

東京大学大学院工学系研究科  
電気系工学専攻

平成 21 年度

修士論文

パケット電力取引に基づく革新的配電システムの提案

2010 年 2 月 9 日提出  
指導教員 藤井 康正 教授

086464 井上 淳

## 目次

第1章 序章.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 太陽光発電の導入拡大.....	3
1.1.2 電気事業の自由化.....	4
1.1.3 分散電源普及時の課題.....	8
1.1.4 蓄電池.....	8
1.1.5 スマートグリッド.....	9
1.2 本研究の目的.....	11
第2章 分散市場型電力流通システム.....	12
2.1 分散型市場.....	12
2.1.1 分散型市場とは.....	12
2.1.2 東京穀物商品取引所における商品売買方法について.....	14
2.1.3 本研究における電力売買方法について.....	16
2.1.4 分散型市場の利点.....	17
2.2 系統全体の概要.....	18
2.2.1 既存の電力系統と分散市場型電力流通システム.....	18
2.2.2 送電方式.....	22
2.2.3 各設備の特徴.....	25
2.3 配電回路の概念設計.....	26
2.3.1 基本構成回路.....	26
2.3.2 全体の構成.....	27
2.3.3 各素子の値の決定.....	28
2.3.4 回路シミュレーション.....	30
2.3.5 損失について.....	31
2.3.6 三相交流との変換.....	33

2.4 プロトコル.....	34
2.5 電力系統の階層化.....	35
第3章 市場のモデル化.....	36
3.1 市場参加者の行動決定手法.....	36
3.1.1 確率動的計画法.....	36
3.1.2 定式化.....	37
3.1.3 EM アルゴリズム .....	41
3.1.4 市場参加者の行動決定手順.....	45
3.2 一般電気事業者.....	47
3.3 市場間送電事業者.....	48
3.4 RDBMS の利用 .....	50
3.4.1 リレーショナルデータベース.....	50
3.4.1 市場のモデル化.....	51
第4章 電力取引シミュレーションによる提案方式の評価.....	52
4.1 諸条件.....	52
4.1.1 市場及び市場参加者の特性.....	52
4.1.2 需要.....	53
4.1.3 発電量.....	53
4.1.4 一般電気事業者.....	54
4.1.5 市場間送電事業者.....	54
4.2 各エージェントの行動の傾向.....	55
4.2.1 約定価格.....	56
4.2.2 PV 家庭 .....	58
4.2.3 FC 家庭 .....	59
4.2.4 ベース家庭.....	60

4.2.5 事務所.....	61
4.2.6 入札.....	62
4.2.7 遷移確率表の学習.....	64
4.3 一般電気事業者の参加形態の異なる市場.....	69
4.4 事故時の挙動.....	79
4.3.1 配電線の断絶.....	79
4.3.2 配電線の断絶（市況が異なる市場が存在するとき）.....	81
4.4 単一市場と分散市場の相違について.....	84
4.5 一般電気事業者による需給制御.....	88
4.5.1 負荷制御.....	88
4.5.2 逆潮流制御.....	91
第5章 結論.....	93
5.1 本研究の成果.....	93
5.2 今後の課題.....	94
謝辞.....	95
参考文献.....	96
発表実績.....	97

# 第 1 章 序章

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 太陽光発電の導入拡大

#### 太陽光発電の普及

日本では「世界全体の温室効果ガス排出量を現状に比して 2050 年までに半減する」という長期目標を提案し、世界に誇れる低炭素社会を目指している。日本としても 2050 年までの長期目標として、現状の 60～80%の削減を目標としており、このための重要な取り組みが新エネルギーの技術革新や普及促進である。

その中でも太陽光発電については「低炭素社会づくり行動計画<sup>[1]</sup>」(2008 年 7 月閣議決定)において「再生可能エネルギーの中でも特に潜在的な利用可能量が多く、エネルギー自給率の低い我が国の国産エネルギーとして重要な位置づけを占める可能性がある」とされ、導入拡大には高い期待が寄せられている。さらにその中で太陽光発電について、「導入量を 2020 年に 20 倍、2030 年には 40 倍にする」と高い導入目標が課されているとともに、「3～5 年後に太陽光発電システムの価格を現在の半額程度にすることを目指す」と高いコスト低減目標が課されている。

このように太陽光発電の導入拡大が進められる意義としては、低炭素社会の形成の観点の他にも、経済政策や産業政策の観点からも見出すことができる。太陽光発電は関連産業の裾野も広く、雇用創出の効果も大きいと見込まれており、中長期的な視点からも我が国の経済・産業が直面しているグローバルな競争環境のもと、我が国の太陽電池が産業としての強みを発揮し、世界を牽引していくことで将来のわが国の産業の中核を担うものとしての期待も高い。さらに個人にとっては、他の新エネルギーと比べて自ら導入に取り組むことが比較的可能な電源であり、地球温暖化対策という課題に対して一人一人が自らの意思で参画しうる電源として捉えることができる。

