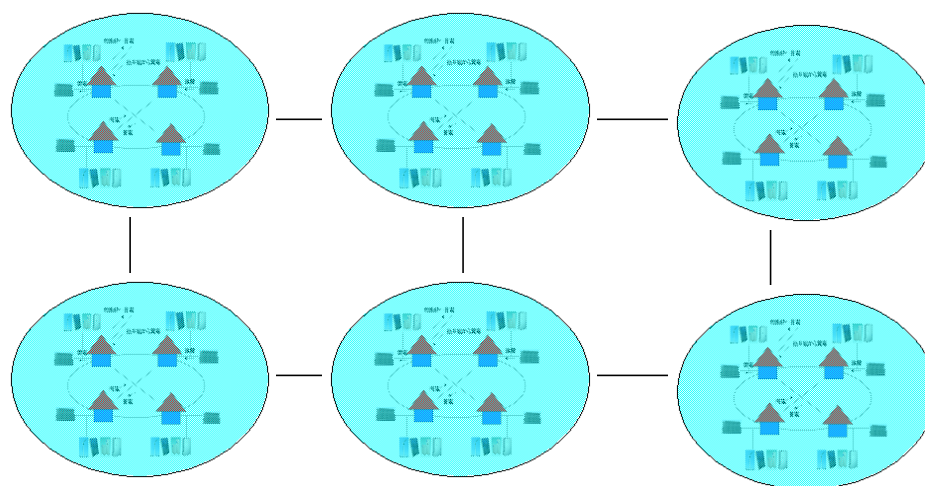


Fig.1-3 自律分散電源ネットワークのイメージ

## 1.2 本研究の目的・新規性

本研究においては、自律分散電源ネットワークを構築するとともに、ネットワーク内で自身の需要・取引価格および他の市場における需要・取引価格を考慮しながら、電力を間欠的に融通するという運用シミュレーションを行う。そしてその場合において、システムを運用する際の経済性について検討を行うことを目的とした。

現在において分散型電源を用いたネットワークの構成法としては需要地系統やマイクログリッドなどが特に検討されている。

需要地系統は（財）電力中央研究所によって提案されている概念であり以下の図のようなものである。

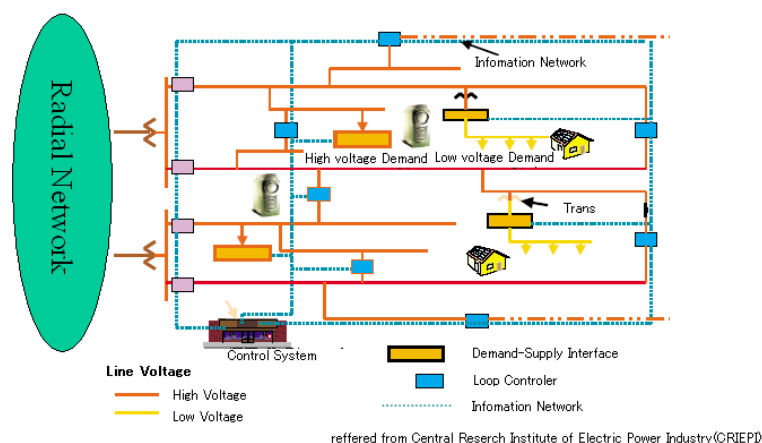


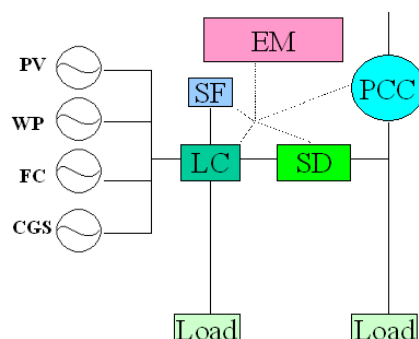
Fig.1- 4 需要地系統構成の概念図

このシステムは 30 万 k VA 程度の設備容量の中に需給インターフェイス約 1 万台、ループコントローラの数約 100 台、フィーダー数 60-80 を含むもので、この中に複数の分散電源を配置する。このシステムにおいては複数の変電所をループ上の配電線で接続することで負荷平準化を図る一方、分散電源を自律制御する「需給インターフェイス」とループ内の電圧、潮流および周波数を制御する「ループコントローラ」を設置し、さらに電力の情報を情報通信技術を利用することで融通し、配電システムを制御すること可能であることが特徴である。現在この実証試験が行われているところである。<sup>[2]</sup> しかしながらこの方式だとシステムを外部から集中管理せねばならず、管理コストがかかりかつ制御所の事故により全システムが止まるという弱点がある。

一方マイクログリッドは各人の負荷を数軒単位で情報通信網を利用してネットワークを構築し、ひとつのグリッドとして管理する概念になっている。この点は電力中央研究所の需要地系統の概念とも類似しているが、需要のネットワークの規模や発電規模がやや需要地系統の概念に比べて小さくなっている。また熱需要についても需要者側をマネジメント

する点でも異なっている<sup>[3]・[4]</sup>。このようにマイクログリッドは各グリッドに発電設備や負荷を持つ。各グリッドで電力または熱が不足した場合には他のグリッド等から補充し、電力および熱に余裕がある場合は他のグリッドに売電するような自律分散制御が可能である。そのため、この各グリッドは事故時等においても他のグリッドに与える影響が低減化され、また他のグリッドからの電力供給が可能であり、系統安定度が増すメリットがある。またこれにより、分散電源の設備設置及び撤去が容易になるといういわゆる「Plug & Play」型の設備設置が可能となるため、分散電源が促進される。なおマイクログリッドにおける各グリッドは以下のような構成を持つ。

Fig.1-5 マイクログリッドにおける各グリッドの構成 <sup>[5]</sup>



ただし、上記の図において PCC : Point of Common Coupling、SD : Separation Device、LC : Local Controller、SF : Storage Facility、EM : Energy Manager である。マイクログリッドでは他系統で事故がおきたときなどには PCC で該当系統との接続を切断し、他の系統との融通もしくは自前発電設備を用いた発電が可能なシステムとなっているのが特徴である。この二つの系統の形態は将来を考える上では検討に値するものであることは間違いないと思われる。

しかしながらマイクログリッドはこの構成上それ自体に地域特性を考慮した価格構成機能はなく、また既存の系統に接続することを想定している、という難点がある。

一方これら二つの方式においては間欠的な電力取引は想定されていないが、合理的な分散電源発電の利用を促進するためには電力フローを価格によって制御する事が必要であり、そのためには間欠的な電力取引を実時間料金で行う必要がある。そしてこれとは別な問題として電力自由化がなされた状況下においてはこのような系統を構築しても送電設備の自発的な設備投資が行われにくいという指摘がある。その結果電力需要者が送電網という共有財産をケアできずに電力重要者すべてが不利益を被る、といういわゆる共有地の悲劇の問題が懸念される。

本研究では分散電源の自律的な運用を行う中で市場間の送電線を構成する事業者を想定し、その発電構成に依存する価格構成が可能であり、更にその事業者に市場間の価格裁定

を行わせることによって送電線エージェント自体が利益をあげるという状況を想定している。そのためこの系統構成はこの問題に対する将来的には検討に値する解の一つを提示できるのではないかとと思われる。

本研究においてはこのような分散電源ネットワークの構築、実時間料金制を考慮した電力決定プロセス、更には送電網の自発的成長の可能性を検討している点で新規性がある。そして本研究で経済性の観点から見て当該システムが将来的には機能しうることをシミュレーションによって示し、かつこの様な電力系統構成形態が有効であるということを示すことが本研究の目的である。

### 1.3 本論文の構成

本章では序論として現在の分散電源を取り巻く状況やその分散電源による系統構成法に関する研究の概要を述べた。

続く第 2 章においては本研究を行う上で用いた市場モデルについての詳細な説明を行うとともに、前提とされる電力取引方法について説明を行う。

第 3 章では前章で述べた前提を元に、ある市場で複数の市場参加者エージェントが取引を行った際のシミュレーション結果について説明を行う。

第 4 章では複数の家庭間小市場を連系した際の結果を示し、複数の市場を連携した場合でも円滑に取引が行える様子を示す。

そして最後の第 5 章で本研究のまとめとして本研究によって得られる結果、及び本研究の内容を実際に実現するにあたり考えられる課題を述べる。



## 第2章 家庭間小市場モデル

### 2.1 家庭間小市場モデルの概要

本研究における家庭間小市場モデルとは、数軒から数十軒の家庭を一市場の構成メンバー（家庭間小市場市場参加者エージェント）とし、その複数の家庭を送電線で結ぶことによって市場を介した取引を行うモデルのことを言うものとする。このモデルにおいては電力を時間と価格の情報を持ったパケットとして扱い、そのパケットの取引を行うことで電力融通を行う。このような扱いを行うことにより通信分野と同様な間欠的なパケット融通、つまりはここで言う間欠的な電力融通が可能になる。以下にその概念図を示す。

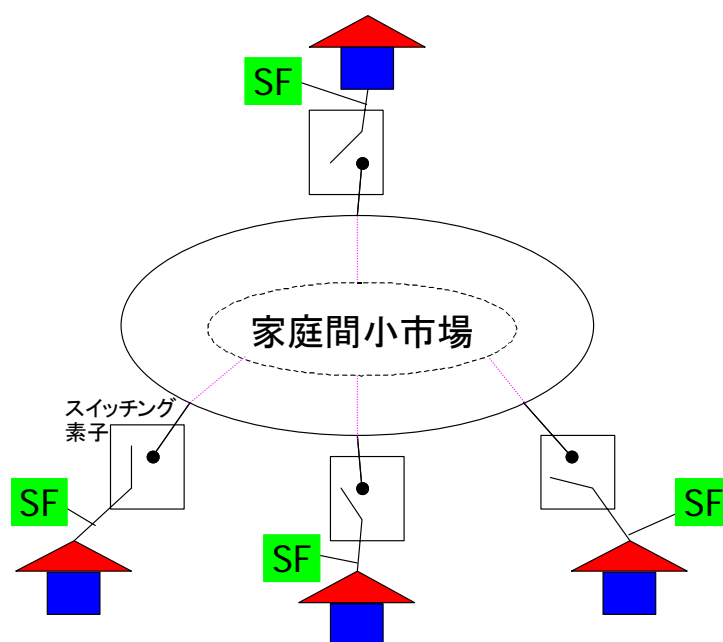


Fig.2-1 分散電源ネットワーク内の家庭間小市場のイメージ図

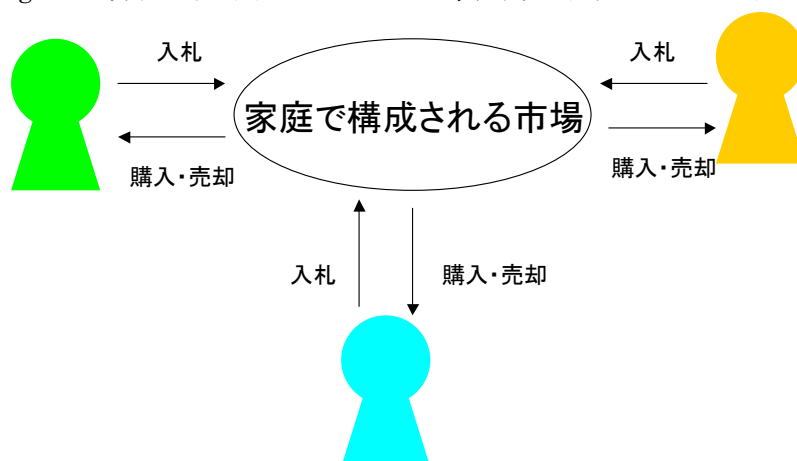


Fig.2-2 家庭間小市場における電力取引概念図

SFは電力貯蔵装置を表し、各家庭はスイッチング素子と電力貯蔵装置を用いて電力の入出を行う。このような電力融通を考える場合、非同期分散型の約定システムである証券取引市場のシステムが参考になる。

そこで本研究ではその証券取引市場における約定方法を用いて電力融通の決済を行うことにした。



Fig2-3 電力取引における約定イメージ図

ところで現在、証券取引市場においては現在現物取引だけではなく、現先取引・貸借取引（いわゆる空売り・空買い）・更には金融工学を駆使したオプション取引など取引方法は多種多様である。また実際には立会時間内（市場内で約定可能な時間帯のこと）以外にも市場外において証券取引は行われている。

そこで本研究ではその中でも証券取引市場内において最も基本的な取引である現物取引をもとにした方式を用いて市場電力の決済を行うものとした。

市場の立会時間内における現物取引の約定方式については以下の 2 つが主なものとして挙げられる。

- ① 板寄せ方式
- ② ザラバ方式

証券取引市場においてはこの二つをともに併用するものの、主にザラバ方式で取引を行うこととなっている。そこで本研究でもそれに追随することとした。すなわち取引は始めと終わりは板寄せ方式で、それ以外の時間はザラバ方式で行う。

また、約定のための呼値の種類では証券取引市場において用いられるいわゆる

- ① 指値注文による取引
- ② 成行注文による取引

を採用し各市場参加者エージェントが競争入札方式によって電力を約定するものとした。

以下にこれらの取引方法についての詳細・特徴を述べる。

#### 2.1.1 証券取引市場における証券売買方法について

##### ① 板寄せ方式とザラバ方式

板寄せ方式は板寄せを行う時刻の前までにあらかじめ市場参加者エージェントから注文を受け付けて蓄積しておき、板寄せ時刻になるとその注文を約定していく方式である。そのため板寄せ方式の場合にはその板寄せ時刻にのみ、前板寄せ時刻から次の板寄せ時刻までの間に蓄積された注文について約定を行っていく。現在電力取引が行われている JEPX 市場はこの方式を採用している。

一方ザラバ方式は板寄せ方式とは異なり立会時間内（市場内で約定可能な時間帯のこと）においてはリアルタイムで間欠的に約定を行っていくものである。この場合においても出した注文は市場内に蓄積されるが、板寄せ方式と違い立会い時間内の全時刻において約定が可能である。なお実際の証券取引市場においては前場（午前の取引）のはじめ、後場（午後の取引）の始めについては板寄せ方式で取引が行われている一方、それ以外の立会い時間内の取引はザラバ方式で行われている。本研究もそれに追随することにした。

ところでどちらの方式においても注文を価格優先・時間優先の原則に基づいて約定処理していく。価格優先とは買い注文については価格の高い注文から、売り注文については価格に低い注文から執行していくルールである。これに対し時間優先とは入札した時間の古い注文から執行を行いその後、より新しい時間になされた注文を執行していくルールである。証券取引市場ではこの両原則が価格優先、時間優先という順番で適用される。すなわち

- ① 現時点での注文状況を見てまずは価格優先の原則に従い約定する注文を決定
- ② 価格優先の原則を適用した後、その同じ価格の注文について時間優先のルールを適用し、注文時間の古い順番に約定

というのが取引の流れになっている。そこで本研究においてもこの流れで注文を執行していくこととした。

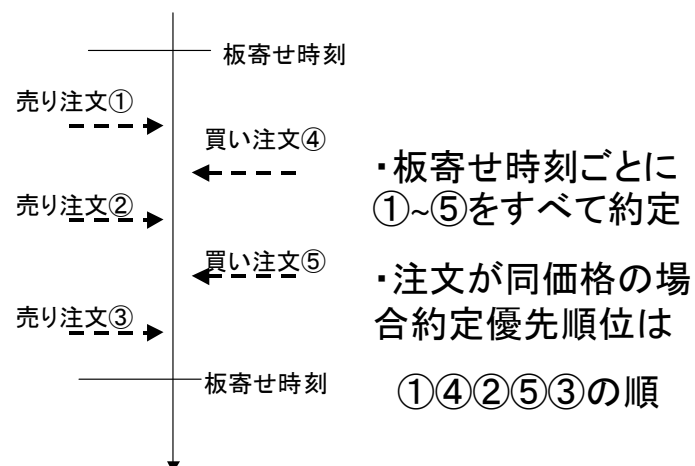


Fig.2-4 板寄せ方式による約定例

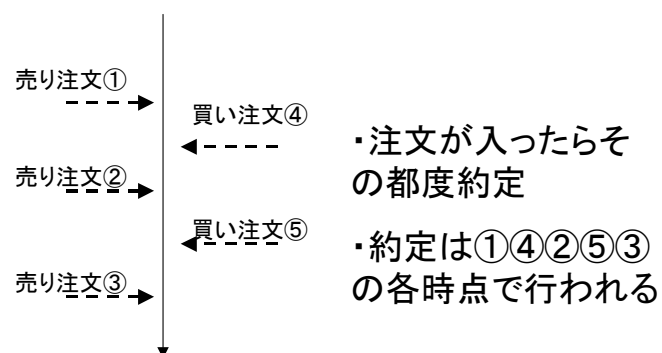


Fig.2-5 ザラバ方式による約定例

## ② 指値注文による取引と成行注文による取引

上では取引の形態について述べたが、競争入札を行うためには出された注文を処理するための呼値の種類も必要である。現在の証券取引市場においては指値注文によるもの、成行注文によるものがある。

指値注文は各注文における注文価格及び注文量を指定し、その注文を価格優先・時間優先の原則の下に約定していく注文方法である。

売り注文	電力価格	買い注文	売り注文	電力価格	買い注文	売り注文	電力価格	買い注文
	成行			成行			成行	
	12.5			12.5		2.4	12.5	
1.1	12.4		2.4	12.4		4.5	12.4	
3.5	12.3		6.4	12.3		6.4	12.3	
4.5	12.2		7.5	12.2		7.5	12.2	
6.4	12.1		9.4	12.1		9.4	12.1	
11	12		11	12		11	12	
	11.9	6	12.5	11.9	10	2.5	11.9	
	11.8	4.8	10.7	11.8	7.5	3.2	11.8	
	11.7	4.4	6.5	11.7	5.4	0.9	11.7	
	11.6	2.3		11.6	4.2		11.6	4.2
	11.5	1.1		11.5	2.1		11.5	2.1
	11.4	0.4		11.4	1.1		11.4	1.1
	11.3	0.2		11.3	0.2		11.3	0.2

Fig.2-6 指値注文による約定例

例えばある時点で上図左の板状況だった場合には¥12 と¥11.9 で注文が均衡しておりこの板状況を持つ銘柄の当該時点での取引価格は1単位当たり¥12または¥11.9と決定される。そして次の時点において¥12.5 で 2.4 単位、¥12.4 で 3.4 単位、¥12.3 で 2.9 単位、¥12.2 で 3 単位、¥12.1 で 3 単位、¥11.9 で 12.5 単位、¥11.8 で 10.7 単位、¥11.7 で 6.5 単位の売り注文が入り、それと同時に買い注文が¥11.9 で 4 単位、¥11.8 で 2.7 単位、¥11.7 で 1 単位、¥11.6 で 1.9 単位、¥11.5 で 1 単位、¥11.4 で 0.7 単位入った場合(Fig.2-6 真中図)、¥11.9 で 10 単位、¥11.8 で 7.5 単位、¥11.7 で 5.4 単位約定し上図右の板状態になる。当該時点での銘柄の取引価格は¥11.7 または¥11.6 となる。

一方、成行注文は注文量のみを指定して行う注文である。すなわちその注文が売り注文だった場合にはその時点で最も値段の高い買い注文と約定し、その注文が買い注文だった場合にはその時点で一番安い売り注文と約定する。

売り注文	電力価格	買い注文	売り注文	電力価格	買い注文	売り注文	電力価格	買い注文
0	成行	0	15.8	成行	2.4	0	成行	0
2.4	12.5		2.4	12.5		2.4	12.5	
4.5	12.4		4.5	12.4		4.5	12.4	
6.4	12.3		6.4	12.3		4	12.3	
	12.2	7.5		12.2	7.5		12.2	
	12.1	9.4		12.1	9.4		12.1	1.1
	12	11		12	11		12	11
	11.9	2.5		11.9	2.5		11.9	2.5
	11.8	3.2		11.8	3.2		11.8	3.2
	11.7	0.9		11.7	0.9		11.7	0.9
	11.6	4.2		11.6	4.2		11.6	4.2
	11.5	2.1		11.5	2.1		11.5	2.1
	11.4	1.1		11.4	1.1		11.4	1.1
	11.3	0.2		11.3	0.2		11.3	0.2

Fig.2-7 成行注文による約定例

Fig2-7 左図の板状態だった場合に次の時点で成行売り注文が 15.8 単位、成行買い注文が 2.4 単位出るとする (Fig.2-7 真中図)。その場合、成行売り注文は¥12.2 で 7.5 単位、¥12.1 で 8.3 単位約定し、成行買い注文は¥12.3 で 2.4 単位約定する。

この 2 つの注文方法の違いを考えると、指値注文には注文者の意図する価格での取引が出来、結果計画的な注文が出来る一方で、注文者が出した条件以外では約定できないという欠点を持つ。それに対し成行注文は市場に取引する財がすでに入札されていれば必ず約定出来る。ただしこの場合注文者の意思によっては価格を決めることが出来ないという欠点がある。このため成行注文は、相場の急変動などが起こり急を要する売買に用いられる。証券取引市場の現物取引は主にこの 2 つの呼値方法を用いて行われている。

### 2.1.2 証券取引市場での取引方法と本研究における家庭間小市場モデルとの関係

本研究においては各家庭が自分で分散電源を持ちつつ、自分で電力の消費も行う市場参加者エージェントとし、その市場参加者エージェント同士が自分の電力線を近隣の市場参加者エージェントと連携することで家庭間小市場を構成する。そして市場参加者エージェントが自身の電力が不足している場合にはその市場参加者エージェントが所属している市場から電力の調達を行い、市場参加者エージェントの発電した電力が自分の需要を超えている場合には自分の所属する市場に余剰電力として売却する。この際この余剰電力と不足電力をそれぞれ売り注文、買い注文とし上記の証券取引市場の方法に類する形で取引を行うことにした。

## 2.2 家庭間小市場モデルの取引に関する諸条件

本研究におけるシミュレーションにおいては、分散電源を所有する市場参加者エージェントが一日にかかる電力調達費用及び自分が電力売買を行うことによって得られる利益を算出するシミュレーションを行う。

このシミュレーションにおいて必要な需要データは当研究室で行われているボトムアップシミュレーションによって作成した。このシミュレーションは各世帯に設置されている電気機器個々の時間帯別の需要をシミュレーションにより生成し、それらの和として世帯の需要を算出する。このシミュレーションは以下の手順で行われる。

まず各世帯の世帯構成員及び世帯に付属する電気・ガス機器を決定し、NHK 国民生活時間調査に基づき、1 日毎に各世帯構成員の起床及び外出スケジュールの作成を行い、その後各世帯の構成員についての生活活動のスケジュールを決定する。そして構成員の行動を電気機器と関連づけて各時刻における電気機器の使用状況を決定して、各時間帯別消費電力のシミュレーションを行うというものである。<sup>[6]</sup> このシミュレーションにより不等時性のある需要データを作成する事が出来る。なお、「不等時性がある」とは、需要などのデータのように発生量や発生する時間が平均化されておらず変動していることを言う。