このような考え方から、太陽光発電の量産効果による市場拡大、コストダウンを達成するために新たな施策として 2009 年 11 月 1 日「太陽光発電の新たな買取制度」が実施された。

#### 太陽光発電の新たな買取制度<sup>[2]</sup>

表 1-1 に太陽光発電の新たな買取制度における買取単価を示す。この制度は太陽光発電によって発電した電力のうち、自家消費せずに余った電力を電力会社が買い取り、その買取コストを全ての需要家で負担するという制度である。現在の買取単価は表 1-1 のようになり、買取期間は 10 年とされているが、買取単価に関しては年度ごとに低減されていく方向で見直されることになっている。そして買取コストの負担については、電力の需要家全てが負担する国民の「全員参加型」であり、その負担となる太陽光発電促進付加金（太陽光サーチャージ）は一カ月あたり数十円から百円未満を水準とする。負担額の決定手法としては前年 1 月から 12 月までの買取導入量を元に計算され、2010 年 4 月から負担が始まるが、2010 年度の負担額は 1 銭未満であることが確認されている。

表 1-1 太陽光発電の新たな買取制度における買取単価

		住宅用		非住宅用	
		太陽光発電 単独	その他発電設備 を併設	太陽光発電 単独	その他発電設備 を併設
設備容量	10kW未満	48	39	24	20
	10kW以上	24	20		

[円/kWh] (税込)

### これまでの取り組み

我が国の新エネルギー導入拡大に対するこれまでの取り組みとしては

- ① 新エネルギー電源間の競争を促進するという観点から、ポートフォリオとしての新エネルギーの導入を電気事業者に義務づけた（RPS 法）。
- ② ランニング段階よりもイニシャル段階の負担を軽減するとの観点からの補助制度や税制支援措置を国が用意することによって、また地方自治体の独自の補助制度とも相まって新エネルギーの需要拡大を図った。
- ③ 太陽光発電などの余剰電力について一般電気事業者が自主的な買取りを実施する「余剰電力買取メニュー」やグリーン電力証書・グリーン電力基金などの関係者の取り組みの努力によって新エネルギー導入拡大を図った。

といったものがある。このように単に規制措置だけではなく、財政措置・自主的取り組みを適切に組み合わせしていく方法によって導入促進を行ってきた。

IEA（国際エネルギー機関）の視点としては太陽光発電については風力発電やバイオマス焼却等とは異なり、「非常に安定的な低リスクインセンティブ<sup>[3]</sup>」が必要とされていると位置づけている。各国とも、その実情に合った実効性の高い制度に改善していく方向にあり、我が国では RPS 法制度と導入支援補助金制度を中心とした施策を維持することを基本として、太陽光発電に「非常に安定的な低リスクインセンティブ」を付与するために、新たな制度でこれまでの施策を補完し、総合的な取り組みを集中的に実施していくことが必要であるという考えのもと、「太陽光発電の新たな買取制度」が設計、実施された。

### 1.1.2 電気事業の自由化

#### 電力自由化とは

日本の電力会社は株式会社であるが、世界の国々の多くは 1990 年代に入るまで国家機関や地方政府が電気事業を行っていた。株式会社形態をとっていたのは米国、日本、ドイツの一部ぐらいであった。しかしながら、日本の電力会社が普通の株式会社と違うのは、本来政府が果たすべき国民への責務を代行するため、公益事業特権が与えられてきたことである。電気事業が規制産業であった理由として、

1. 普通の企業ではとても出来ないような巨額の設備投資が事業の性質上求められる。それを可能にするために、総括原価方式を取り入れ、必要な費用を全て消費者に転嫁し、適正利潤を上乗せさせることで、安心して事業展開ができる環境が構築されている。
2. 電気事業の最大の特徴である送配電設備は、複数の会社が争って作りあうよりも、地域独占とするほうが断然効率がいい
3. 独占供給となる以上、政府が業務規制を行い、独占の弊害を出さないよう努めている。

といったことがあげられ、これらを既定したのが電気事業法で、この制度のお陰で戦後の復興、そして高度成長期の間を通じて日本国民は電気に困ることなく、経済発展に邁進することができた。

このように日本の発展に貢献してきた日本の電気事業制度も、制定から数十年もたつと制度疲労を起こし始めた。安定供給とユニバーサルサービスは世界随一のレベルを有するに至ったものの、“出来るだけ廉価な電気を国民に提供する”という肝心なことがおろそかになってしまい、先進国では一番高い電気となっていしまったのである。そこで、上記の規制を緩和し、民間の参入を促進させることで競争原理を働かせれば値段が下がるのではないかという議論が起こった。さらに、発電技術の進歩により比較的中小規模の電源でも比較的安価に発電できるようになったということ、そしてコージェネレーションシステムなどの総合効率のよい比較的中小規模の電源を需要地近接型の電源として活用する可能性が出てきたことなどから、発電部門でも新規参入の可能性が高まっている。そのような背景が合わさって日本の電気事業は自由化を行っていく流れが起こった。

#### 電気事業の自由化の変遷<sup>[4]</sup>

電気事業は自然独占性を有する事業として、他国と同様に日本でも図 1-1 に示すような送配電一貫経営の電気事業者が地域独占の下で安定供給の責任を担うといった体制が従来とられてきた。1990 年代に入り、経済の高コスト構造・内外価格差の是正を目的に電気事業改革が進められることになった。

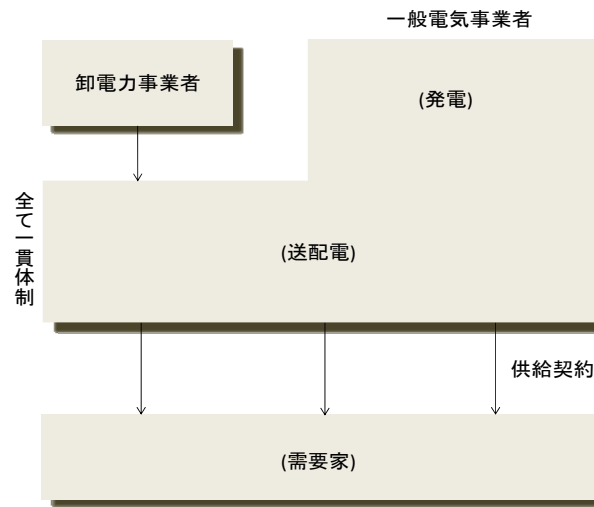


図 1-1 一貫体制（1994 年まで）

以下にこれまでの主な制度改革を述べる。

(1) 第 1 次制度改革（1995 年電気事業法改正）

1995 年の大きな制度改革は、「発電部門への新規参入の拡大」であった。改正電気事業法では、一般電気事業者に電気を供給することを目的とする卸電力事業者について、発電設備の出力の合計が一定規模（200 万 kW）を超えるものに限定していた。その一方で、その規模に達しないものは卸電気事業の許可が不要となり、電気事業としての諸規制を受けずに卸電力者として自由に発電市場に参入できるようになったのである。いわゆる IPP（Independent Power Producer）による発電事業への参入促進である。

また、コージェネレーションなど分散型電源の普及可能性の高まりとともに、限定された地点内需要に応じて責任を持って電気を供給する「特定電気事業」という新たな事業形態が創設された。これは当該地点で発電した電力を直接需要家に電力を供給する形態であり、現行の一般電気事業者のネットワークを補完するサブシステムとして位置づけられている。図 1-2 は、従来の電気事業運営体制に新たに IPP と特定電気事業者が組み込まれた新たな電気事業運営体制を示す。当時 IPP は画期的であったが、発電した電力は全て既存の電力会社が買い上げてしまうため、一般消費者からは具体的な値下げが見えるものではなかった。



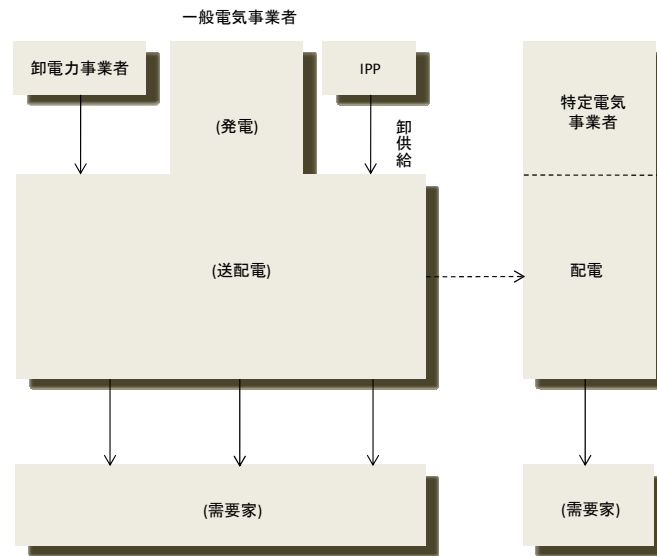


図 1-2 第一次電気事業制度改革

## (2) 第 2 次制度改革（1999 年電気事業法改正）

第 2 次制度改革では、電気事業の高コスト構造の是正に向けて、競争を活用した効率化を有効に実現させるという観点から制度改革の検討を行うことになった。以下の 4 点を軸に制度改革を行うことになった。

- ① 大口需要家（特定需要規模）を対象に小売供給の自由化を実施
- ② 小売自由化を支える託送制度（接続供給制度）を整備
- ③ 料金選択の多様化や料金引き下げの迅速化により、効率化の成果を非自由化対象需要家にも還元
- ④ 競争を有効に進めるために、独占禁止法とも整合性のとれた適正な電力取引のあり方を整理

具体的な制度改革は次の通りである。

### ①小売の自由化

小売の自由化として、供給電圧 2 万 V 以上（特別高圧受電）、契約電力 2000kW 以上の大口需要家を対象に実施された。これにより新規参入する小売事業者（PPS: Power Producer and Supplier）は、電力会社が提供する送電サービスを利用して電力小売を行うことができるようになった。