一方発電データは将来の分散電源の普及状態を想定して作成しなければならないが、現在のところその時点の量を決めることは困難である。そこで本研究においては 1kW の発電機を各家庭においた場合、などの設定にてシミュレーションを行うこととした。

## 2.3 家庭間小市場モデル内における電力取引方法

### 2.3.1 シミュレーションの定式化

各市場参加者エージェントの費用の計算は以下の式によって行う。

$$COST_{(m,n)} = \sum_{a,t} \{ \{ BCQ_{(n,m,a,t)} \times BCP_{(n,m,a,t)} - SCQ_{(n,m,a,t)} \times SCP_{(n,m,a,t)} \} \\ + UCQ_{(n,m,t)} \times Penalty_{(n,m,t)} \} \dots (2-1)$$

ただし

$n$ :市場参加者エージェント

$m$ :市場参加者エージェントの所属する市場

$t$ :時刻

$a$ :注文価格

$COST_{(m,n)}$ :市場参加者エージェント  $n$  の市場  $m$  における時刻  $t$  での一日あたりの電力調達コスト

$BCQ_{(n,m,a,t)}$ :市場参加者エージェント  $n$  の市場  $m$  における価格  $a$  時刻  $t$  での買い約定量

$BCP_{(n,m,a,t)}$ :市場参加者エージェント  $n$  の市場  $m$  における価格  $a$  時刻  $t$  での買い約定価格

$SCQ_{(n,m,a,t)}$ :市場参加者エージェント  $n$  の市場  $m$  における価格  $a$  時刻  $t$  での売り約定量

$SCP_{(n,m,a,t)}$ :市場参加者エージェント  $n$  の市場  $m$  における価格  $a$  時刻  $t$  での売り約定価格

$UCQ_{(n,m,t)}$ :市場参加者エージェント  $n$  の市場  $m$  における時刻  $t$  での買い注文未約定量

$Penalty_{(n,m,t)}$ :市場参加者エージェント  $n$  の市場  $m$  における時刻  $t$  での不足電力に対するペナルティ

また各市場参加者エージェントは当該参加者自身の5分後の電力需要を知っているものとしその量について市場で電力の売買を行うものとする。そして電力需要が自身の発電能力を超えている場合には市場から電力を調達するべく買い注文を出し、電力需要より自身の発電量が多い場合にはその余剰電力を市場に売り注文として出す。なおこの際落札した電力を実際に自分の需要に供するまでの間は、各家庭に設置されている電力貯蔵装置に保管されるものとする。これらは以下の式で記述される。



if  $dem_{(n,m,t)} - gen_{(n,m,t)} \geq 0$

$$BOQ_{(n,m,t)} = dem_{(n,m,t)} - gen_{(n,m,t)} \cdots (2-2-1)$$

$$SOQ_{(n,m,t)} = total\_SCQ_{(n,m,t)} = 0 \cdots (2-3-1)$$

$$UCQ_{(n,m,t)} = BOQ_{(n,m,t)} - total\_BCQ_{(n,m,t)} \cdots (2-4-1)$$

if  $dem_{(n,m,t)} - gen_{(n,m,t)} \leq 0$

$$SOQ_{(n,m,t)} = gen_{(n,m,t)} - dem_{(n,m,t)} \cdots (2-2-2)$$

$$BOQ_{(n,m,t)} = total\_BCQ_{(n,m,t)} = 0 \cdots (2-3-2)$$

$$UCQ_{(n,m,t)} = 0 \cdots (2-4-2)$$

ただし、

$dem_{(n,m,t)}$  : 各市場参加者エージェントの需要

$gen_{(n,m,t)}$  : 各市場参加者エージェントによる発電量

$BOQ_{(n,m,t)}$  : 各市場参加者エージェントが行う買い注文量

$SOQ_{(n,m,t)}$  : 各市場参加者エージェントが行う売り注文量

$total\_BCQ_{(n,m,t)}$  : 各市場参加者エージェントの買い約定量合計

$total\_SCQ_{(n,m,t)}$  : 各市場参加者エージェントの売り約定量合計

なお  $total\_BCQ_{(n,m,t)}, total\_SCQ_{(n,m,t)}$  は以下の式で定義される。

$$total\_BCQ_{(n,m,t)} = \sum_a BCQ_{(n,m,a,t)} \cdots (2-5)$$

$$total\_SCQ_{(n,m,t)} = \sum_a SCQ_{(n,m,a,t)} \cdots (2-6)$$

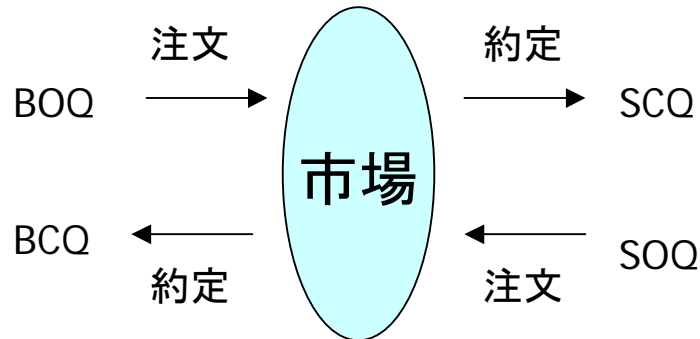


Fig.2-8 各変数と市場の関係

### 2.3.2 各市場参加者エージェントの市場への電力入札方法

本研究で用いる電力取引方法においては、各注文が電力パケットとして扱われているため、同じ市場参加者エージェントが電力を売買しても、そのパケット個々の約定価格は様々である。そのため本研究の手法を用いて入札を行う場合には注文価格と注量を各エージェントが任意に決められることになり自由度が無限になる。そこで本研究においては取引が行われている市場のデータを用いることにより、市場内における自身の取引平均価格を取得し、その平均価格の周辺で入札を行うこととした。そして過去の履歴を学習させよりよい入札を行っていくようにした。その入札手順は以下の通りである。

まず注文を行う市場参加者エージェントの属している市場での過去の同時間帯における自身の平均約定価格遷移回数を取得する。なおこの場合における取引価格は¥1/kWh 単位に離散化されているものとする。そしてその遷移回数を以下の式で正規分布補間する。

$$N(n_{(t,a,day)}) = DAYS \times \sum_a \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{\left(\frac{n_{(t,a,day)} - n'_{(t,a)}}{\Delta P}\right)^2}{2\sigma^2}\right) \dots (2-7)$$

ただし

$DAYS$  : 試行日数

$n_{(t,a,day)}$  : 第  $day$  日、時刻  $t$  における過去の約定平均価格  $a$  の累積回数

$n'_{(t,a)}$  : 第  $DAYS - 1$  日、時刻  $t$  における過去の約定平均価格  $a$  の累積回数

$N(n_{(t,a,day)})$  : 第  $day$  日、時刻  $t$  における過去の約定平均価格  $a$  の補間後累積回数

$\Delta P$  : 離散化した価格幅

$\sigma$  : 分散 (任意の値)

なお約定平均価格は以下の式で求める。

$$Average\_buy\_trade\_price_{(n,m,t)} = \frac{\sum_t (\sum_a BCQ_{(n,m,a,t)} \times BCP_{(n,m,a,t)} + Penalty_{(n,m,t)})}{\sum_t BOQ_{(n,m,t)}} \dots (2-8)$$

$$Average\_sell\_trade\_price_{(n,m,t)} = \frac{\sum_t \sum_a SCQ_{(n,m,a,t)} \times SCP_{(n,m,a,t)}}{\sum_t SOQ_{(n,m,t)}} \dots (2-9)$$

ただし

$Average\_buy\_trade\_price(n,m,t)$  : 買い平均約定価格

$Average\_sell\_trade\_price(n,m,t)$  : 売り平均約定価格

である。

そしてこの補間後遷移回数を規格化し  $BOQ, SOQ$  を乗じて各価格帯における注文量を決める。なお本研究においては  $\sigma=1.0$  とした。以下にその補間の例を示す。

前日の 18:30 に電力価格が 11.5 円だったという過去が 1 回ある場合で次の 18:30 の時点において買い注文を 10.0kWh 出す場合、Table2-1(a)のような遷移回数表ができる。これを(2-7)式で補間を行うと Table2-1(b)のような補間後遷移回数表が得られる。そしてこの値に注文量 10.0 k Wh を乗じることにより注文量を得る。(Table.2-1(c)) これにより価格帯に幅を持たせた入札が可能になる。(Fig.2-9)

Table2-1(a) 時刻  $t$  における補間前約定平均価格累積回数表例

~15	15	14.5	14	13.5	13	12.5	12	11.5	11	10.5	10	~10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Table2-1(b) 時刻  $t$  における補間後約定平均価格累積回数表例

~15	15	14.5	14	13.5	13	12.5	12	11.5	11	10.5	10	~10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.14	0.61	1.00	0.61	0.14	0.01	0.00

Table2-1(c) 時刻  $t$  における補間を用いた後に決定された入札量例

18時30分の購入電力価格(¥/kwh)	~15	15	14.5	14	13.5	13	12.5	12	11.5	11	10.5	10	~10	合計
補間後遷移回数(回)	0	0	0	0	0	0.01	0.14	0.61	1	0.61	0.14	0.01	0	2.51
18:30の入札量(kwh)	0	0	0	0	0	0.04	0.54	2.42	3.99	2.42	0.54	0.04	0	10

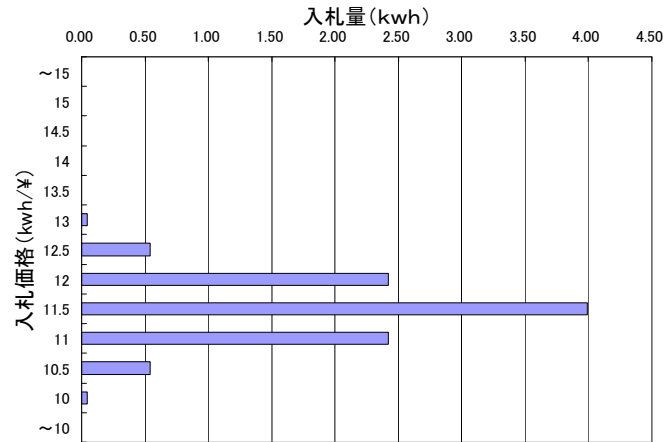


Fig.2-9 補間によって得られる時刻  $t$  における入札状況例

この手法を用いることで各市場参加者エージェントは入札価格を学習し、より効率的な入札を行っていただけるようになる。

### 2.3.3 非同期状況下での電力売買方法

本研究においては間欠的な電力融通を模擬するために証券取引市場のシステムを模擬し、指値と成行の注文を行うことで電力融通を行うこととしているが、このシステムは同時に非同期をも実現しなければならない。そこで以下の手法を用いて非同期を模擬した。すなわち、このモデルにおいては次の五分間に必要な電力を順次購入していくが、その 5 分間ある購入時間を区切って、その区切りを各市場参加者エージェントがランダムに選び、その時間に指値注文を行う、という形を取り非同期を模擬することとした。

なお次時点の指値注文を行った場合において、前時点での注文が約定しなかった場合には指値注文の注文有効時間が過ぎたものとして扱うことにした。その結果当該注文は未約定注文となる。その注文が買い注文である場合には当該電力分に対してペナルティを課し、売り注文である場合はその電力を廃棄することとした。そしてこのことを考慮して成行注文は次時点の指値注文を出す直前に出すものとした。なぜならばこのような状況下においては各市場参加者エージェントが電力不足によってペナルティを払うより成行注文で高い価格で購入する方が良く、もしくは余剰電力を廃棄するよりも安価でも売却した方が良く、と判断するのが妥当だからである。以下に 5 分間に 5 回の入札機会がある場合の入札タイミングの例を示す。

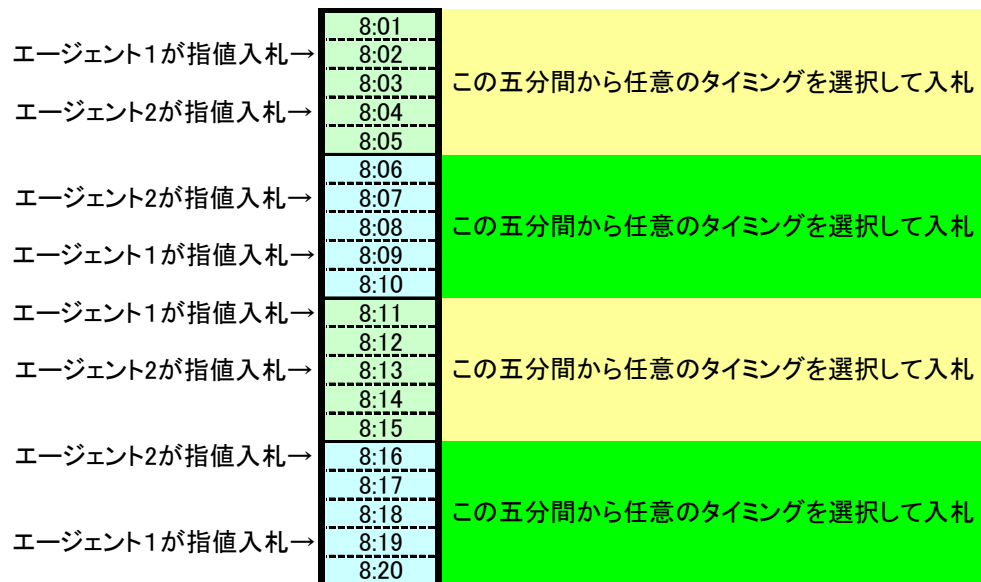


Fig.2-10 入札タイミングの作成例

時間	agent1注文有効期間	agent2注文有効期間	agent1の注文	agent2の注文
0				
1				
2				
3				指値
4			指値	
5				
6				成行
7			成行	指値
8			指値	
9				
10				
11			成行	
12			指値	
13				成行
14				指値
15				
16				成行
17				指値
18			成行	
19			指値	
20				
-				

Fig.2-11 入札タイミングと注文有効期間の例

これをフロー図で示す。

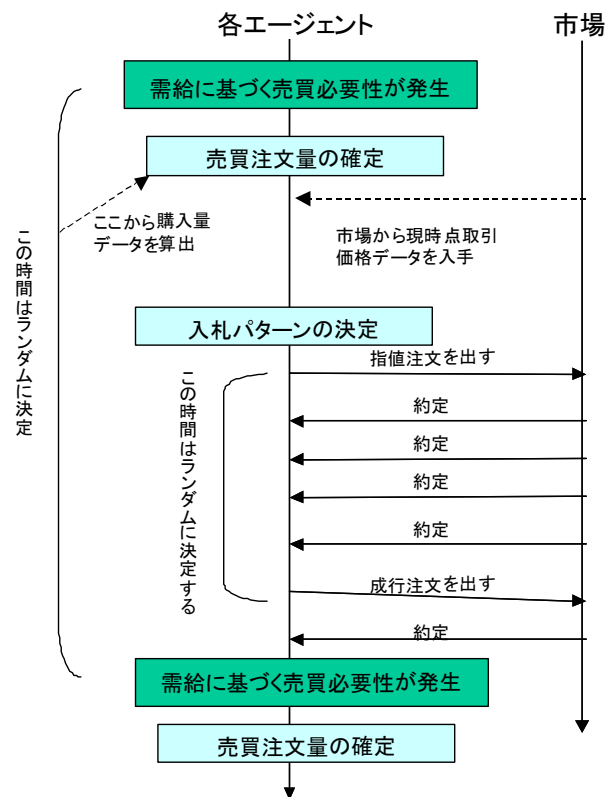


Fig.2-12 各市場参加者エージェントによる注文及び約定のフロー

なお、その他の解析条件は以下の通りである。

Table.2-2 基本解析条件

1日の時間分割数	288	一つの時間帯幅が5分
試行日数	100	100回計算させ学習を行う
取引単位	0.1Wh	
市場数	1以上	
一市場内参加者数	4以上	
取引価格帯分割数	30	
取引価格帯幅	¥1/kWh	¥10/kWh～¥40/kWhの間で電力取引が可能とした
電力不測ペナルティ	¥40/kWh	
入札分散( $\sigma$ )	1	
一単位時間分割数	12	5分間を12つに分割(20秒ごとに取引機会を与える)

## 第3章 家庭間小市場モデルを用いた単一市場内取引

### 3.1 家庭間小市場モデルによるシミュレーションに関する予備検討

家庭間小市場モデルを用いた電力融通を行う前にこのモデルが妥当に動いていることを示す必要がある。そこでまずは家庭用小市場モデルに購入電力量もしくは売却電力量をステップ状に変化させることにより価格が変化する様子を示す。

#### 3.1.1 電力購入量変化ケース

本ケースでは4人の市場参加者エージェントを設定し、各エージェントの発電量・電力需要のデータに以下のものを用いた。

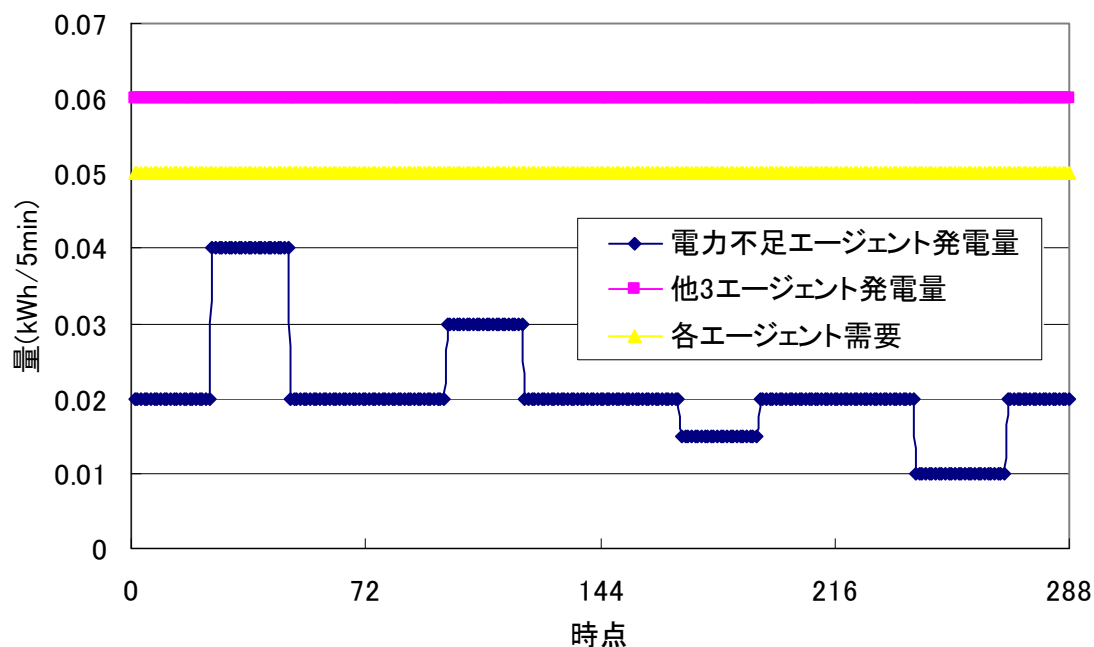


Fig.3-1 電力購入量変化ケース 各エージェントの発電量・電力需要

この結果市場内における各人の発電量・電力需要の平均は以下ようになる。このケースにおいては電力不足エージェントが電力の購入を行うことになるが、その量が変わっている。また同時に各人の発電量だけではなく、全体の電力パケットの総量も以下のように変化している。

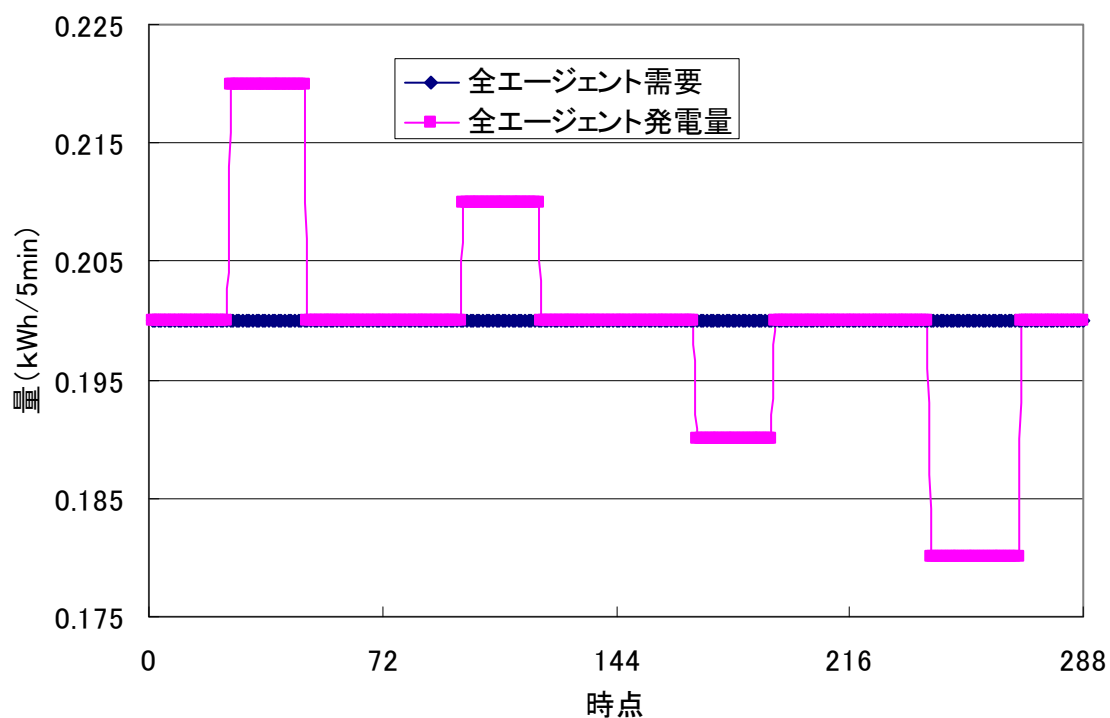


Fig.3-2 電力購入量変化ケース 総需給バランス

これらのデータを用いて家庭間小市場におけるシミュレーションを行った。その結果電力不足エージェントの購入価格について以下の結果が得られた。なおここで用いた結果はモデルの試行を行うために 10 日間計算させたものである。