## ②託送制度

電力の小売自由化に際しては、電力会社が保有する送電ネットワークを新規参入者が利用するための公正・公平かつ透明なルールの整備が事業者間の有効かつ対等な競争の実現には不可欠である。わが国では安定供給に適した発送電一貫体制の下で新規参入者との競争を通じた効率化が可能ということから、第三者アクセスモデルが導入されることになった。具体的には、送電ネットワークの利用は「接続供給」として電気事業法上に位置づけられ、電力会社は料金その他の供給条件について託送約款の設定・届け出を行い、その上で電力会社と送電線利用者との間で託送契約を締結することになる。

### (3) 第3次制度改革（2003年電気事業法改正）

第2次制度改革では、小売部分自由化が導入されたわけだが、実際には部分自由化開始から1年あまりを経過した2001年11月から早速議論が開始されることになった。

具体的な制度改革の概要は以下の通りである。

- ① 小売自由化範囲の拡大
- ② 送配電部門の調整機能の確保
- ③ 全国規模の電力流通の拡大
- ④ 電源開発投資環境の整備
- ⑤ 系統利用ルールの再設定（同時同量制度の見直し）

①に関しては2004年に小売自由化の範囲が500kW以上に、2005年には50kW以上に引き下げられた。この後完全自由化を求める声も少なからずあったが、より進んだ自由化体制を選んだカリフォルニア州の電力崩壊や、エンロンの倒産を目の当たりにして、2007年に「全面自由化について検討を開始する」ということで先送りとなり、2007年には一定期間が経過した段階で再び自由化拡大の是非について検討を行うべき、とされている。

また、④に関して言及すると、全国規模の卸電力取引所を整備する議論され、2003年11月に任意参加型の民間の取引所として日本卸電力取引所（JEPX: Japan Electric Power Exchange）が発足し、2005年4月より市場が開設した。

それらを踏まえた現在の電気事業運営体制は、図1-3のようになっている。

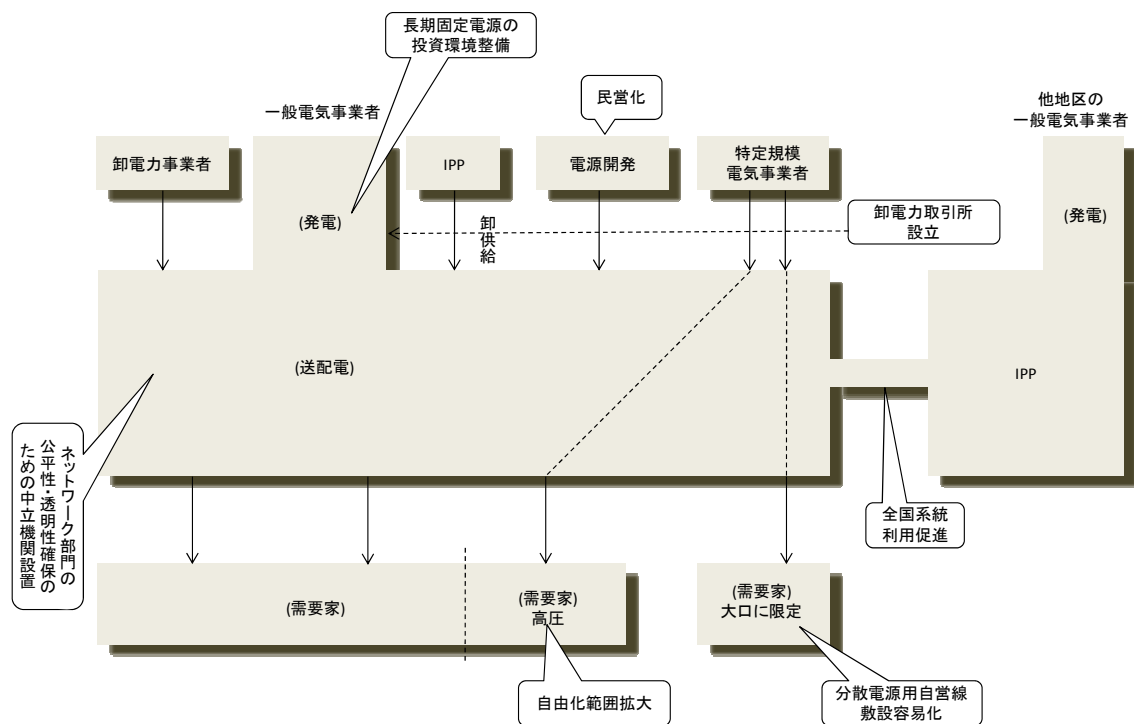


図 1-3 現体制

### 1.1.3 分散電源普及時の課題

上記のような電力自由化の流れの中で、分散型電源が一般家庭に普及したとして考えられる課題について考える。「低炭素社会づくり行動計画」において、2020 年までに、発電電力量に占める二酸化炭素を排出しない「ゼロ・エミッション電源」（再生可能エネルギー、原子力発電等）の割合を 50%以上とするという目標が掲げられている。現状において、我が国では太陽光発電の約 8 割が住宅用であることを考えてみても、この導入目標通りに進んだとすると、将来的には住宅の屋根など小規模な単位で導入が進み、小規模な発電所が無数に点在することになる。太陽光発電は天候や時間によってその発電量が左右されるため、配電網ごとに発電量や変動量がバラバラになる恐れがある。導入量が小さければその変動を吸収できるが、導入量が大きいと周波数変動を招き、停電や電力品質の低下などを引き起こしてしまう。