このケースにおいて電力不足エージェントの発電量が増えると、市場に供給されている電力パッケージが過剰になるので、余剰電力を廃棄することになり、電力を売るエージェントの売り注文の約定平均価格は減少する。そして財が市場に十分供給されるために、市場から必要な量だけ調達する電力不足エージェントの電力調達価格の変動が少なくなる。一方電力不足エージェントの発電量が減ると市場全体として電力不足になってしまうため、当該エージェントはペナルティを払わねばならず市場全体の買い注文の約定平均価格は上昇する。なお、買いまたは売りが行われない事象は価格が変化しないということで表現した。



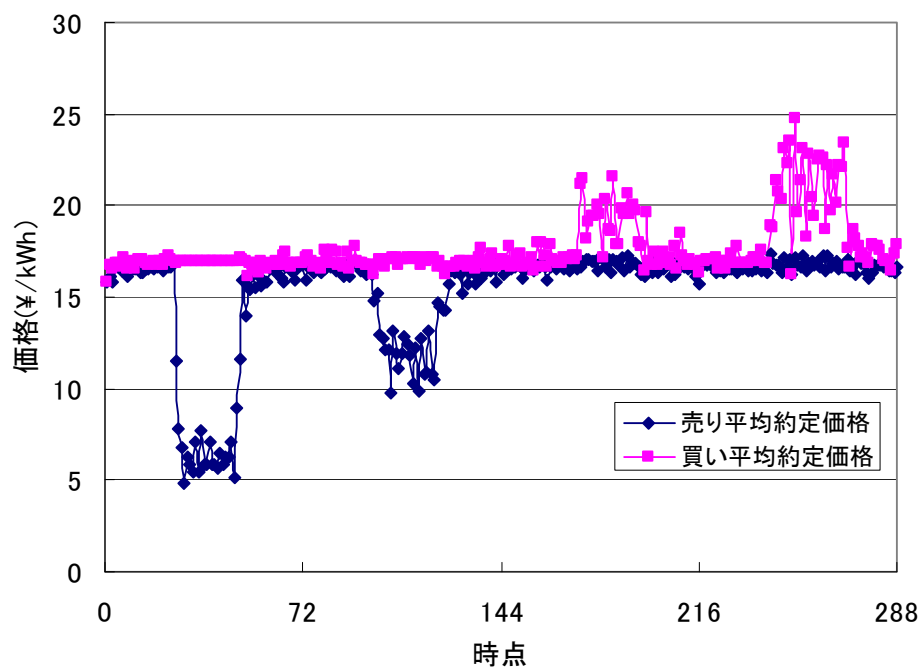


Fig.3-3 電力購入量変化ケース 市場平均約定価格推移

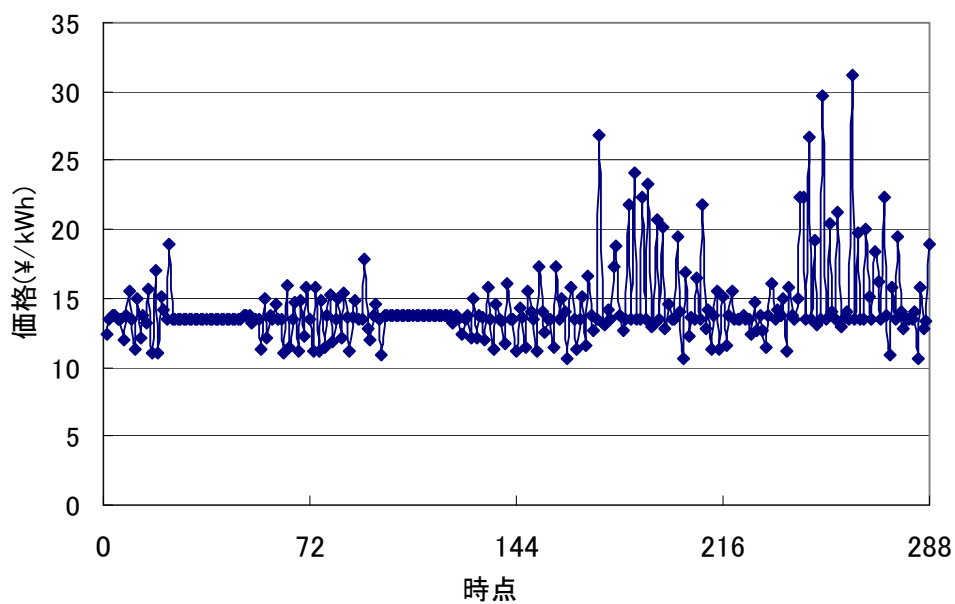


Fig.3-4 電力購入量変化ケース 電力不足エージェント購入価格推移

またこのときの電力不足量と買い注文約定量は以下の通りである。

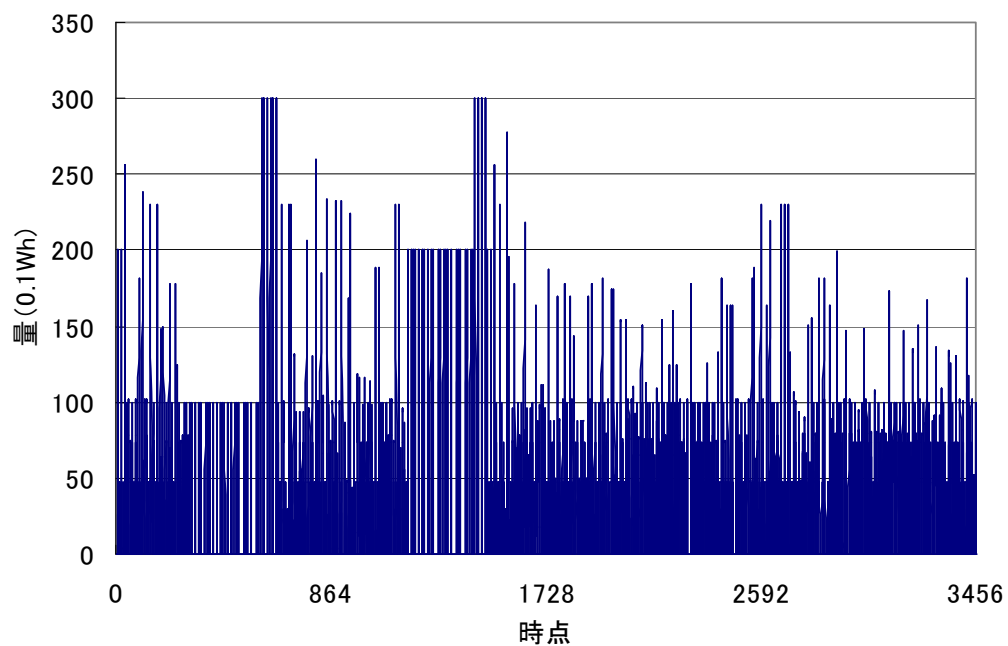


Fig.3-5 電力購入量変化ケース 電力不足エージェント電力購入量推移

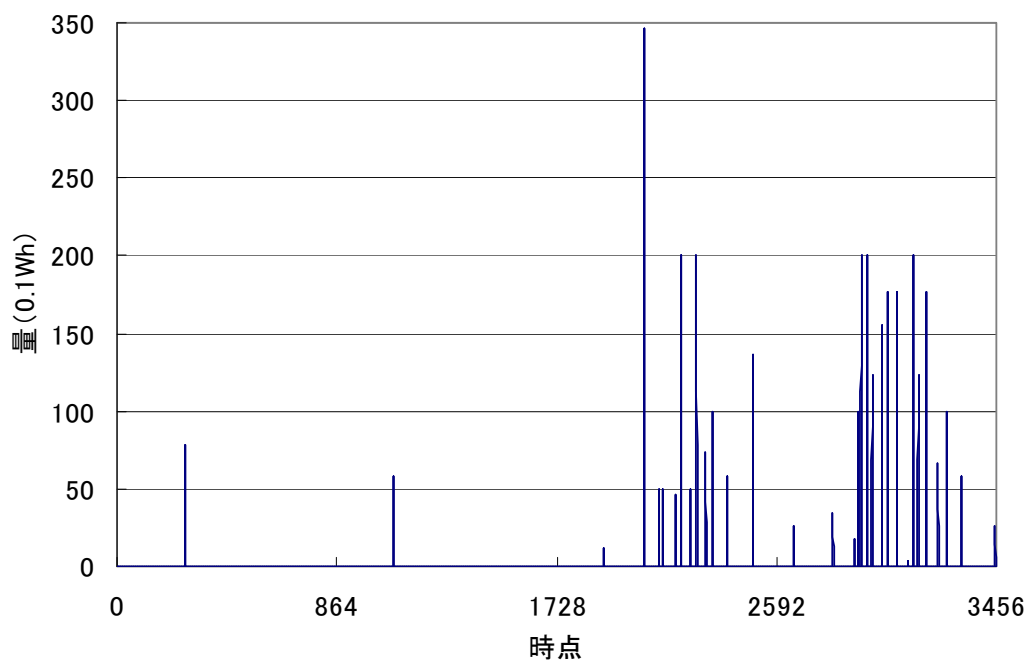


Fig.3-6 電力購入量変化ケース 電力不足エージェント電力不足量推移

この結果は上の価格変化の説明を裏付けるものといえる。なお、モデルが非同期に入札を行うことから発電量が増えるステップの一部においても電力供給不足が起こってしまう

ている。

### 3.1.2 電力売却量変化ケース

前段では電力購入量が変化したケースを示したが、次に前段と同様に 4 人の市場参加者エージェントを設定し、以下の電力需要・発電データを用いてシミュレーションを行った。前段と同様 10 日間の計算を行った結果を示す。

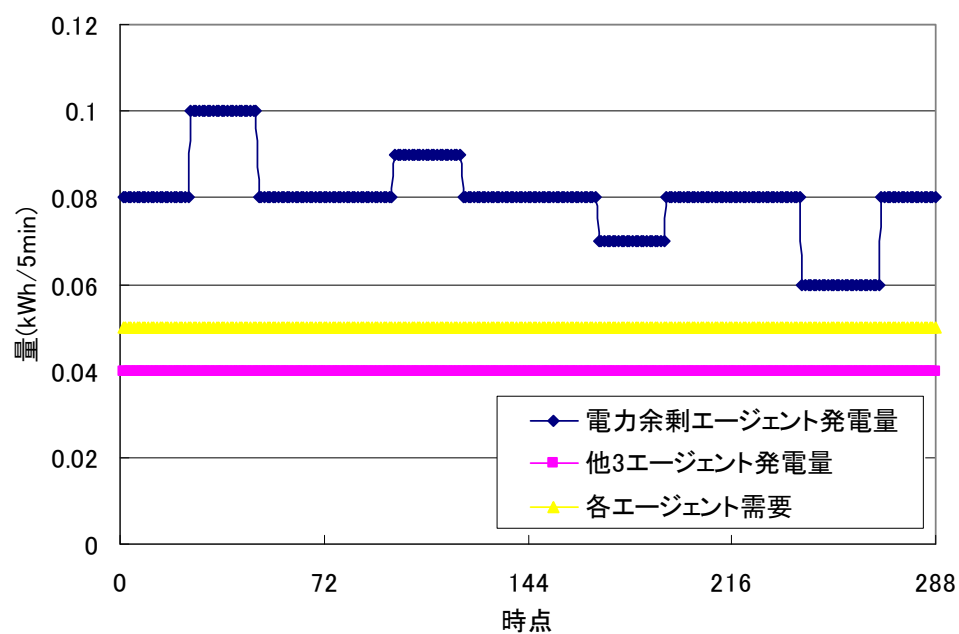


Fig.3-7 電力売却量変化ケース 各エージェントの発電量・電力需要

この状態での総需給バランスは以下の通りである。

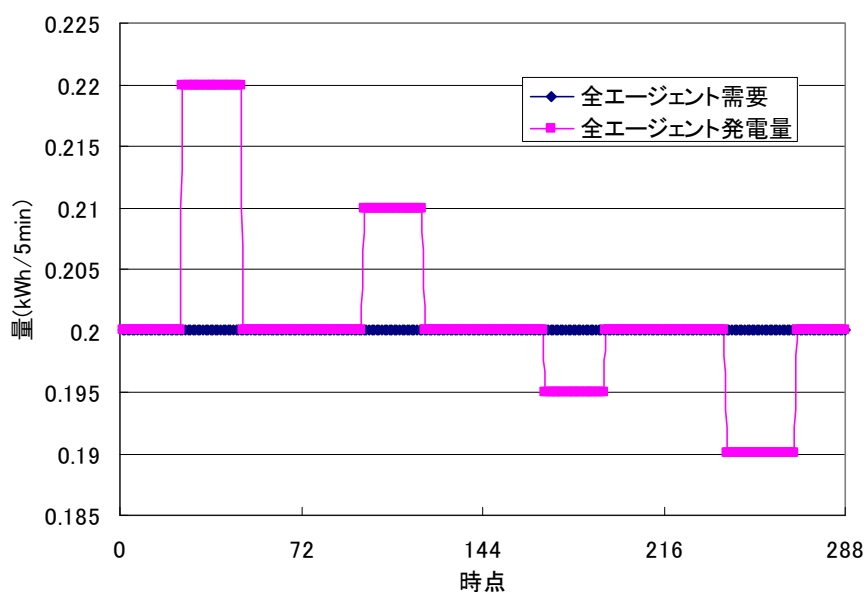


Fig.3-8 電力売却量変化ケース 総需給バランス

電力余剰エージェントの売り注文約定価格は以下ようになった。この結果では、市場内全電力の約定価格平均が総需給バランスに対する応答は電力購入量変化ケースと同じような結果になり、本モデルの価格形成プロセスに合理性がある事が確認できた。この事は本モデルで電力取引を行えば実時間料金制を採用する事が出来る可能性があることを示唆している。

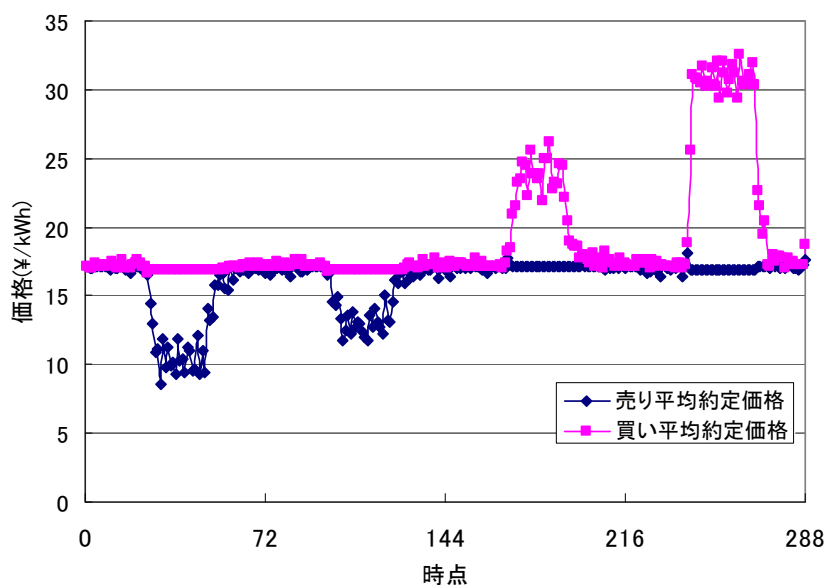


Fig.3-9 電力売却量変化ケース 市場平均約定価格推移

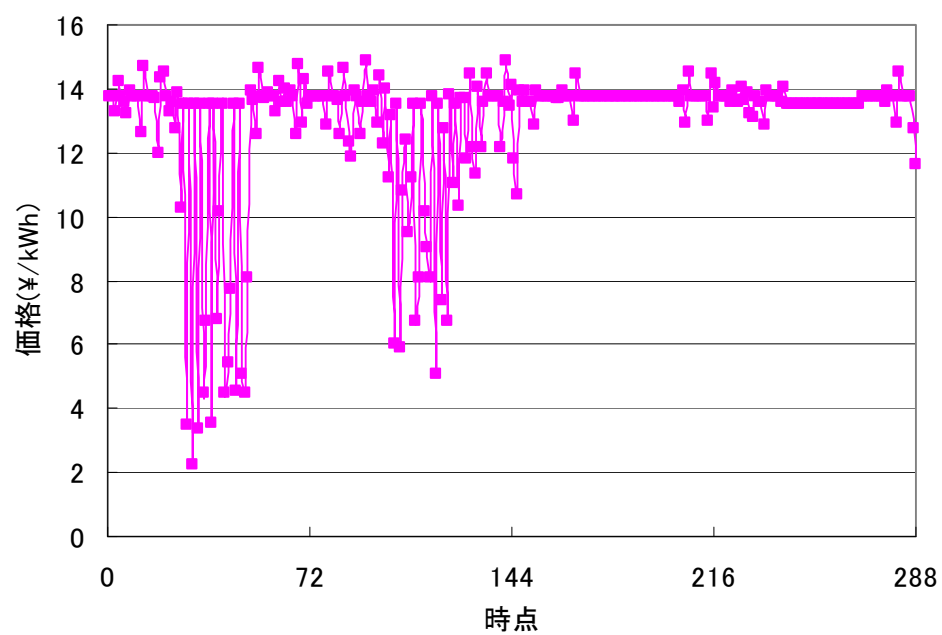


Fig.3-10 電力売却量変化ケース 電力余剰エージェント売却価格推移

### 3.2 単一市場内取引に関する諸前提

上では家庭間小市場モデルが価格形成機能を有することを示した。次は実際の家庭のように電力需要に不等時性がある需要家を家庭間小市場内のエージェントとして参加させた場合のシミュレーションを行う。今回はまず一つの家庭間小市場に 4 軒の市場参加者エージェントが参加している状況でのシミュレーションを行った。4 軒分の需要は前述のボトムアップシミュレーションにより作成する。

一方発電データは需給バランスが電力過多（市場 1）の場合と電力不足（市場 2）の 2 パターンのものを用意した。

Table 3-1 市場 1・市場 2 の各市場参加者エージェントの所持発電設備容量

市場1(kW)		市場2(kW)	
agent1	2	agent1	0.5
agent2	1	agent2	0.5
agent3	0.5	agent3	0.4
agent4	0.75	agent4	0.3

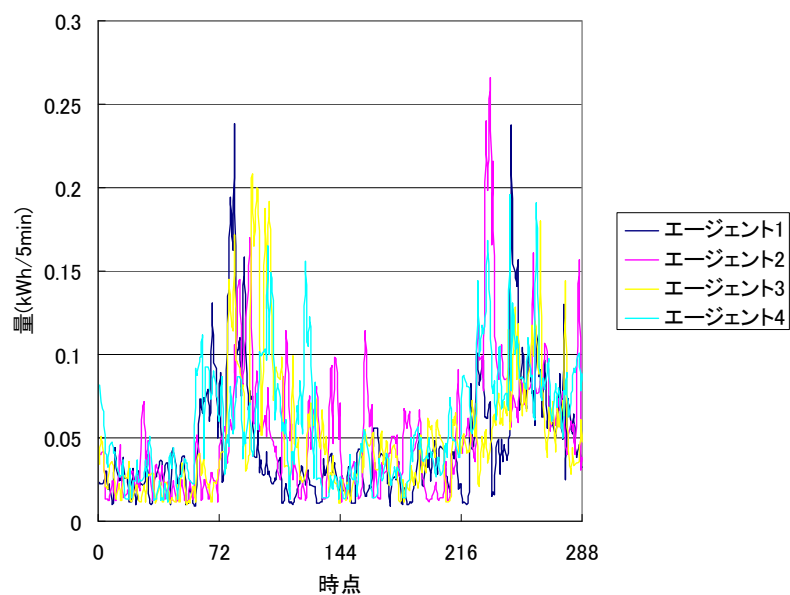


Fig.3-11(a)需要データ 市場 1

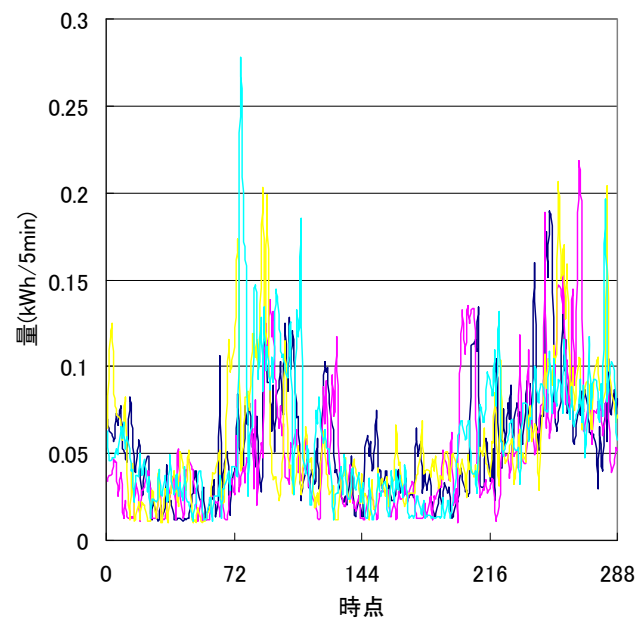


Fig.3-11(b) 需要データ 市場 2

### 3.3 単一市場内取引シミュレーション結果

上記のモデルを用いてシミュレーションを行った結果、市場 1・市場 2 における総費用は以下ようになった。

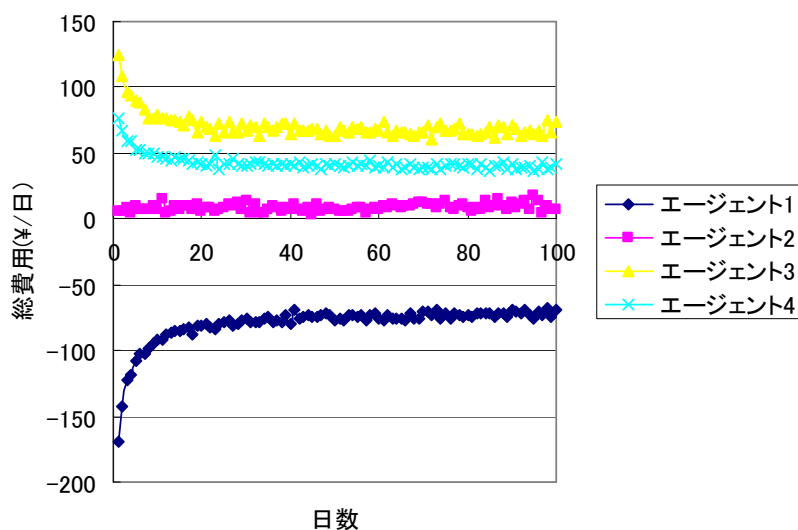


Fig.3-12(a) 市場 1 総費用

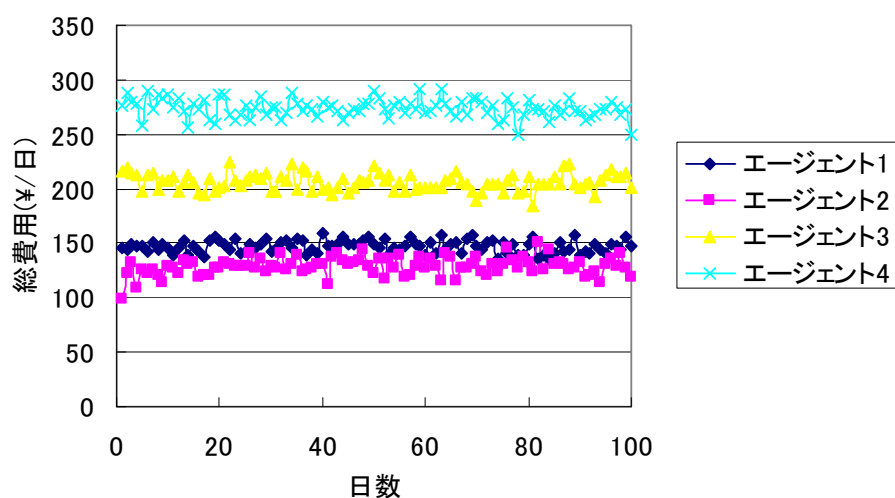


Fig.3-12(b) 市場 2 総費用

この結果より電力需要がどのエージェントでも大差ないことから、発電能力の高いエージェントほど自身の一日の電力購入費用が少ない事が確認できる。また学習を行っているために、日数を経るごとに各エージェントの価格格差がある値に収束する程度まで小さくなっていることも確認できた。次にこれら 2 市場の取引概況を示す。



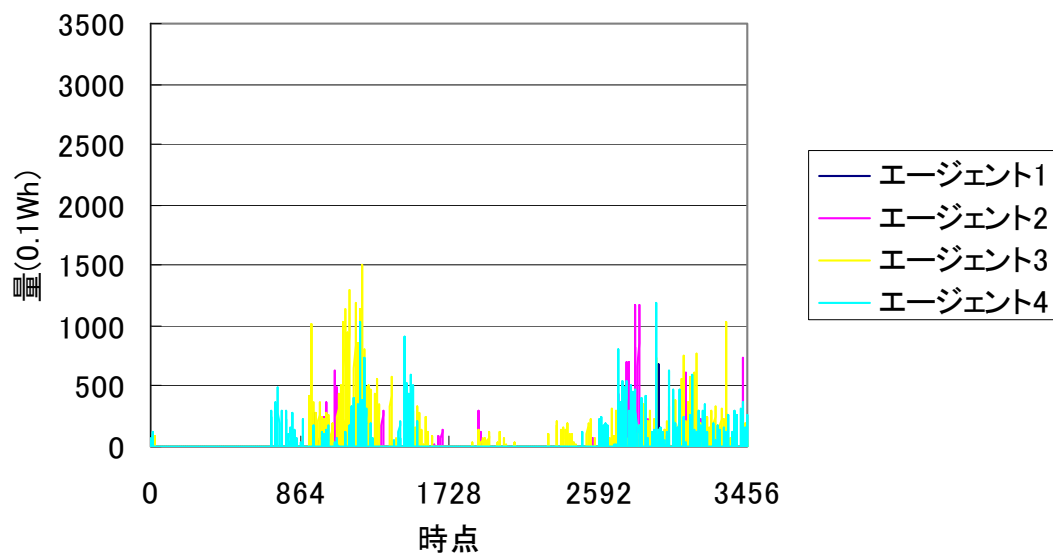


Fig.3-13(a) 市場 1 買い約定量

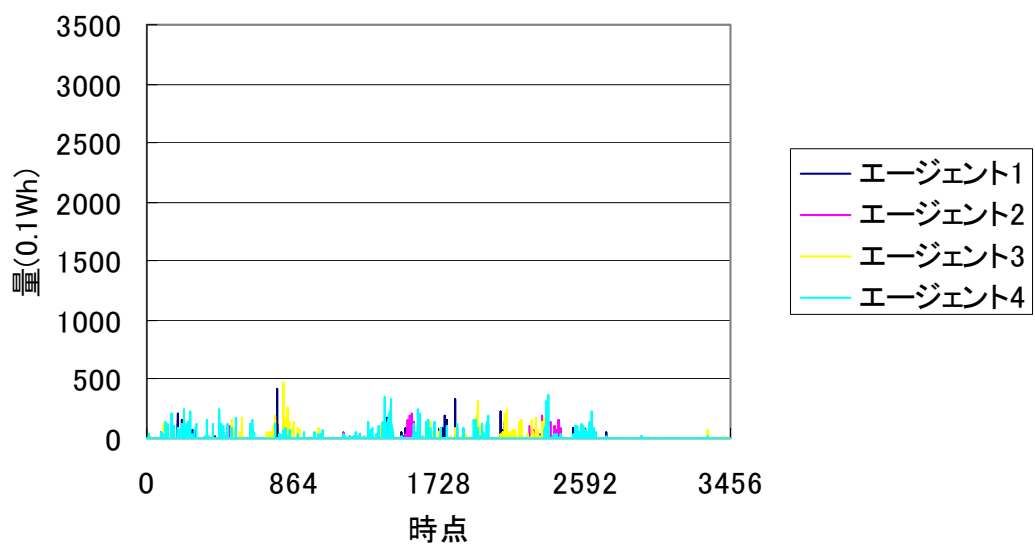


Fig.3-13(b) 市場 2 買い約定量

市場 1 は発電能力が大きいために、電力流通は需要の大きくなる時間帯に起こっているのに対し、市場 2 は平時から電力不足が起きているので平時に電力融通が行われている。また市場 2 においては需要の大きい時には各エージェントは自身の需要をまかなうのが精一杯であるために売り注文が出ず、結果購入できる電力が存在しないので買い約定量が存在しない。これを確認するため以下に売り約定量を示す。

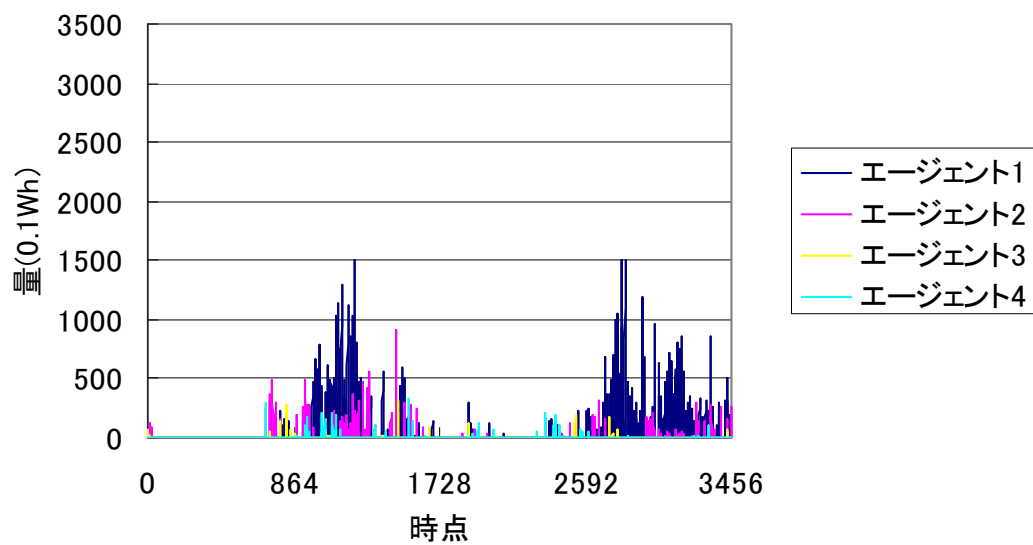


Fig.3-14(a) 市場 1 売り約定量

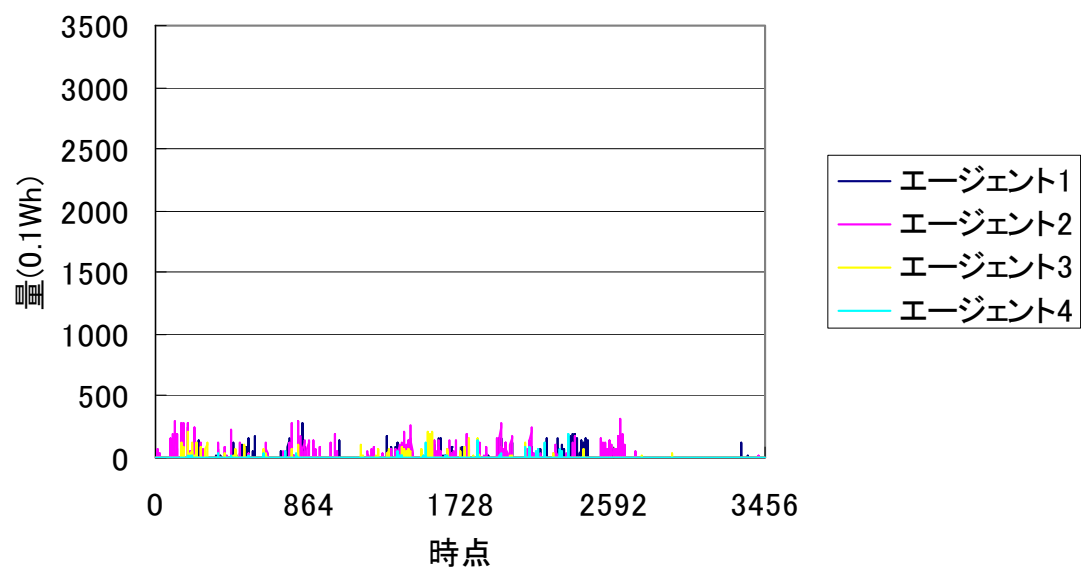


Fig.3-14(b) 市場 2 売り約定量

売り電力と買い電力の量が市場 1、市場 2 でそれぞれ釣り合っていることから前述の説明のような取引が起きている事が確認できた。

更に以下においては各市場における各エージェントの不足電力量を示す。

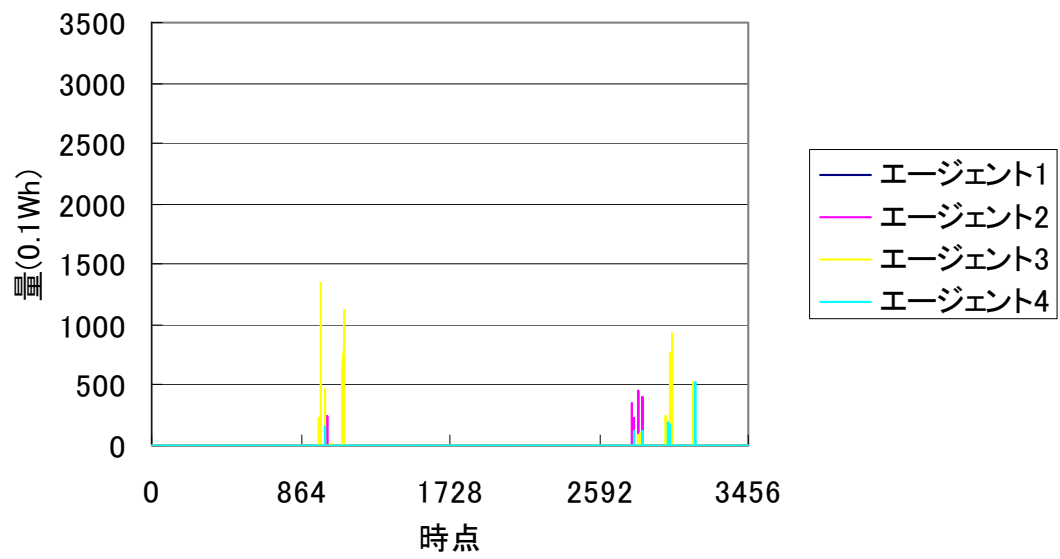


Fig.3-15(a) 市場 1 不足電力量

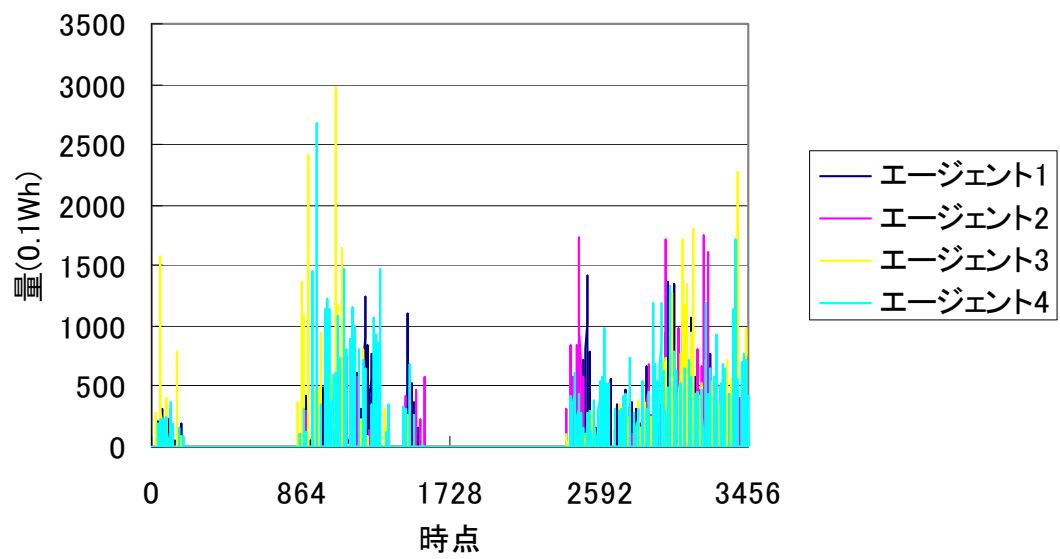


Fig.3-15(b) 市場 2 不足電力量

次に各市場において約定されなかった未約定電力を各エージェント別に示す。

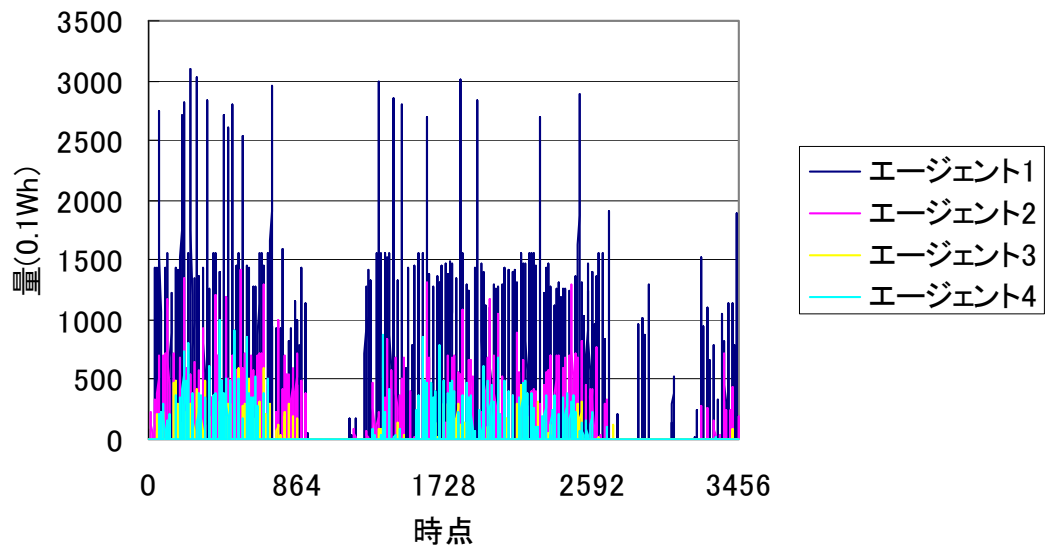


Fig.3-16(a) 市場 1 未約定電力量

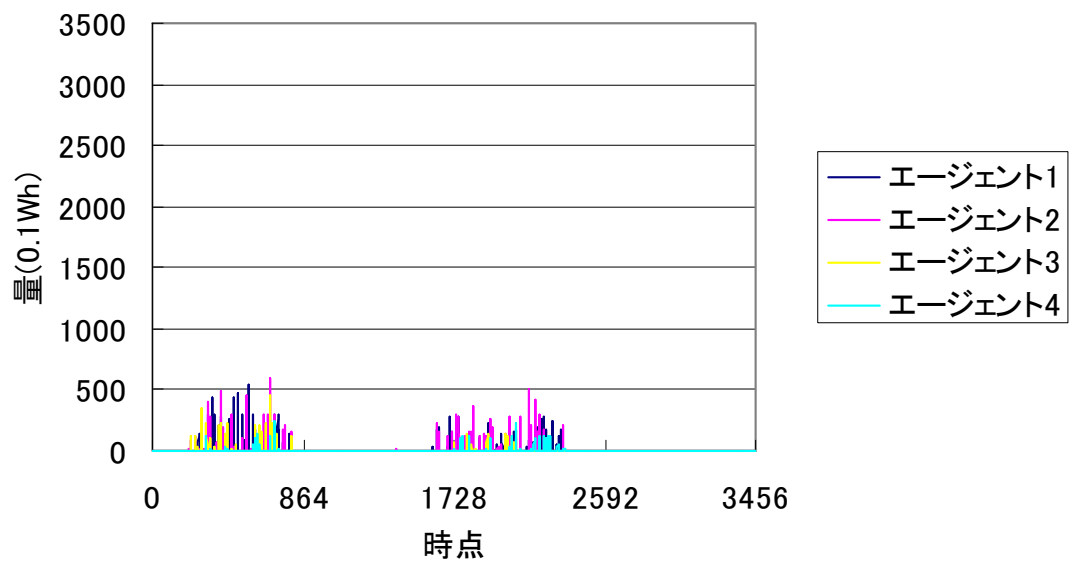


Fig.3-16(b) 市場 2 未約定電力量

不足量、未約定量も上述の内容と同じ事実を示しているといえる。そしてそれと同時に市場 1 が電力供給過多の市場で、市場 2 が電力供給不足の市場である事が再確認された。このことは市場内での取引価格が市場 1 は安く、市場 2 は高くなっていることを示唆している。この事実をシミュレーション結果で示す。

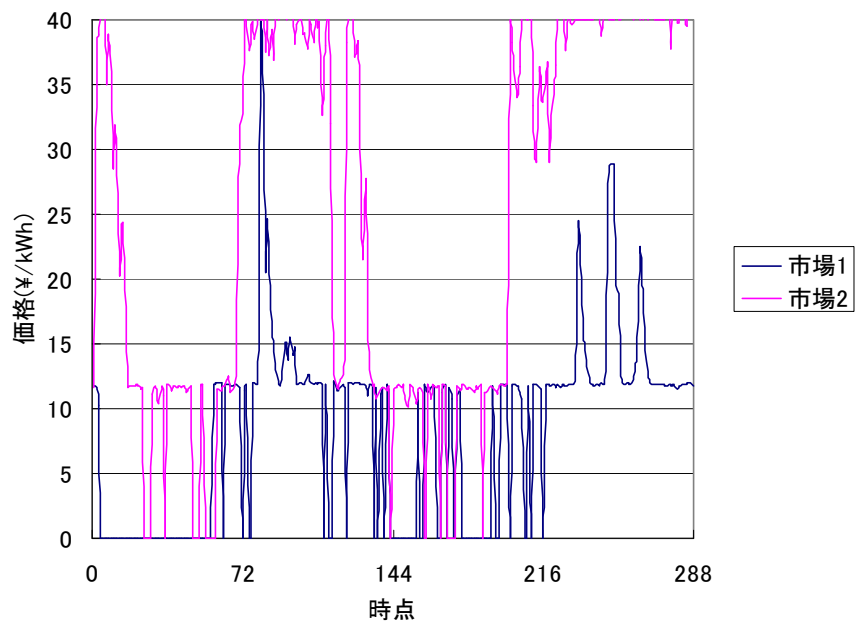


Fig.3-17 各市場における市場内買い価格推移

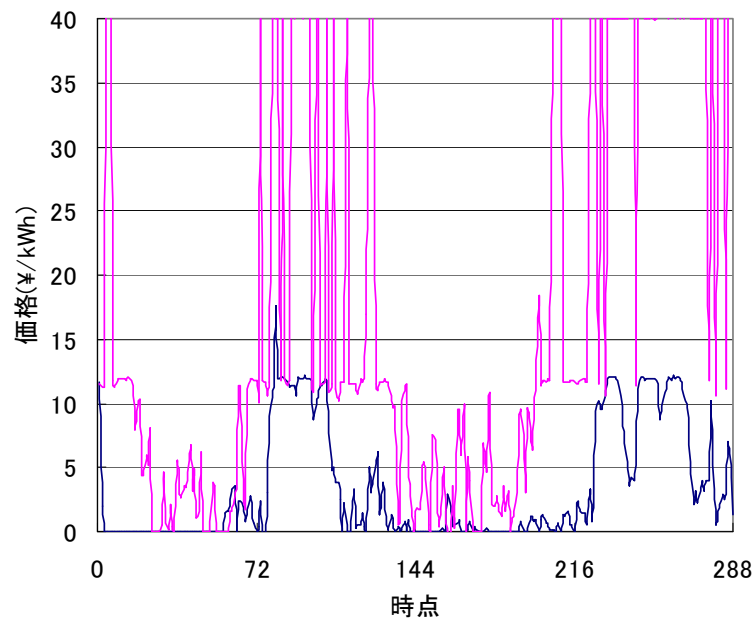


Fig.3-18 各市場における市場内売り価格推移

需要の変動により価格が連動している事が確認できる。また市場1より市場2が概して電力取引価格が高いことも確認できる。なお、このグラフで値が存在しない部分は当該時点において電力取引が行われていないことを示す。また売り価格と買い価格が一致しないのは売り価格は未約定の電力も合算して算出しており、買い価格はペナルティ価格を含んで算出されているためである。

## 第4章 家庭間小市場連系モデルを用いた複数市場取引

前章までは家庭間小市場を一つ設定しシミュレーションを行ったが、分散電源ネットワークを構築する上ではこのような市場を連系していく必要がある。そこで本章においては市場を接続し分散電源ネットワーク構築を想定したシミュレーションを行う。

### 4.1 市場間における電力融通に関する諸前提

#### 4.1.1 市場の連結と送電線エージェントの関係

複数の市場を連系するとこの接続の両端にある市場では、各市場参加者エージェントの需要の状況及び所有する発電設備は一般に異なると思われる。そのため前章に示したように両端の市場において電力取引価格が異なると思われる。しかしながらこのままだと電力供給に余裕のある市場においては余剰電力をそのまま廃棄せねばならず、また電力供給に不足がある市場においては調達できないことによってペナルティによる損が生じる。そこで市場間を接続する場合に必要な送電線に市場間の価格裁定を行わせる機能を持たせ、それを送電エージェントとして市場間に置き、価格裁定を行わせることを考える。