また、電力価格の観点から見ても、太陽光発電の特性を考えると地域ごとに電力の過不足が異なってくることが考えられる。地域ごとに過不足が異なってくると、その地域ごとに適正な電力価格も変わってくるはずである。

現在の日本卸電力取引所(Japan Electric Power Exchange : JEPX)では基本的に翌日受渡しのスポット市場と一定期間後受渡しの先渡し市場によって取引が行われている。スポット市場では 1 日に受渡しされる電気を 30 分毎 48 商品に区分され取引が行われており、時間帯ごとに取引価格は異なるが、地域ごとに価格が異なるという考え方はなく、全国统一価格での約定となっている。2009 年 9 月からは時間前取引という、スポット取引を「1 日前市場」と表現するならば「4 時間前市場」と表現されるような新たな取引が始まったが、これは買い入札時に入札の理由を選択しなければならないことから、不測の需給ミスマッチに対応するために用意されたものであり、適正な価格を形成する目的ではない。また、この時間前取引も全国统一約定価格となっている。

### 1.1.4 蓄電池

上で述べた太陽光発電の大量導入時の課題のうち、周波数変動の課題解決の有効策の一つが蓄電池の導入である。太陽光発電の出力を、蓄電池をバッファとして安定化させる。こうして発電側を最適制御することで電力品質の安定化を図ることができる。

日本では一般家庭などの需要側にまで立ち入って負荷を制御するという取り組みはあまり活発ではなく、蓄電池の導入が期待を集めている。その設置形態としては、配電用変電所ごとに設置し、需給バランスを最適化する方法が有力であるが、太陽光発電が小規模な建物単位で導入される場合、それぞれの建物に蓄電池を設置し、建物内でエネルギー最適化を図ることも可能である。

また、需要家側の利点として、発電量・負荷・価格といった将来の不確実性に対応できるといったものも挙げられる。

しかし蓄電池の導入にはそのコストが課題となってくる。表 1-2 にエネルギー分野で利用が考えられている蓄電池の現状での参考値を示す。

表 1-2 貯蔵装置の性能比較<sup>[5]</sup>

	鉛電池	NaS電池	ニッケル水素電池	リチウムイオン電池
エネルギー密度[Wh/kg]	35	110	60	120
エネルギー効率[%]	87	90	90	95
寿命（サイクル数）	4500	4500	2000	3500
現状のコスト	kW単価[万円]	15	24	10
	kWh単価[万円]	5	2.5	10

次世代電池技術開発においては、主たる開発目標はコスト低減とされており、自動車用のコスト目標としては 2015 年に現状の 7 分の 1、2030 年には現状の 40 分の 1 という目標が掲げられている。現状の電池をリチウムイオン電池の 20[万円/kWh]とすると、2015 年で約 3[万円/kWh]、2030 年で 0.5[万円/kWh]となる。

2008 年 8 月に経済産業省が発表した試算によると、太陽光発電を 2030 年までに約 53GW 分導入するという仮定に基づく、逆潮流させずに余剰電力を全て家庭に設置した蓄電池に貯めるとすると 3.5 億 kWh 分の蓄電池が必要になり、そのコストは最大 6.7 兆円かかるという結果になっている。また、逆潮流を許容し、電力系統側に設置した蓄電池を活用した場合は必要な蓄電池容量 2.3 億 kWh、コストは約 4.7 兆円に減るとなっている。

### 1.1.5 スマートグリッド

1.1.3 で述べた課題を解決する有効な策の一つが蓄電池の導入であることは述べたが、それとともに有効策と考えられているのがセンサ制御の活用である。需要側の負荷をネットワーク接続したセンサで監視・制御し、一方で風力発電や太陽光発電の出力を、蓄電池をバッファとして安定化させる。このように発電側と負荷側を最適制御することで電力品質の安定化を図る次世代の電力網をスマートグリッドという。

### スマートグリッド

スマートグリッドについて正式な定義はないが、「従来からの集中型電源と送配電系統との一体運用に加え、情報通信技術の活用により、太陽光発電等の分散型電源や需要家の情報を統合・活用して高効率、高品質、高信頼度の電力供給システムの実現を目指すもの」を指すと考えられる。一般的には発電側と需要家側が通信技術を利用して双方向に情報をやり取りして需給バランスを最適化するものであるが、対象となる国や地域によってグリッドに求められる目的や必要となるインフラが異なってくるため、様々な概念を持ち、世界中で取り組みが進んでいる<sup>[6]</sup>。

現在次世代電力網に最も積極的に取り組んでいるのが米国である。大統領である Barack Obama 氏がグリーン・ニューディール政策の一環としてスマートグリッドを国家プロジェクトの一環として進めている。米国ではセンサやネットワーク制御機能が未整備な部分が多いため、電力インフラの刷新を図ることを目的としている。