#### 4.1.2 送電エージェントによる価格裁定

送電線エージェントは送電線で接続されている両市場の間で価格裁定取引を行うが、その方法は以下の通りである。送電線エージェントはまず家庭間小市場における各市場参加者エージェントと同じように5分間を複数の時間帯に分割したうちのいずれかのタイミングで価格裁定を行う。このタイミングが決まると、すぐに両市場の注文状態を確認して裁定可能なパケットを検索する。そしてその検索の後、一方の市場から安価な余剰電力を購入する。そしてその次の時点で一方から購入した電力を他方の市場に流し、他方の市場の市場参加者エージェントに売却する。送電エージェントはこの過程で利益を得る事が出来、この利益を原資として送電網の維持及び設備増築を行っていけるものと思われる。

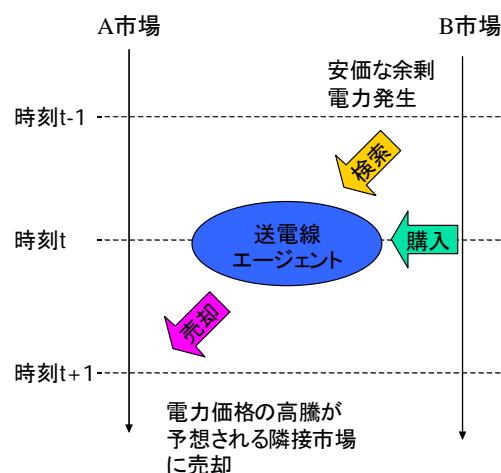


Fig.4-1 送電エージェントによる価格裁定の仕組み

この価格裁定の流れをフロー化すると以下ようになる。

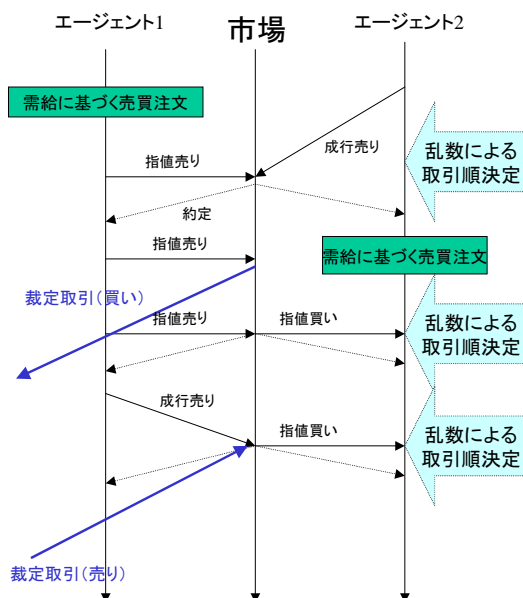


Fig.4-2 送電エージェントによる裁定取引の流れ

#### 4.1.3 価格裁定における注文の検索

価格裁定を行う際の注文の検索は以下の手順で行う。

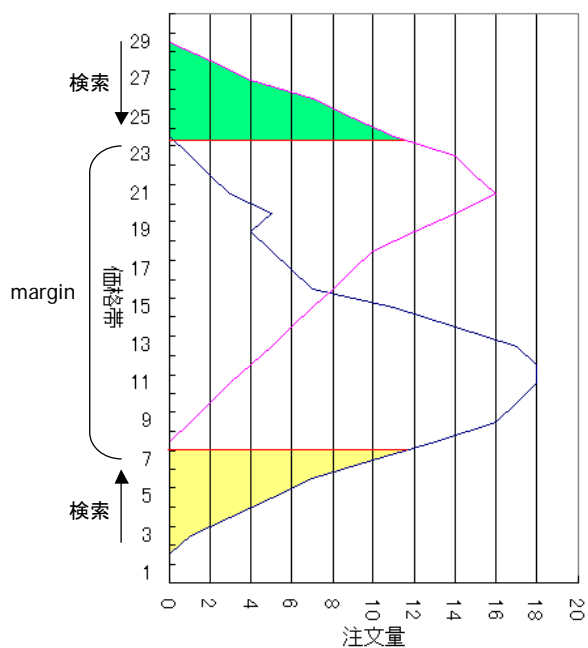


Fig.4-3 裁定取引における価格検索方法

まず価格裁定を行うタイミングになったら、その送電線エージェントに接続されている両市場の当該時点での注文を確認する。そして市場平均価格の高い市場については買い価格を高い方から、市場平均価格の低い方については売り注文を安い方から同じパケット数を検索していく。

そしてパケット検索を続けていき、両方の検索における価格差がある裁定価格幅になったら検索をやめ、そのパケット数が送電エージェントによって裁定を行う電力量とする。なおこれは前頁図において緑色部分の面積と黄色部分の面積が等しい事を示している。

その後実際に放電や購入により調達できた電力量について売却を行っていくものとする。なお、送電線エージェントが落札した電力は基本的に指値注文で売却するが、次の裁定を行う直前までにこの落札電力が売れ残った場合には成行注文で売り抜けを行うかもしくは電力貯蔵装置で貯蔵を行うものとする。

なお、以下のシミュレーションにおいては以下のパラメータを用いるものとする。

Table.4-1 送電エージェントの設定パラメータ

送電エージェント数	1以上
各市場との市場連結数	1以上
電力貯蔵装置電力保持率(/5min)	0.99
電力貯蔵装置容量	15Wh
単位時間当たり貯蔵装置充電率	0.7
裁定価格幅	¥5/kWh



## 4.2 2市場1送電エージェント裁定取引シミュレーション

### 4.2.1 2市場1送電エージェント裁定取引シミュレーションの設定

本段では分散電源ネットワークを構築する準備段階として、3章で用いた2市場を使ってその2市場の間に一人の送電線エージェントを入れた2市場1送電エージェントモデルについてのシミュレーションを行う。

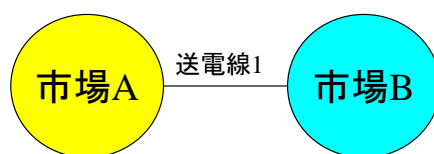


Fig.4-4 2市場1送電エージェントモデル

このシミュレーションを行う際に送電線エージェントが次の裁定を行う時点までに売れなかった注文について、成行売りをを行い売り抜ける（Case 1）、電力貯蔵装置で貯蔵を行って次時点に持ち越す（Case 2）という2ケースでシミュレーションを行った。

### 4.2.2 裁定取引の具体的な取引例

裁定取引の具体的な取引は以下のような手順で行われる。なお、以下はシミュレーション結果の一部である。

(例)計算日数 100 日目、時刻 08:35 付近における取引例

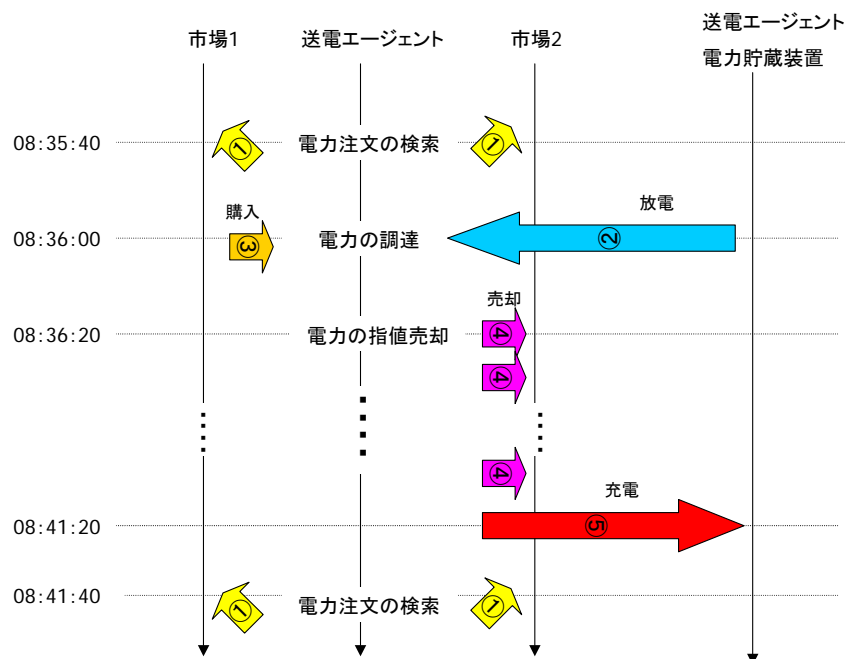


Fig.4-5 裁定取引例

上の場合始めに裁定取引タイミングの 08:35:20 に電力パケットの検索を行い、購入すべき電力量が 65 単位であることを決定し、裁定購入価格、裁定売却価格の決定を行う (①)。そしてその 20 秒後にこの量を調達すべく、まずは貯蔵装置にたまっていた 50 単位の電力を放電し (②)、更に市場から検索によって算出された裁定購入価格以下で 15 単位の購入を図ろうとする。そしてこの時刻の買い付けで 65 単位の電力を調達する事が出来た (③)。そして 08:36:20 から、次の裁定タイミング直前の 08:41:20 までは指値注文で検索によって算出された裁定売却価格以上での売却を試み、44 単位を売却した (④)。そしてこの時点で売れ残っている電力 21 単位は貯蔵装置に戻す (⑤)。そして次の裁定を行うためパケット検索へと移る。(①) これを繰り返すことで裁定取引を行う。

#### 4.2.3 裁定取引結果

まずは裁定エージェントの総費用を示す。

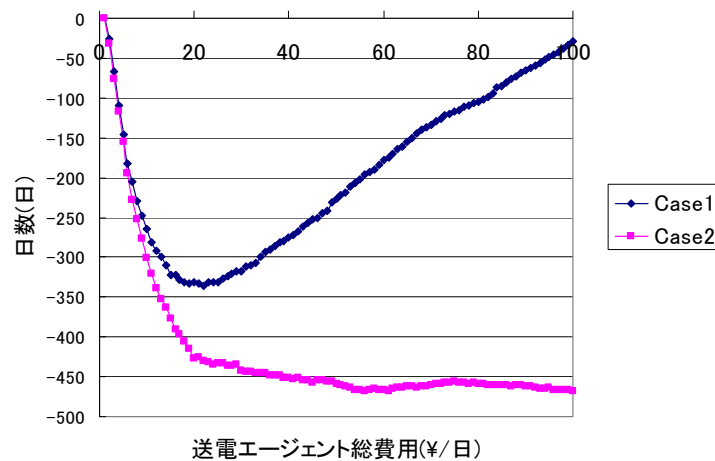


Fig.4-6 送電エージェント総費用ケース比較

この図で費用の負の値は利益を示す。これを見るとまずは両ケースで学習が行われていることがわかる。**Case1** では各市場内の市場参加者エージェントは価格の学習を行い、送電エージェントの売り抜け入札を妨害しようとする入札を行うようになるため、送電エージェントの利益は一定までの増加を境に急速に減っていき利益確保が出来ない事が確認できる。それに対し **Case2** では一定値に収束する様子が確認でき、貯蔵装置を有することで送電エージェントが安定的に利益を得る事が出来る事が確認された。そこで以降は **Case2** のシミュレーションを行うことにする。

この際、送電エージェントによる裁定を行うと各市場における市場参加者エージェント全員の総費用の合計は以下の通りになった。

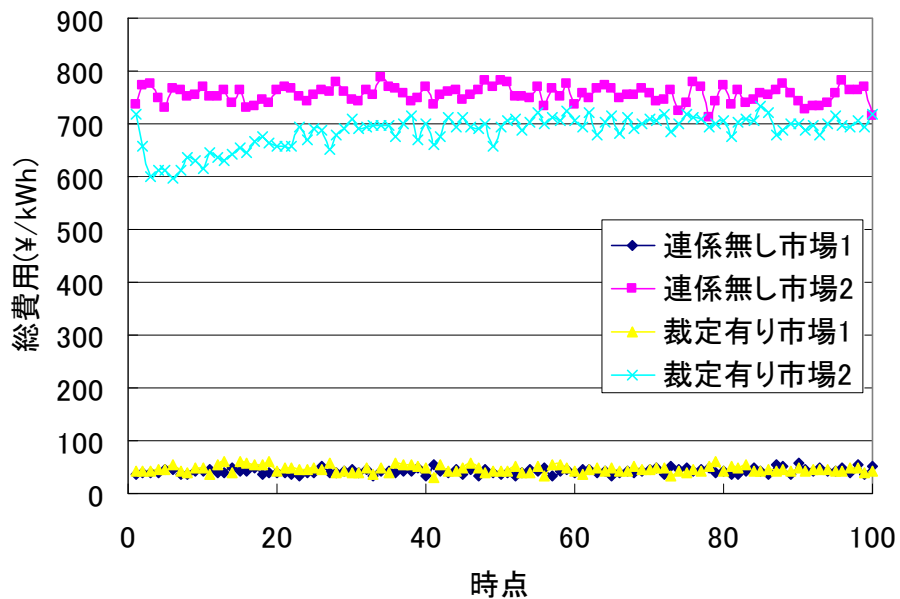


Fig.4-7 各市場における市場参加者エージェント総費用合計

このように市場 1 については有意差が見えにくいですが、市場 2 については裁定を行うことで費用が明らかに低減している事が分かる。その結果、裁定が行われることで全市場のエージェント合計の費用を抑える事が出来る事が確認できる。なおこの結果が導出されるのは、電力不足でペナルティを課されていた分の電力の一部が送電エージェントによって市場 1 から調達された電力と約定したためである。このことを表す事実として、連系前と連系後における 2 市場の各エージェント合計売買高および市場 1 の合計電力廃棄量、市場 2 の合計電力不足量を示す。これにより約定量の増加等が確認される。

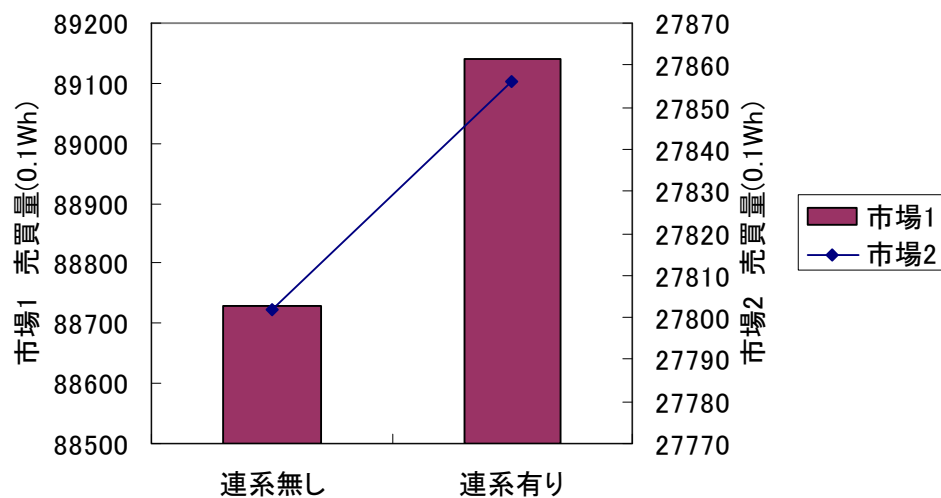


Fig.4-8(a) 2 市場における合計売買高

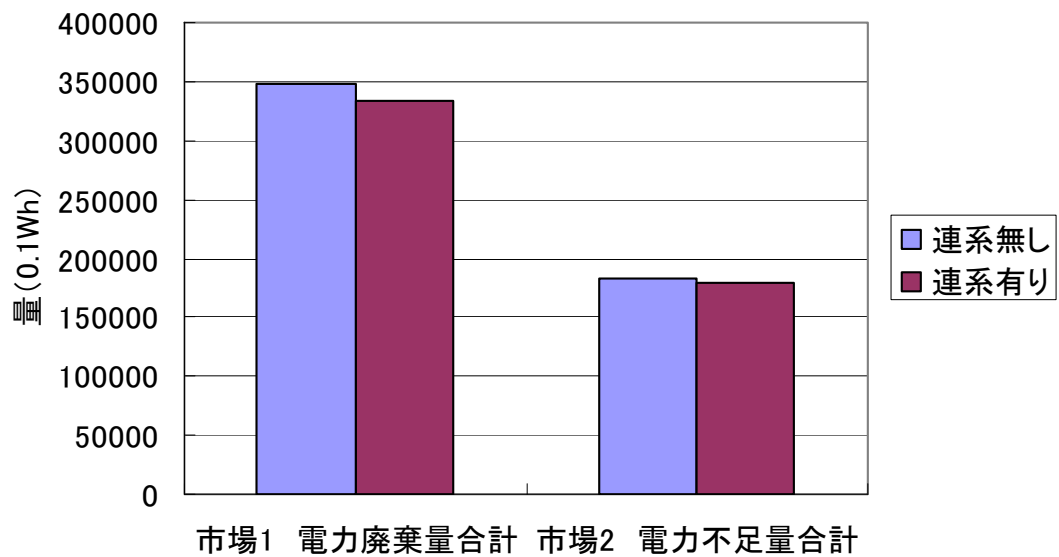


Fig.4-8(b) 市場1の合計電力廃棄量及び市場2の合計電力不足量

これにより各家庭の費用が低減している様子を以下に示す。

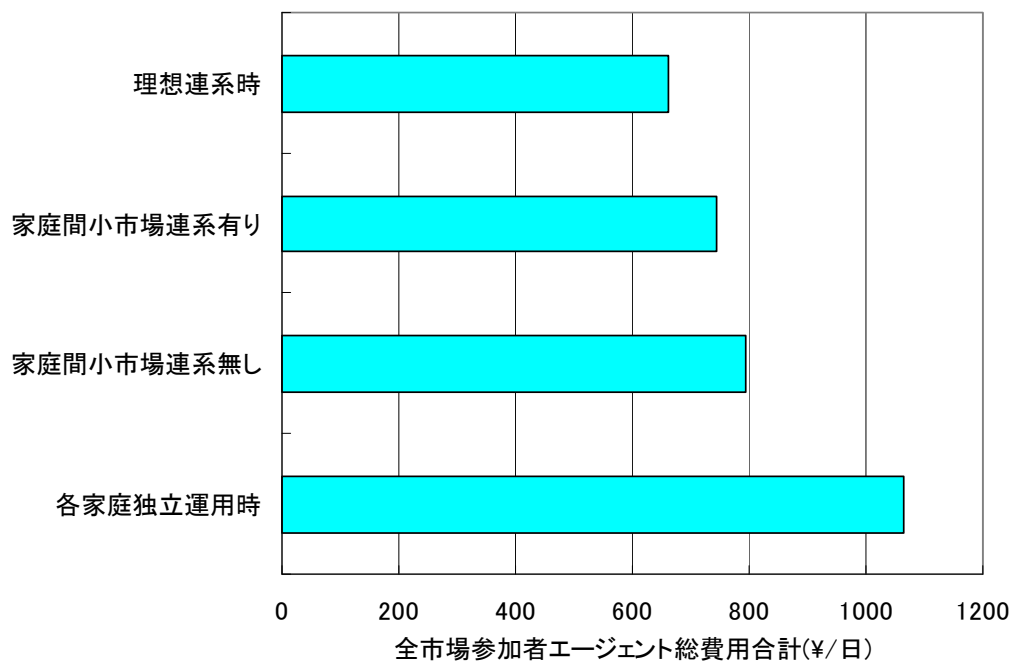


Fig.4-9 全市場参加者エージェント総費用合計の比較

これによれば家庭間市場の構築を行うことで各家庭が費用を低減でき、その効果は連系を行うことにより、更に大きくなっている事が確認できる。ただし本研究による裁定は理論値ほど行われていないこともわかる。これは裁定を行う価格幅を設定していることによ

り裁定量が制限されてしまうためである。なお理想連系時の費用は各人の 5 分おきの需要データ、発電データから算出した電力不足量にペナルティを乗じたものを核時間毎に計算した総和である。また送電線エージェントによる裁定により、電力不足分以外の約定電力についても約定平均価格が調整され、市場 1 と市場 2 間の電力料金格差が小さくなっている。この様子を下に示す。

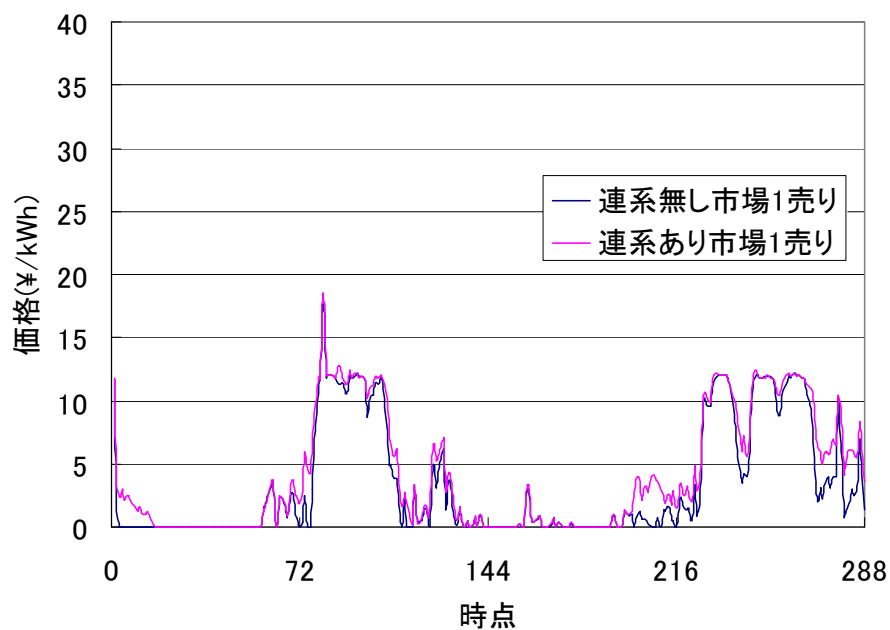


Fig.4-10(a) 市場 1 平均売り約定価格

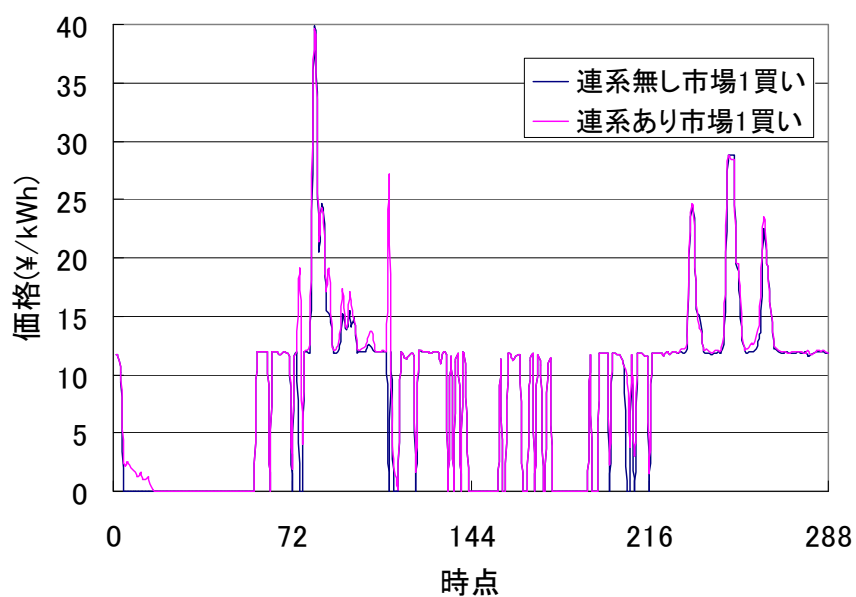


Fig.4-10(b) 市場 1 平均買い約定価格

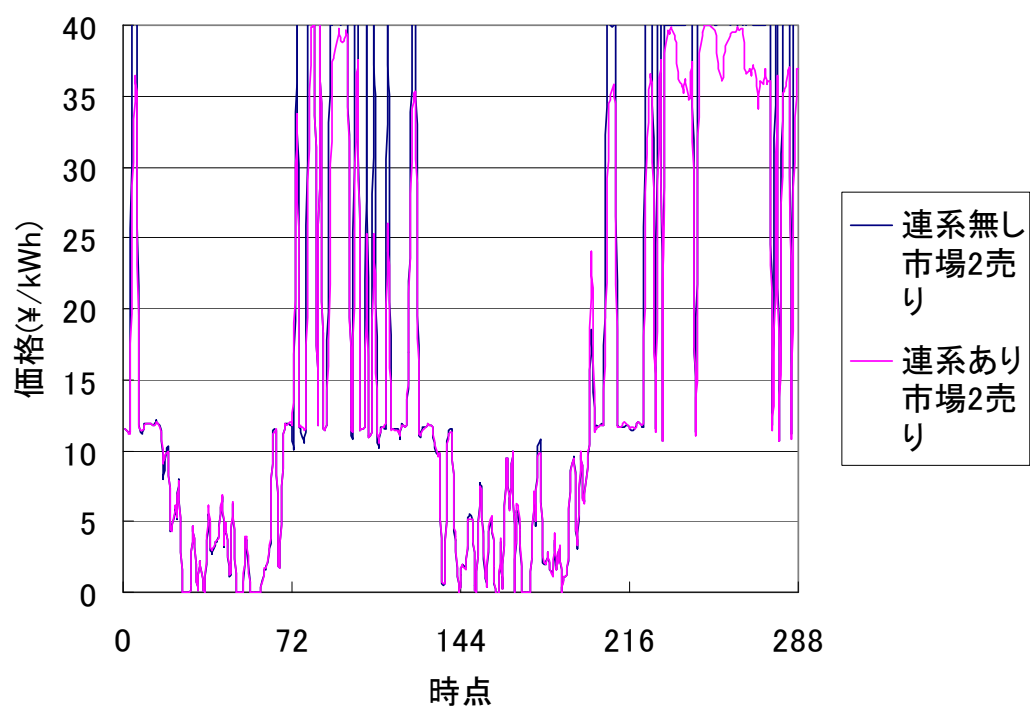


Fig.4-11(a) 市場 2 平均売り約定価格

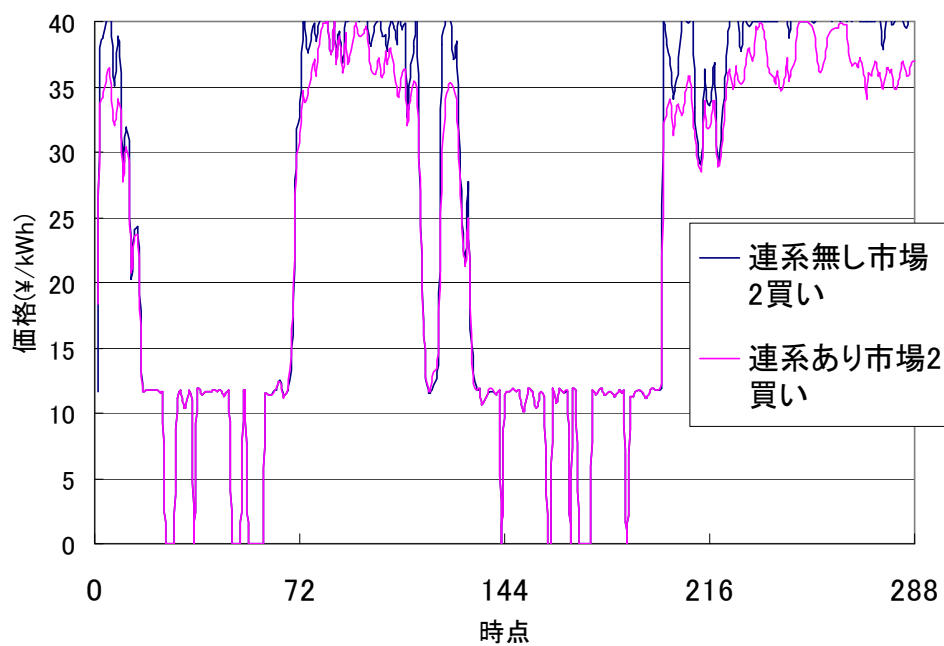


Fig.4-11(b) 市場 2 平均買い約定価格

この結果によれば、裁定が行われることにより市場平均価格の高い市場 2 では電力が値下がりする一方、市場 1 では市場価格が上昇し、価格調整が行われている事が確認できる。そして次に電力貯蔵装置の電力貯蔵量推移を示す。

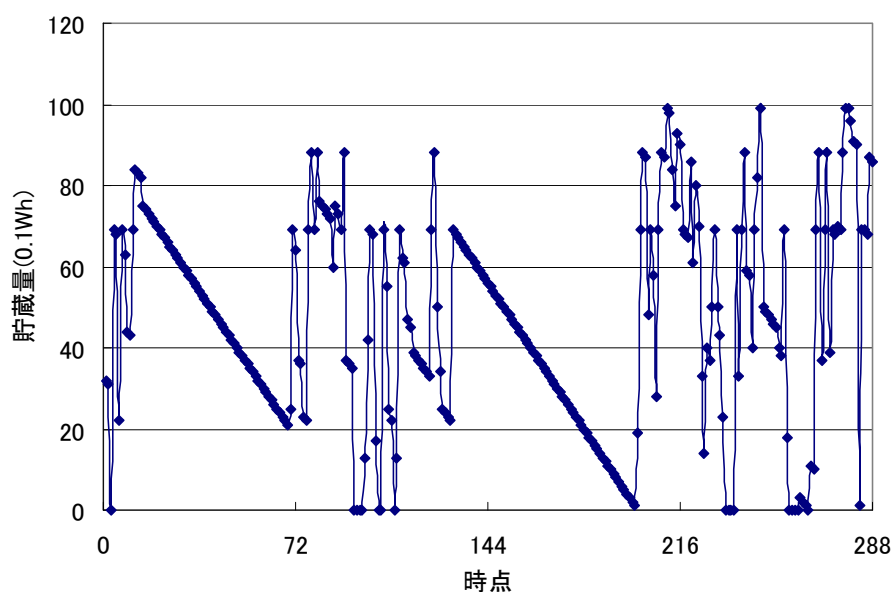


Fig.4-12 送電エージェント電力貯蔵量推移

この結果より、電力需要が増え両市場内で電力量の不足が起こっているとき放電は行われず自然放電のみになっているが、市場 1 が電力量に余剰が出来ると利益を得ようとして、再び放電をしている、という合理的な結論が導き出される。

#### 4.2.3 裁定価格幅による感度解析

前段のシミュレーションでは裁定価格幅を¥5/kWh としたが、この幅を変えることによりどのように送電エージェントの利益が変化するかを見るため、感度解析を行った。

まずは感度解析を行い、100 日の計算を行った場合の送電エージェントが得られる総利益の最大値を以下に示す。

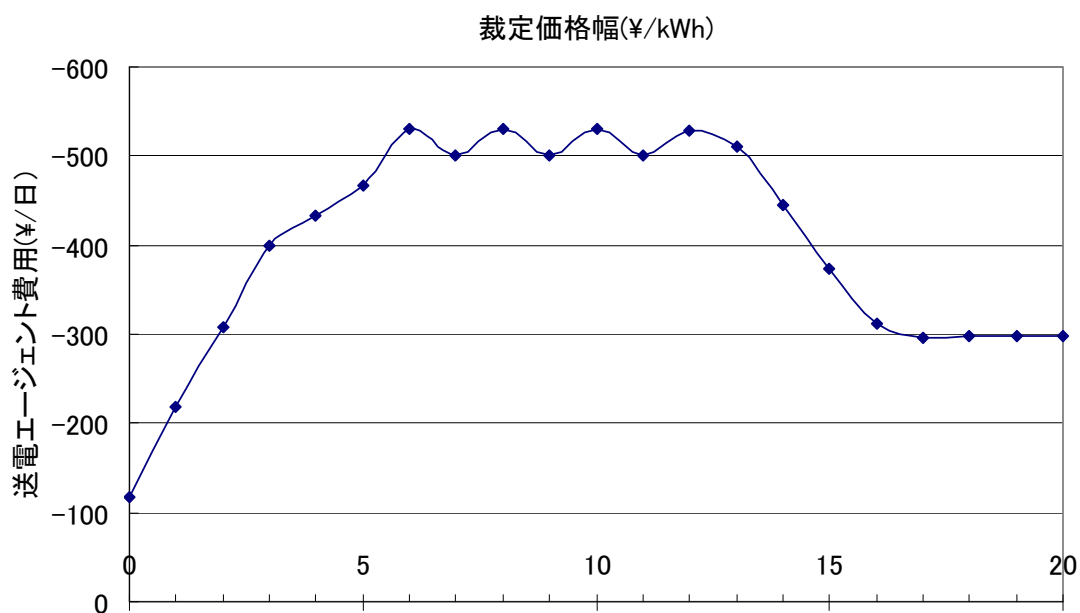


Fig.4-13 送電エージェント最大利益

裁定価格幅が小さいと裁定を行う電力量は多くなるが、その電力の単位あたり売却益が小さくなることから結果エージェントの利益は小さくなる。一方裁定価格を大きくしすぎても裁定を行う電力量が少なくなり利益が低減する。なお、奇数の裁定幅と偶数の裁定幅によって利益が変動しているのは裁定価格幅を取るときに裁定価格差が偶数か奇数か否かで価格算出方法が相違することによるものである。

一方、日数による利益の変化を以下に示す。なお ARB は裁定価格幅(¥/kWh) である。



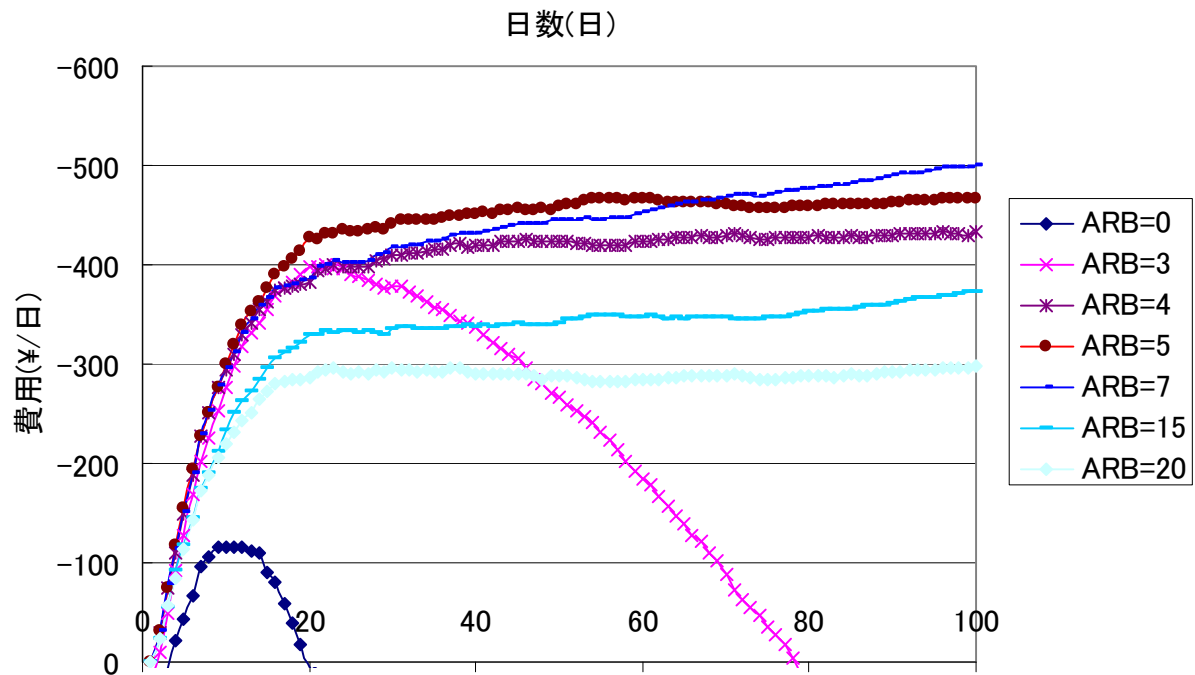


Fig.4-14 送電エージェントの利益変化

シミュレーションにおける市場の収束が進んでいくと、裁定価格幅が小さい場合市場参加者エージェントの学習により送電エージェントの裁定により落札した電力の売れ残り量が増大するため、その結果送電エージェントの利益が失われ赤字に陥る。一方ある程度の価格幅を持つと、その売れ残りリスクが小さくなるため、収益が安定する。

これらの結果により、裁定を行う送電エージェントを入れることにより価格調整が可能であるとともに、市場参加者エージェント全体の総費用を抑え、更に送電線エージェントが利益を出せる事が確認された。

## 4.2 2市場間における送電エージェント競合ケース

前段では裁定を行う送電線エージェントが一人いる場合についてシミュレーションを行った。しかしながら更に市場を増やした場合の連系や送電線の容量の問題、市場間の系統保護、更には送電事業への新規参入の可能性を考えると市場間に複数の送電線エージェントが競合することも考える必要がある。

そこでここではこの送電線エージェントの競合についてシミュレーションを行う。

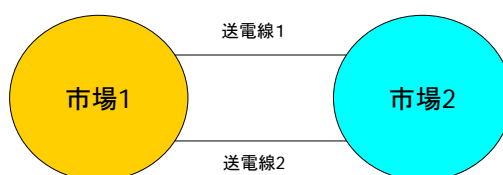


Fig.4-15 2市場間送電エージェントの競合例（2エージェント競合ケース）

以下に送電線エージェント2人が競合した場合の結果を示す。

まず、各市場の市場参加者エージェント全員の運用費用総和は以下の通りになった。また100日目における総費用の内訳はFig.4-17の通りである。

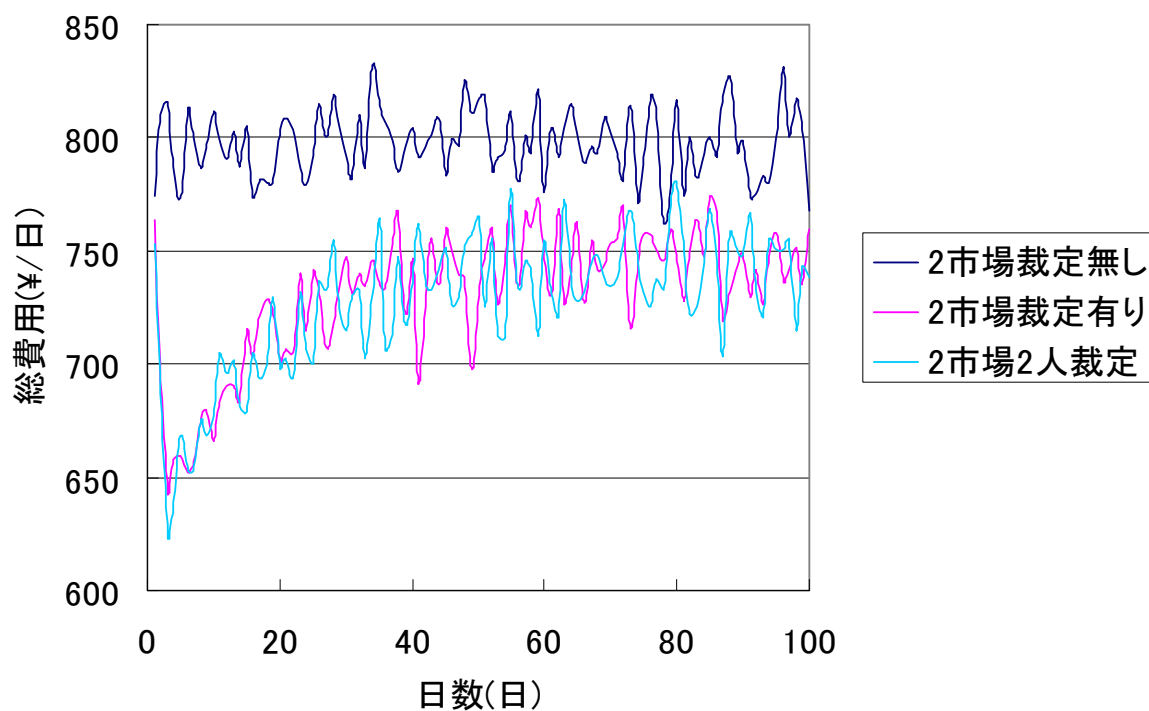


Fig.4-16 全市場参加者エージェント費用総和

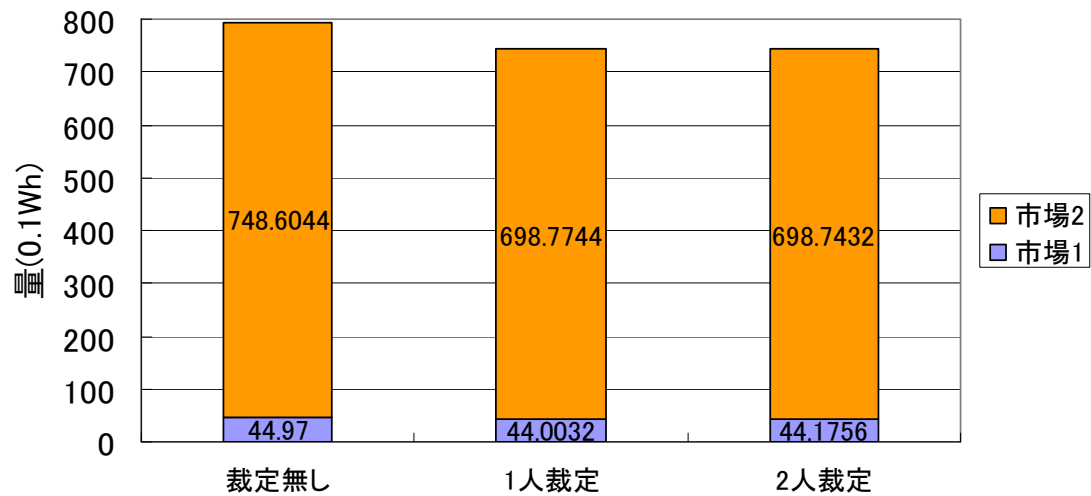


Fig.4-17 全市場参加者エージェント費用内訳 (100 日目)

これにより裁定を行う送電エージェントが増えても裁定による全市場参加者エージェント費用の総和は変動せず、結果として市場参加者エージェント側への効用はあまりないといえる。一方 2 人の各送電エージェントの利益は以下の通りになる。