欧州では風力発電が大量に導入されている上に、電力網が複雑にメッシュ化されているため、需給バランス制御、潮流制御が困難になっておりスマートグリッドに対する期待が高い<sup>[7]</sup>。

一方で日本では、すでに送配電網のほとんどに通信機能を組み込んでいるため、スマートメーターを利用した需要家の負荷制御への取り組みはあまり活発ではなく、蓄電池の導入に積極的である。しかし日本も 2010 年 1 月、電力会社やメーカー二十数社が「スマートコミュニティ関連システムフォーラム」を始め、スマートグリッドに力を入れ始めている。表 1-3 に野村証券金融経済研究所が試算した日米欧のスマートグリッド関連の投資想定額を示す。

表 1-3 日米欧のスマートグリッド関連の累計投資額推定<sup>[8]</sup>  
(2010~2030) [億米ドル]

	米国	欧州	日本
スマートメーター関連	190	140	60
EE/DR関連	660	500	200
超電導ケーブル	810	610	250
電圧調整関連	60	60	60
蓄電池	3560	3550	600
インバーター	400	420	370
合計	5670	5290	1540

### スマートメーター

スマートメーターとは電力量計のことであり、従来のアナログの電力メーターと比べて多くの有用な機能を有する。通信機能や他の機器の管理機能を持ち、家庭や事業所内の設備系機器と接続し、機器の稼働状況などをネットワーク経由で電力会社が管理することを可能とする。スマートメーターを導入し、例えば家庭内の優先度の低い機器を停止させたり、電気自動車の充電開始時間をコントロールしたりすることで負荷制御が可能となり、ピーク電力を削減できる。

## 1.2 本研究の目的

将来、太陽光発電を中心として分散型電源が広範に普及すると余剰電力が発生する。現在開発が進められている蓄電池も普及が進んだとすると需要家側は売電する時点を選ぶことができるようになる。売電価格に適正な市場価格を適応させようとする動きが出てくると、現在先送りとなっている電力完全自由化が見えてくる。

家庭のような小規模な市場参加者が多数現れた場合には現行のような単一の市場(JEPX)が必ずしも望ましいとは言えない。家庭などは小規模な取引を行うことが考えられるが、単一市場では遠方との取引を行う場合があるが、家庭などは小規模な取引を行うと考えられるので、遠方との取引では送電に伴う価格上昇を考えると効率が悪い。買電、売電する地域を選んで入札を行うことも考えられるが、多数の市場参加者全てに関して送配電設備の容量制約を考慮しながら成約させていくことも複雑さが増してしまうと考えられる。また、分散電源が広範に普及すると地域別にも電力の過不足が異なってくるため、地域ごとに適正な市場価格が存在するはずであるが、単一の市場では地点別の価格を設定するのは難しい。

そこで本研究ではパケット電力取引に基づく革新的配電システムを提案し、上記の課題を解決するような市場制度と電力系統の構成を設計し、シミュレーションによってその動作を評価する。市場と市場参加者をモデル化し、電力取引シミュレーションを行うことによって、提案する電力システムの構成形態が有効であることを示すことが本研究の目的である。

## 第2章 分散市場型電力流通システム

### 2.1 分散型市場

#### 2.1.1 分散型市場とは

前章で述べたような課題を解決するために本研究ではパケット電力取引を行うために分散型市場というものを提案する。分散型市場とは図 2-1 に示すように数軒から十軒程度の家  
庭から構成され、電柱 1,2 本に 1 つの割合で配置される。各市場参加者は複数の市場に参加  
し、また需要を持たず市場同士を直接結んで取引価格の低い市場から電力を調達し、その  
まま取引価格の高い市場に売ることによって利益を得るような事業者も考えられる。

このようにして全体としてメッシュ状の配電系統となり、価格によって電力の流れが形  
成されていく。

それぞれの市場が自律分散的に動き、各家庭が戦略的に入札を行うことにより全体とし  
て電力の流れが形成されていくこの系統を分散市場型電力流通システムと呼ぶことにする。