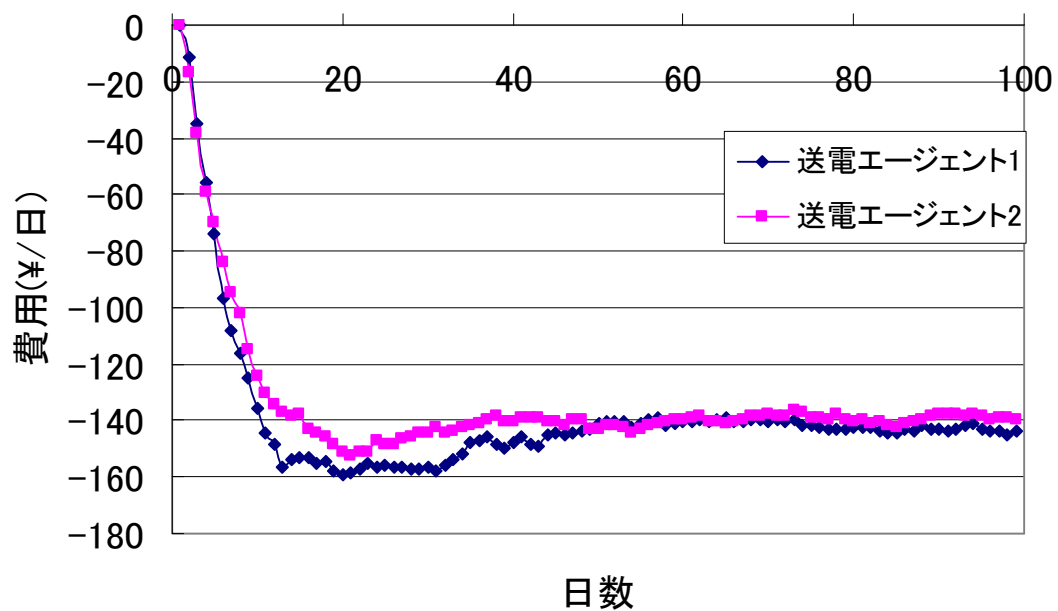


Fig.4-18 送電エージェント 2 人競合ケースにおける各エージェントの利益

送電線エージェントの利益は裁定者が一人のときと比較して半分以下になっている。次に裁定者を 3 人にした時の各送電エージェントは以下の通りになった。

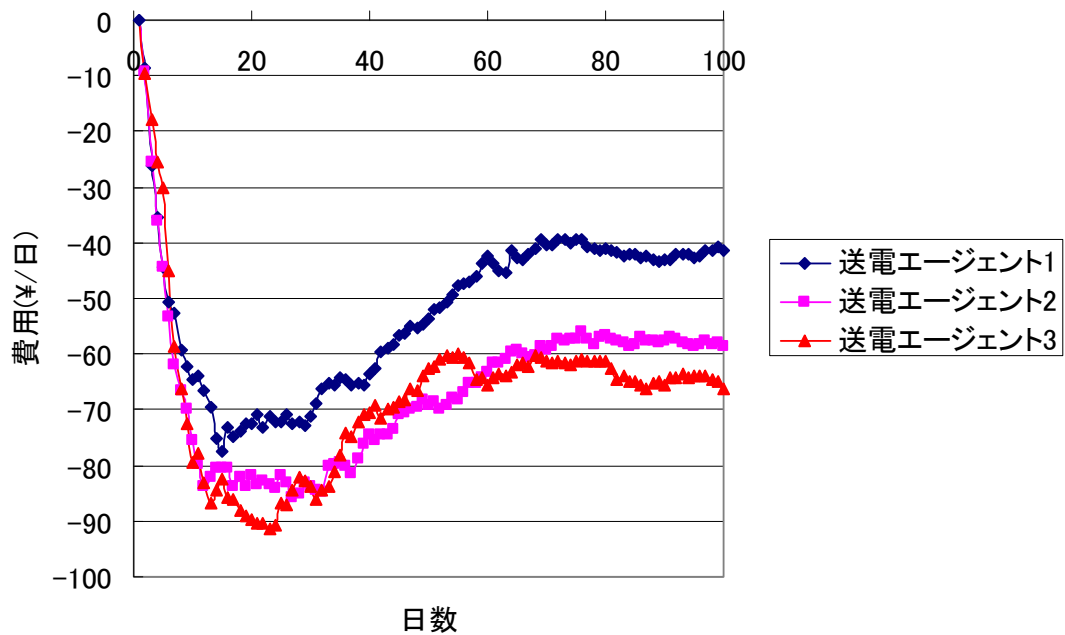


Fig.4-19 送電エージェント 3 人競合ケースにおける各エージェントの利益

この場合も送電エージェントが一人の時に比べて利益が小さくなっている事が分かる。  
そこで各々の場合における各エージェントの費用合計を以下に示す。

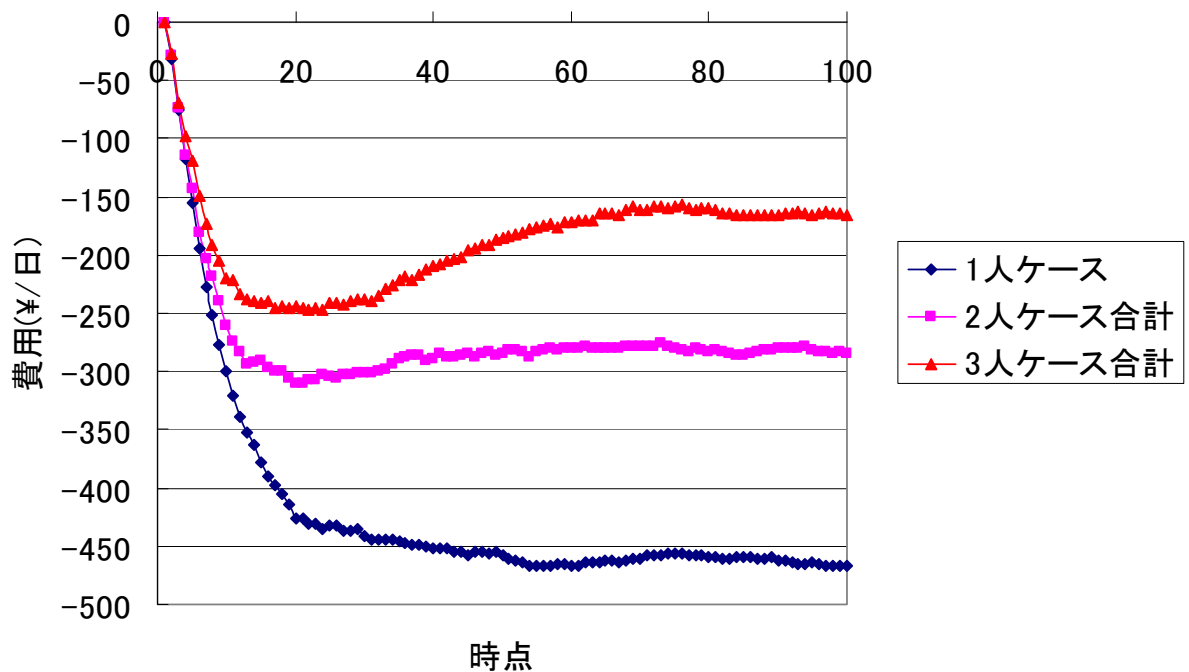


Fig.4-20 送電エージェント競合ケースにおける送電エージェント利益合計推移

この結果から裁定を行う送電エージェントが競合すると裁定機会を奪い合って裁定機会が減るので、少ないエージェントのケースと同様の価格では裁定に必要な電力量を調達できなくなり、その結果送電エージェントの利益は急激に減ることとなることを示している。

#### 4.4 3 市場及び 4 市場間裁定取引シミュレーション結果

前段までは 2 市場についての連系について検討したが次は 3 市場および 4 市場で連系した場合のシミュレーション結果を示す。3 市場は以下のような形で連系した。一方 4 市場については Fig.4-22(a)のようにドーナツ状に連系したものと、Fig.4-22(b)のように更に対角線状に 2 本連系したものと 2 パターンを考える。

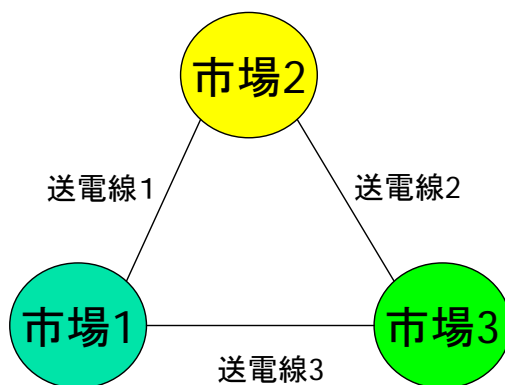


Fig.4-21 3 市場連系モデル

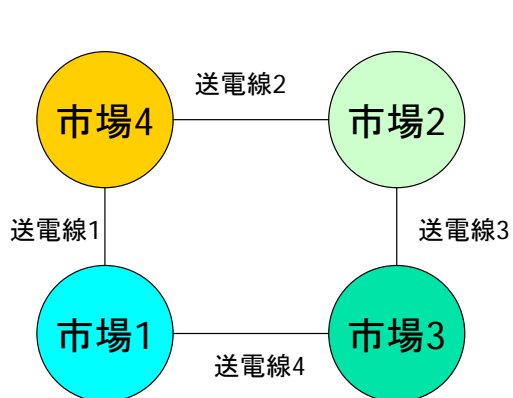


Fig.4-22(a) 4 市場連系モデル(連系 I)

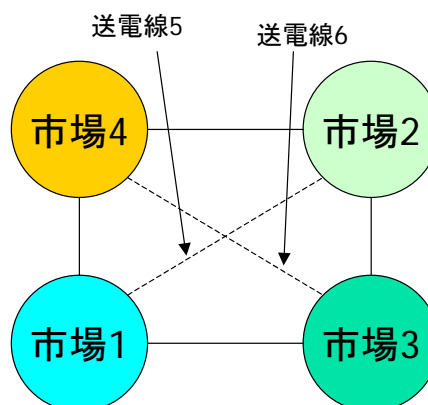


Fig.4-22(b) 4 市場連系モデル(連系 II)

なお、市場 3、4 の市場参加者エージェントは 4 人で、発電及び電力需要データは以下のデータを用いた。

Table.4-2 市場 1・市場 2 の各市場参加者エージェントの所持発電設備容量

市場3(kW)		市場4(kW)	
agent1	各時点の4人の需要平均	agent1	1
agent2	0.12	agent2	0.8
agent3	0.18	agent3	0.6
agent4	0.24	agent4	0.3

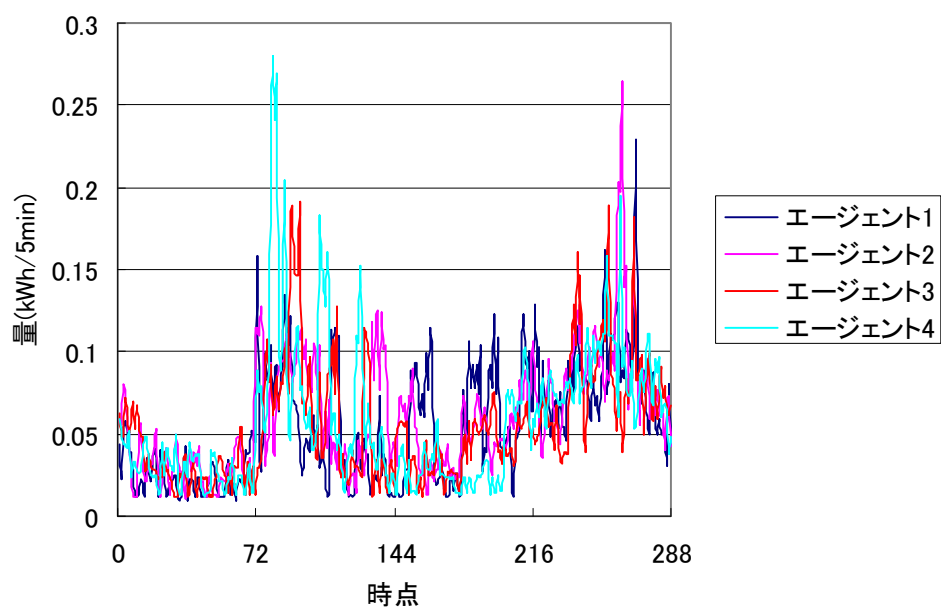


Fig.4-23(a) 市場 3 電力需要データ

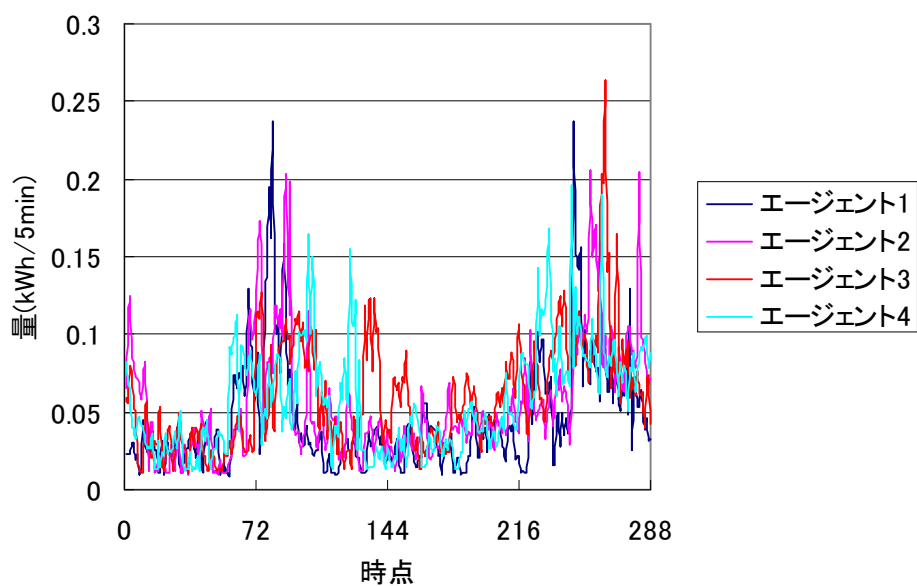


Fig.4-23(b) 市場 4 電力需要データ

なお、市場3・市場4を連系せずにシミュレーションを行うと総費用は以下のようになり、市場内での電力取引価格平均は

市場 3 > 市場 4 > 市場 1 > 市場 2

となる事が確認された。

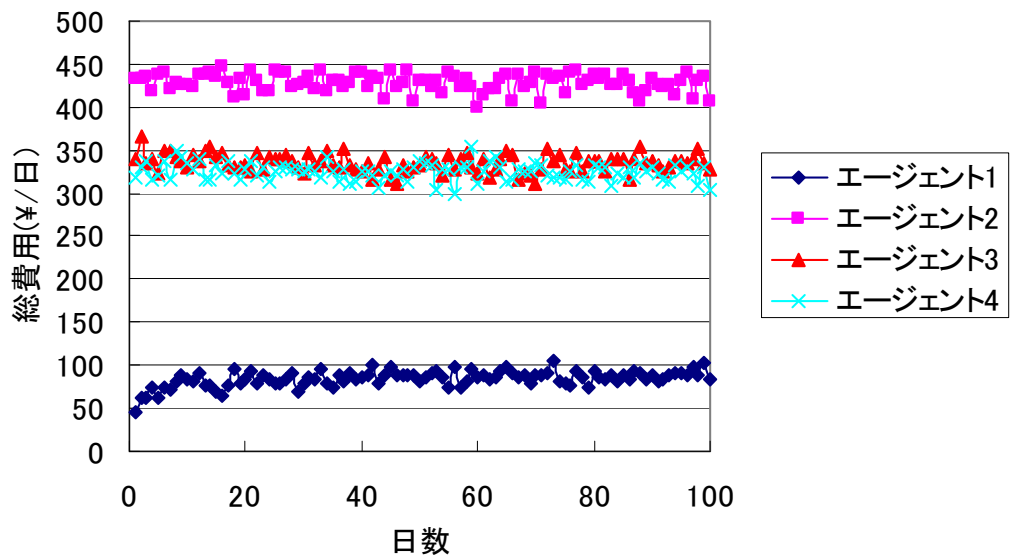


Fig.4-24(a) 市場 3 連系無し総費用

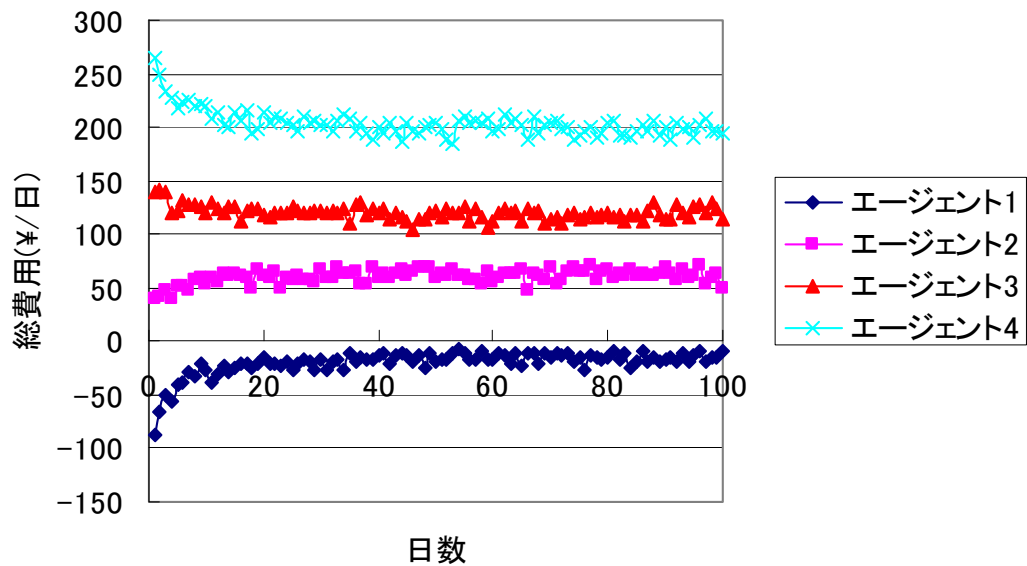


Fig.4-24(b) 市場 4 連系無し総費用

#### 4.2.1 3 市場連系下の電力取引シミュレーション結果

まず市場 3 について独立にシミュレーションを行った場合と連系した場合の市場参加者エージェント総費用合計を以下に示す。この結果により市場 3 に参加するが送電エージェントにより価格裁定を受け、市場価格が低下している事が確認された。また Fig.4-26 では市場参加者エージェントすべての総費用合計を示す。ここでも裁定の効果が確認できた。



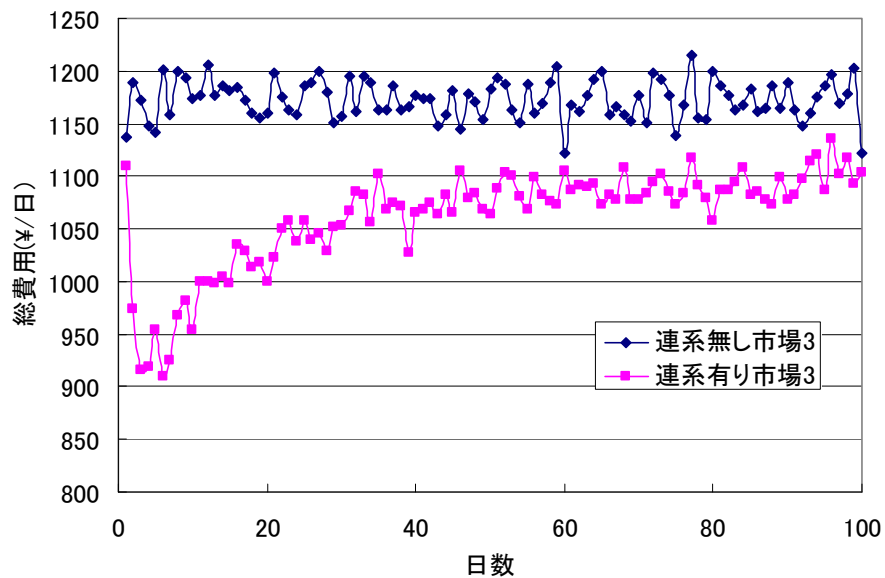


Fig.4-25 市場 3 市場参加者エージェント総費用合計

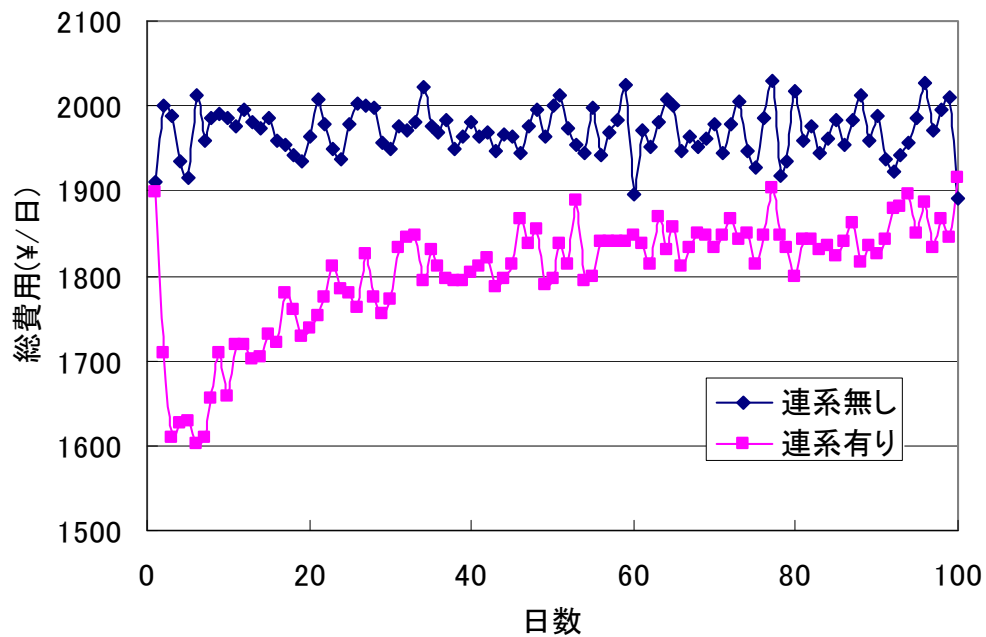


Fig.4-26 全市場参加者エージェント総費用合計

次に 3 市場の買い及び売り電力約定平均価格を示す。これにより市場 2 は市場 3 より市場 1 の影響を強く受け、結果として市場 1 との価格裁定によって平均価格が下落している事が確認できる。なお低価格の市場 1 は市場取引価格が上昇し高価格の市場 3 は下落する。

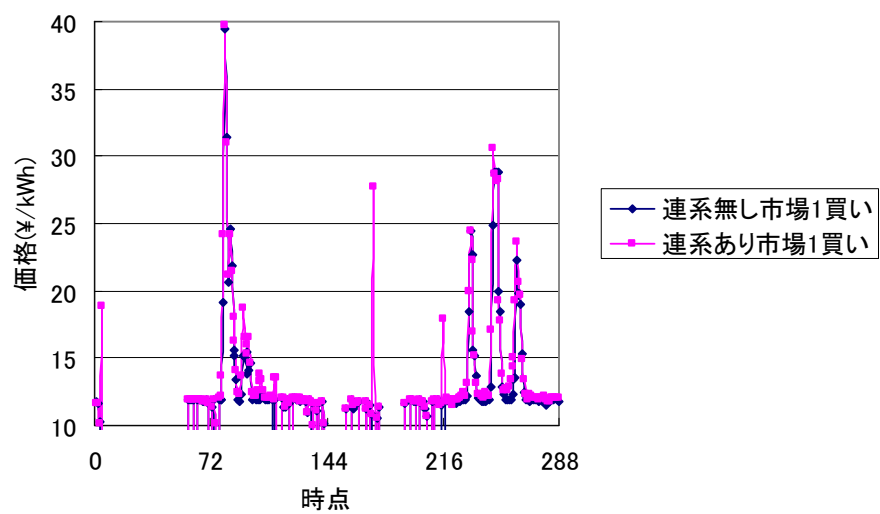


Fig.4-27 市場 1 買い平均約定価格

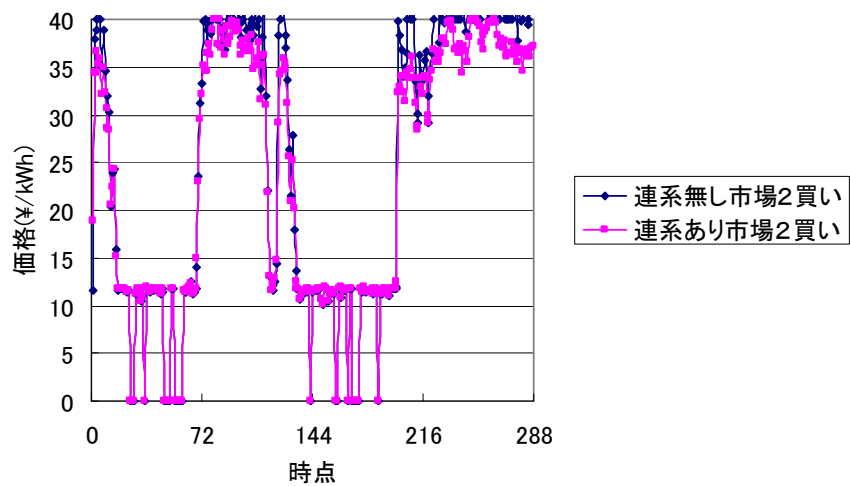


Fig.4-28 市場 2 買い平均約定価格

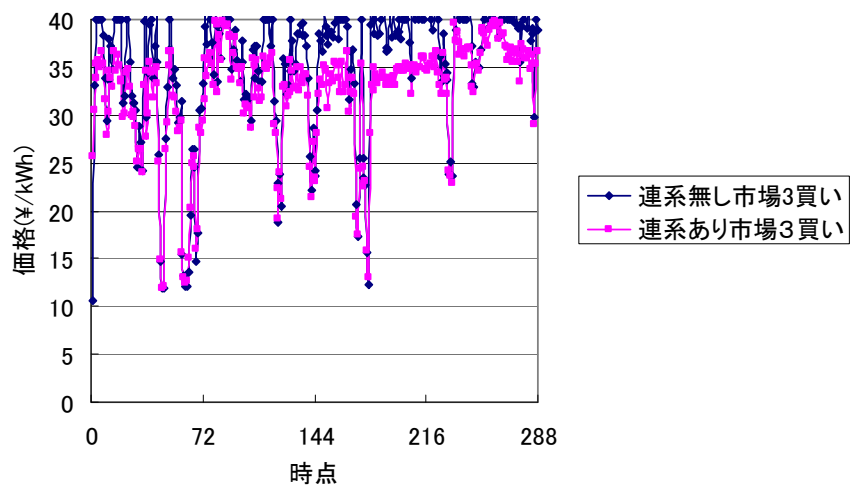


Fig.4-29 市場 3 買い平均約定価格

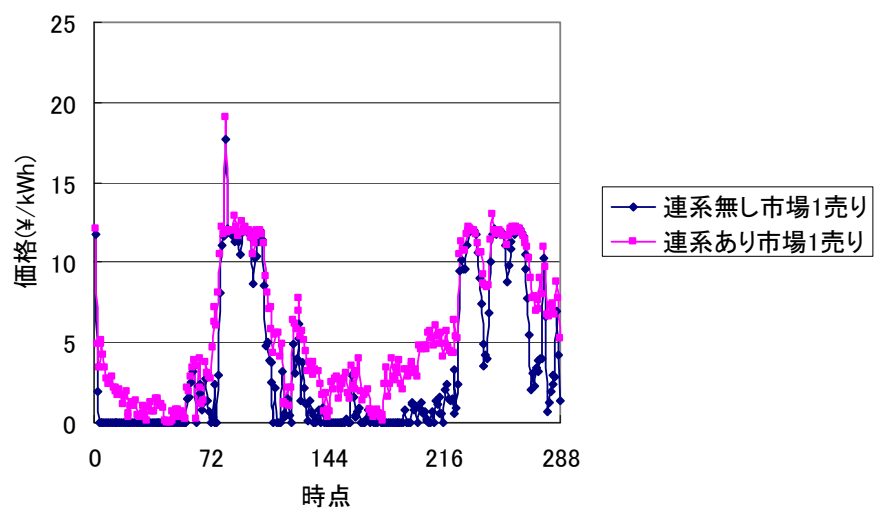


Fig.4-30 市場 1 売り平均約定価格

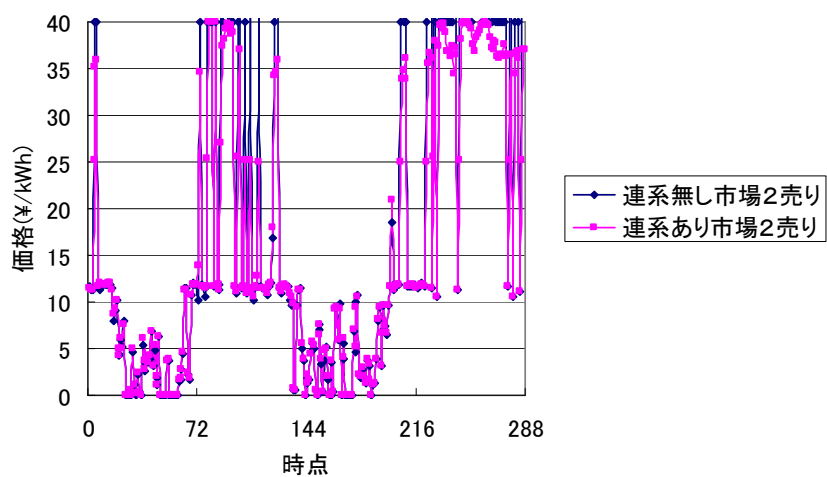


Fig.4-31 市場 2 売り平均約定価格

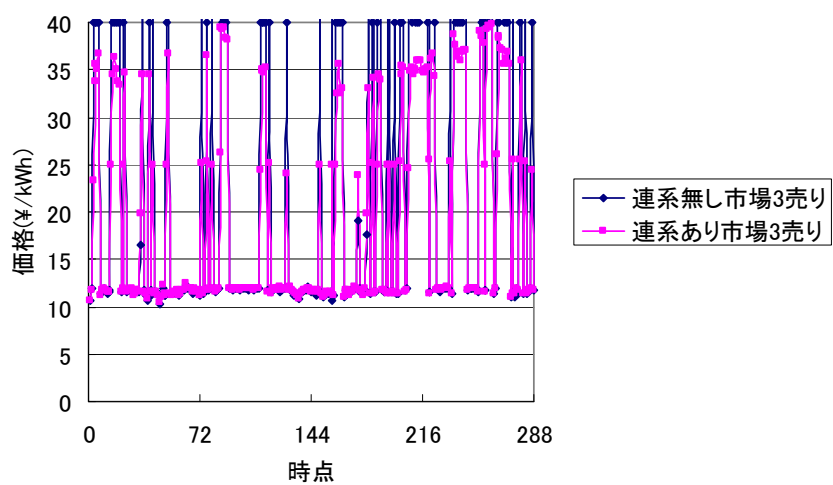


Fig.4-32 市場 3 売り平均約定価格

次に裁定エージェントの費用を以下の図で示す。

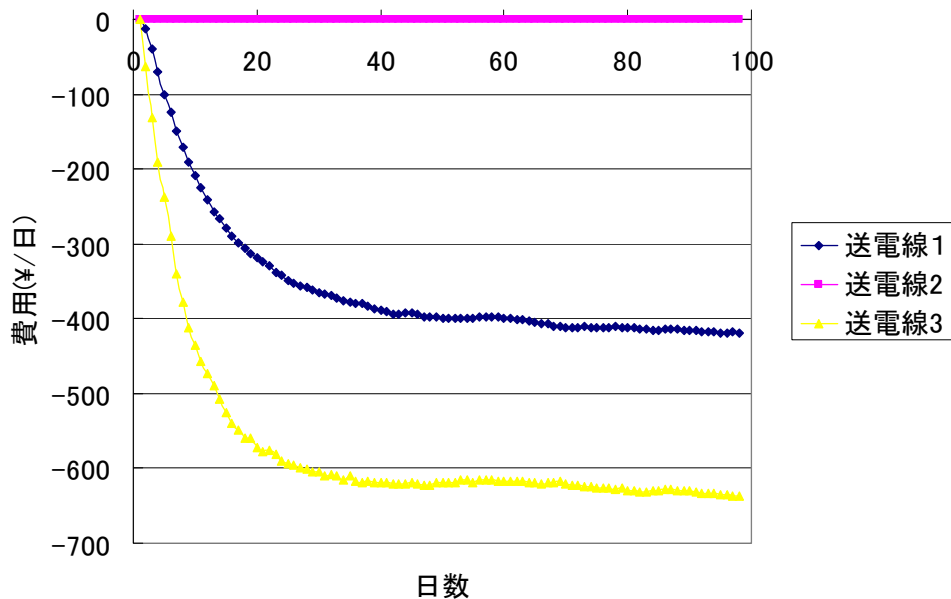


Fig.4-33 送電線エージェント費用

この結果では余剰電力のある市場 1 に結合している市場のみが利益をあげる事が出来、送電線 2 は淘汰され電力取引が行われない事が確認できる。また利益は不足電力が多くかつ市場価格の高い市場 3 に接続している送電線 3の方が送電線 1 より多い事が分かる。これは市場 3 の方により売り注文量多く存在するために、送電エージェントの売り注文と約定しやすいためである。

#### 4.2.2 4 市場連系下の電力取引シミュレーション結果

4 市場モデルにおいては上述の連系Ⅰと連系Ⅱの場合でシミュレーションを行った。この二つのパターンにおいても裁定により市場間の価格差が 3 市場シミュレーションの場合と同様に市場平均価格の安い市場において約定価格が上昇し、市場平均価格の高い市場の約定価格が下落した。そこで本段ではこの二つの連系方式の違いを考察する。まずは全市場参加者エージェント総費用合計を示す。

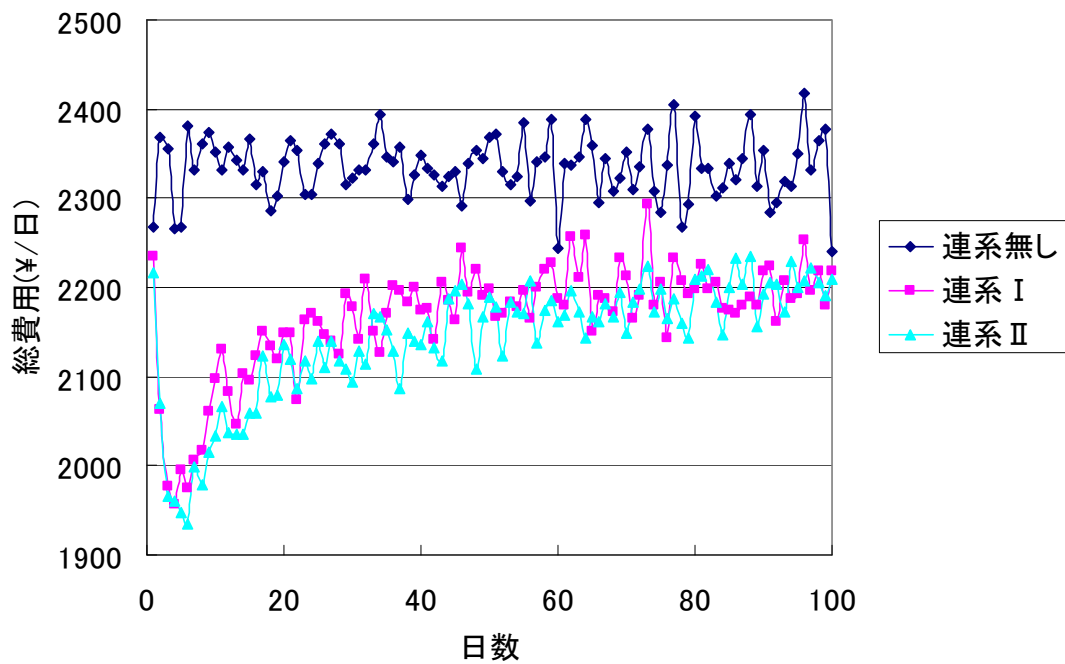


Fig.4-34 全市場参加者エージェント総費用合計

この結果ではわずかながら、連系 I より連系 II の方が裁定が多く行われている事が分かる。これは連系 II には送電線 5 及び 6 が存在し、裁定機会が多くなっているためである。また、各送電エージェントが得る利益は連系 I 及び II、両者の合計でそれぞれ以下の通りになる。

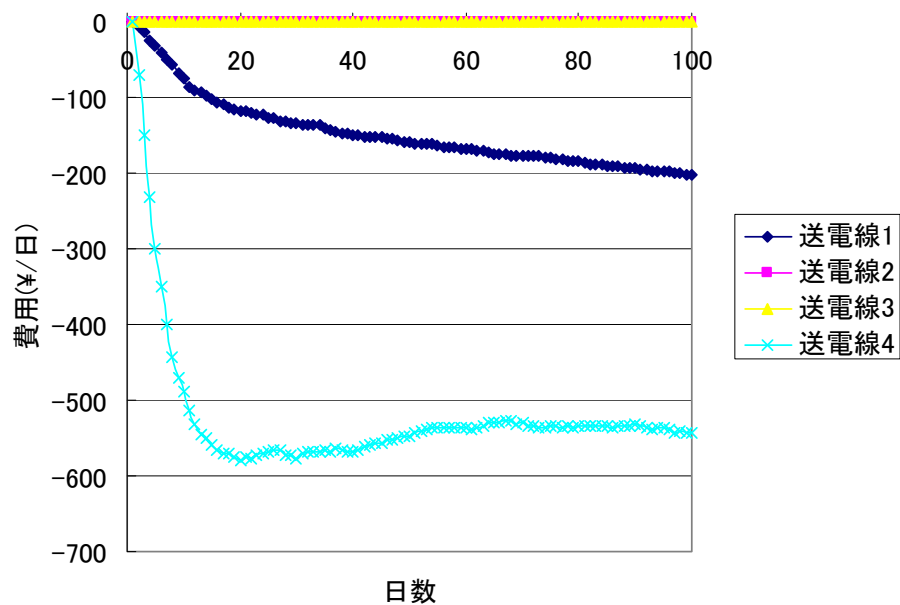


Fig.4-35 送電エージェント総費用（連系 I）

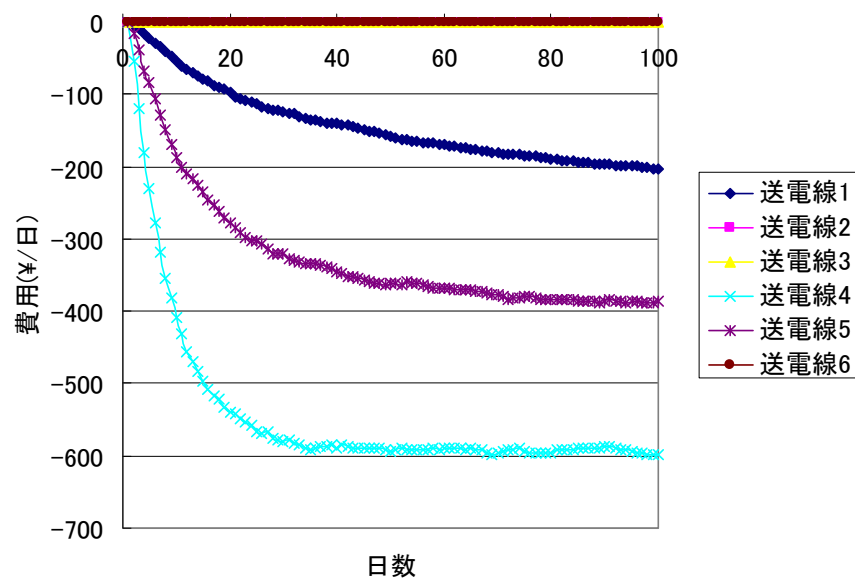


Fig.4-36 送電エージェント総費用（連系Ⅱ）

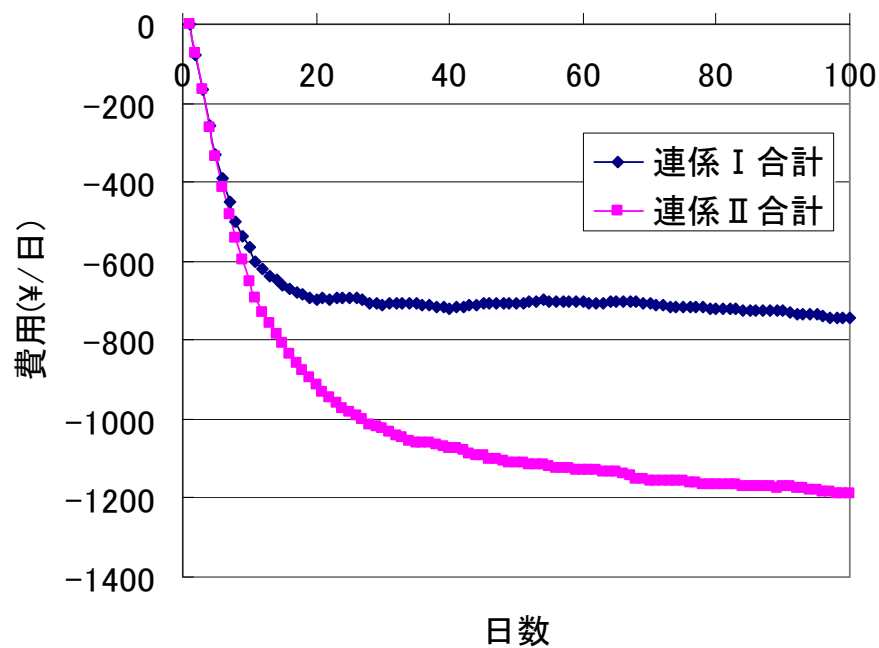


Fig.4-37 全送電エージェント総費用合計

この Fig.4-37 から、本段の連系Ⅱにおいては前章で述べた送電線の競合の効果よりも、裁定機会の増大の寄与が大きく、送電エージェントの合計利益は連系Ⅰよりも大きくなるということが示されている。なお各送電エージェントについては、市場価格差の大きい接

続を持ったエージェントがより多くの利益を上げられ、取引の少ない送電エージェントは利益を出せず淘汰されるという前段と同様の結論が確認できた。

## 第5章 結論

### 5.1 本研究により得られる知見及び成果

本研究においては分散電源が普及した将来に向けて、各家庭が間欠的かつ自律的に分散電源を運用するためのシステムの運用法を、情報通信によるパケットの考え方と証券取引市場のような分散非同期型のシステムを用いて検討した。そしてその結果次のような結果を得る事が出来た。

- ・ 本研究における電力融通方法においては適切な価格形成を行う事が出来、この事が実時間料金制を採用することを可能にする
- ・ 本研究で提案した系統構成法は価格裁定を行うことで市場間の価格差を是正できるだけではなく、送電線管理者も利益を上げる事が出来、その結果送電網維持問題を回避し、送電網の発達を促す事を可能にする有効なものである
- ・ 裁定価格幅と電力貯蔵装置の有無が送電エージェントの利益を大きく変動させる要因となる
- ・ 裁定を行う送電エージェントが過剰に市場参入を行うとその利益は急激に低減する

特にこのようなシステムが実時間料金制の採用の可能性が示せ、かつ送電網の維持を図るのに有望な概念である事を示せたのが本研究の成果である。



## 5.2 今後の課題

本研究においては従来にはない新しい電力システムのあり方を提示したが、このシステムを実際に運用するためにはいくつかの課題がある。

- ・ 現段階ではまだ既存電力設備が十分存在しているために、このようなシステムを現時点で構築するのは事実上不可能である
- ・ この研究に用いた電力取引を行うためには分散電源の普及が前提である。そしてそれと同時に一時的に利用する電力貯蔵装置・間欠的な電力融通を行うための高速かつ高効率なスイッチング素子の開発が行われる事が必要である
- ・ 本研究において電力は自動入札とし、その入札の方法は正規分布を用いたものを用いたが、この入札方法には検討の余地が多くある
- ・ 本研究においては電力貯蔵装置を時点間の裁定を行うために利用していないが、実際はそのような利用も考えられるので更なる検討が必要である
- ・ 本研究は主に需要者のそばでの電源ネットワークを考えたが、送電設備や電力貯蔵装置の大きさを変える事で、配電設備や基幹システムにまで概念を発展させて考える事が出来るようになると思われるが、その検討がなされていない

今後これらの課題の解決が望まれる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり私は多くのご指導・ご協力を頂来ました。皆様に深くお礼申し上げます。

ご多忙の中研究室打ち合わせ等において研究内容に対して適宜ご指導を頂くとともに、私の大学院における生活にも気を配っていただいた山地憲治教授に深く感謝申し上げます。

藤井康正助教授には指導教官として、研究の方針等を決定するところから、研究を進捗していくすべての過程において、頻繁に打ち合わせ等を行ってもらうにとどまらず、研究に行き詰っていた場面などに私にとって大変参考になるご助言をして下さいました。この場をお借りして深く感謝申し上げます。

山本博巳客員教授及び電力中央研究所西尾健一郎研究員には研究を行ううえで多大なるご助言を賜る事が出来ました。深く感謝いたします。

林武人助手には計算機環境の整備をはじめとして、学生生活のアドバイスを賜ることもしばしばで、私の学生生活をサポートしていただきました。竹下貴之助手には研究について様々なアドバイスをしていただいただけではなく、学生生活を様々な面でサポートしていただき、更には研究室の運営を行っていく上で貴重なアドバイスを賜る事が出来ました。深く感謝申し上げます。

松方恵美さん、岩本留美子さんの秘書のご二方には私の学生生活を事務の面からサポートしていただきました。深く感謝いたします。

既に就職され研究室を離れてしまっている岡村知暁さん、北浦孝啓さん、篠原剛さん、稲垣憲治さん、室園晃徳さんには研究室の先輩として、人生の先輩として様々な面でアドバイスを頂きました。この場をお借りして感謝申し上げます。

同輩の渡邊裕美子さん、丹羽弘善君、戸張智貴君には一緒に修士課程での学生生活を送りながら研究について、そして人生について様々なことについてアドバイスを頂くとともに、共に楽しい日々を過ごせました。心より感謝申し上げます。

研究室の後輩にあたる修士課程の都留大和君、大平晃三君、横山直規君、永富悠君、両澤光一君、学部生の高崎勝之助君、松屋賢一君、江原貴志君、尾山昌太郎君、奈良雅文君、甲斐寛君には様々な面でお世話になりました。深く感謝申し上げます。

最後に私の長かった学生生活をあらゆる面からサポートしてくれた両親、家族、恋人、友人をはじめ、私の人生に関わったすべての方に深く感謝し、謝辞を結びます。

2006年2月

篠原雄一郎

## 参考文献

- [1] 山地憲治編著：“分散エネルギーシステム”、エネルギー・資源学会、2004
- [2] 電力中央研究所編：“電力中央研究所研究年報 2001”
- [3] Murray W. Davis：“Distributed Resource Electric Power Systems Offer Significant Advantages Over Central Station generation and T&D Power Systems Part I”、IEEE 2002 Power Engineering Society Summer Meeting、2002
- [4] Murray W. Davis：“Distributed Resource Electric Power Systems Offer Significant Advantages Over Central Station generation and T&D Power Systems Part II”、IEEE 2002 Power Engineering Society Winter Meeting、2002
- [5] Y.Zoka,N.Yorino,K.Kawahara,C.C.Liu：“An Interaction Problem of Distributed Generators Installed in a Micro Grid”、IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies、April.2004
- [6] 室園晃徳：“住宅における需要の不確実性を考慮したコージェネレーションシステムの最適運用戦略の検討”、東京大学大学院新領域創生科学研究科先端エネルギー工学専攻修士論文、2005

## 発表文献

- [1] 「基幹系統と配電系統の統合モデルを用いた分散電源の導入可能性評価」  
平成 16 年電気学会 B 部門 電力・エネルギー部門大会(2004 年 8 月)
- [2] 「自律分散型電源ネットワーク構築に関する検討」  
平成 18 年電気学会全国大会(2006 年 3 月予定)