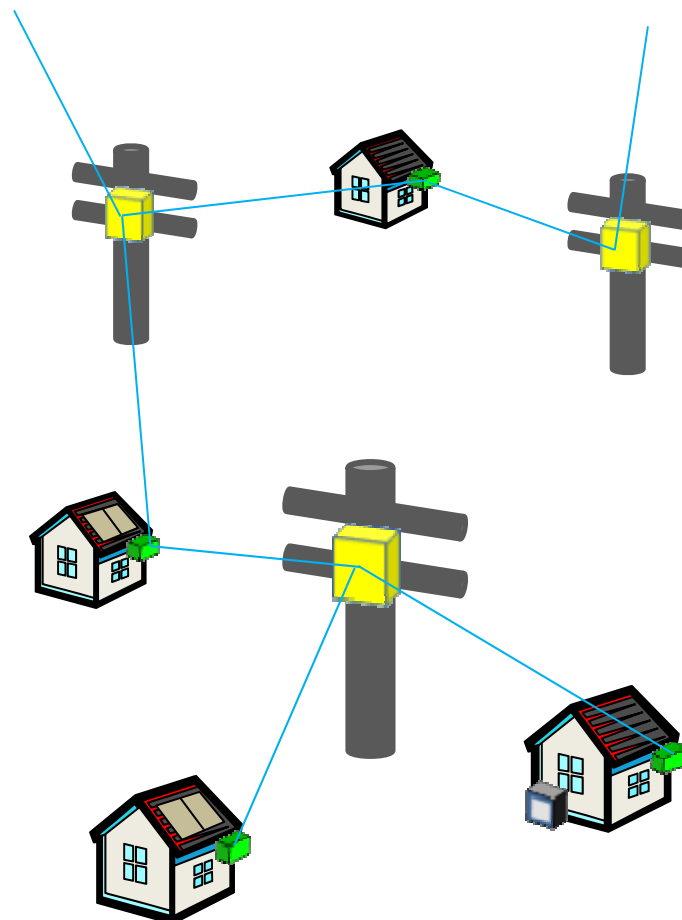


図 2-1 分散型市場の様子



## スマートグリッドとの違い

まずスマートグリッドについては正式な定義はないが、基本的な特徴として

- ① 情報通信技術を利用した発電側と需要側の双方向通信
- ② 需要側の負荷を発電側の意思で制御する

の2つが挙げられる。この点について、分散型市場とスマートグリッドを比較する。

### ① 双方向通信

スマートグリッドの指す双方向通信について、需要側から発電側に流れる電力情報としては、機器ごとの電力消費量、消費パターンなどが考えられ、発電側から需要側に流れる電力情報としてはリアルタイムの電力価格が考えられる。発電側は需要量や消費パターンを把握することでリアルタイムの電力価格を決定し、需要側は電力価格に応じて負荷を抑制するようなやり取りが考えられる。しかし、リアルタイムの電力価格をどのように決定するかが問題となる。

分散型市場においても情報の双方向通信は行いが、発電側と需要側ではなく、需要側と分散型市場、発電側と分散型市場である。需要側は分散型市場から価格情報を得る。それをもとに入札を行う。発電側も分散型市場に入札を行っており、約定の結果自身の売買量が決定するのでその分だけ発電すれば良く、需要家ごと、機器ごとに消費パターンを把握する必要はない。

### ② 負荷制御

スマートグリッドにおいては発電側の意思で各需要家の負荷を制御することが考えられているが、分散型市場においては需要側に立ち入ってまで負荷制御を行うことはない。発電側はピーク時など、負荷を制御したいときには各市場に売る量を制限すれば良い。その結果、十分な電力を得られない家庭などは家庭内で優先度の低い機器から順番に使用しないという最適化を行う。

## パケット電力

情報通信技術を利用した電力流通が行われるようになると、電力に様々な情報を付帯させることが考えられる。本研究ではそのような情報の付帯した電力のことをパケット電力と呼ぶことにする。例えば1パケットを100[Wh]とすれば、1パケットとはその100[Wh]の電力と、その電力に関する情報をまとめて指すものとする。

電力をパケットのように扱った電力流通ネットワークの研究は以前にもなされたことがある<sup>[9]</sup>が、価格情報だけではなく、送電元と送電先の情報も付帯させて流通を行うために、送電元と送電先が直接通信を行わなければならない、また途中にルーターを介するために導入するに当たっては配電網の大規模な刷新が必要となってしまうことが考えられる。また、送電コストの負担も含めどのように導入していくかまでは言及していない。

本研究においてはパケット電力に電力の行き先の情報は付帯させない。付帯させるのは、例えば CO<sub>2</sub> 排出原単位やどの発電所由来の電力か等の情報が考えられる。分散型市場ではこのパケット単位で入札を行い、電力をやり取りする。

### 2.1.2 東京穀物商品取引所における商品売買方法について

本研究で用いる市場のアルゴリズムは「ザラバシステム売買の付合わせについて<sup>[10]</sup>」を参考としている。以下で「ザラバシステム売買の付合わせについて」のうち、今回参考にする箇所の特徴を簡単に述べる

#### 板合わせ仕法とザラバ仕法

板合わせ仕法は板合わせを行う時刻の前までにあらかじめ市場参加者から注文を受け付けて蓄積しておき、板合わせ時刻になるとその注文を約定していく仕法である。そのため板合わせ仕法の場合、その板合わせ時刻にのみ前回の板合わせ時刻から今回の板合わ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 市場ではこの仕法を採用している。

一方ザラバ仕法は板合わせ仕法と異なりリアルタイムで継続的に約定を行っていくものである。この場合においても入札された注文は市場内に蓄積されるが、板合わせ仕法と異なり、全時刻において約定が可能である。なお、東京穀物商品取引所では前場（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合わせ仕法で取引が行われている一方、それ以外の時間の取引はザラバ仕法で行われている。

ザラバ仕法の利点としては

- ① 立ち合いが継続的に行われるために、取引機会が増大する。
- ② 市況に影響を与える要因に対して市場が直ちに反応できる

などが挙げられるが、反対に売買条件が合致すれば瞬時に約定が行われるため、相場動向や注文状況によっては価格が短時間に大きく動くことがある。といった誤発注に対する注意が必要になる。

#### 価格優先・時間優先

取引における原則である。価格優先とは安い値段の売り注文は高い値段の売り注文に優先され、高い値段の買い注文は安い値段の買い注文より優先されて取引がおこなわれる規則である。ここで同一値段の注文があった場合に採用される規則が時間優先の規則であり、先に受け付けられた注文が後に受け付けられた注文より優先される。

## 指値注文と成行注文

指値注文は各注文における注文価格および注文量を指定し、その注文を価格優先・時間優先の原則のもとに約定していく注文方式である。約定は、売指値注文は指定値段以上、買指値注文は指定値段以下の値段となる。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、売成行注文であればその時点で最も値段の高い買い注文と約定し、買成行注文であればその時点で一番安い売り注文と約定する。

## 約定可能値段幅と特別気配

東京穀物商品取引所では価格の連続性を維持するために、約定値段決定の目安となる基準値を設け、その基準値を中心として約定可能値段幅を設定し、当該約定可能値段幅内の対当する注文においてのみ取引を成立させることとしている（図 2-2）。

逆に、約定可能値段幅外の値段で対当する場合には特別気配と呼ばれる状態になる（図 2-3）。特別気配状態の場合即時には約定せず、新たな発注または 10 秒ごとに行われる基準値の自動更新により約定可能値段幅内で売り注文と買い注文が対当した時に約定する。

## 約定価格

約定価格については対当する二つの注文のうち受け付け時刻の早い注文の価格が優先される。その注文が約定可能価格幅内であれば注文価格が約定価格となり、約定可能価格幅外であれば受け付け時刻の早い方の注文が売り注文の場合は約定可能価格幅のうち最も安い値段が、買い注文の場合は約定可能価格幅のうち最も高い値段が約定価格となる

売	累計	値段	累計	買
		成行	0	
	310	600	0	
	310	590	0	
	310	580	0	
	310	570	0	
	310	560	0	
	310	550	0	
150	310	540	0	
100	160	530	0	
40	60	520	0	
20	20	510	0	
	0	500	0	
	0	490	5	5
	0	480	20	15
	0	470	70	50
	0	460	170	100
	0	450	170	
	0	440	170	
	0	430	170	
	0	420	170	
	0	410	170	
	0	400	170	
	0	成行		

約定可能値段幅

基準値

図 2-2 注文控え板の様子（東京穀物商品取引所）

売	値段	買
	成行	
	570	
	560	
	550	
①10	540	②10
	530	
	520	
	510	
	500	
	490	
	480	
	470	
	460	
	成行	

10秒後

売	値段	買
	成行	
	570	
	560	
	550	
①10	540	②10
	530	
	520	
	510	
	500	
	490	
	480	
	470	
	460	
	成行	

図 2-3 特別気配

### 2.1.3 本研究における電力売買方法について

本研究では 2.1.2 で述べた東京穀物商品取引所のアルゴリズムに以下の変更を加えたものを用いるものとする。

まず、基本原則である価格優先・時間優先で約定を行うものとする。

さらに、分散型市場では全ての市場と市場参加者が同期することなく自律分散的に行動しているため、リアルタイムで継続的に約定を行っていくザラバ仕法が適していると考えられる。さらに市場価格に当該地域の電力の過不足が反映されるべきであることを考えても、瞬時に入札を市場価格に反映するザラバ仕法が適している。そこで本研究ではザラバ仕法のみを用いることにする。

また本研究では約定可能価格帯幅というのは特に設けない。その代わりに極端な価格変動も想定されるので成行注文は設けず、指値注文のみを採用し、成行注文のような注文をしたいのであれば、買注文なら最高価格、売注文なら最低価格で注文をするような注文方法を選択するものとする。

市場は外部に注文控え板を公開し、市場参加者や送電事業者はこれをそのまま見ることが出来るが、どの参加者がどの入札を行ったのかまでは知ることはできない。

#### 2.1.4 分散型市場の利点

この分散型市場の利点として以下のものが挙げられる。

- 売電するにあたり、買い手が複数いることでその間で競争が生まれ、売り手にとっては望ましい価格が形成される。また買い手にとっても同じことが言える。
- 地域ごとの需給差を反映するような適正な価格が形成される。
- ローカルなやり取りが可能であるため、遠方との取引で生じてしまう送電に伴う余分な価格上昇を防ぐことができる。
- 継続的なやり取りが可能。
- 入札を行うことにより需要側が電力コストを意識するようになり、無駄な電力消費を減らす行動に向かう。
- 小規模な電源でも参加が容易になり、分散電源の導入を促進する。
- 市場ごとに需給バランスを取ろうとするため、地域ごとに自律的な負荷制御を行うようになる。
- 発電量や負荷が市域ごとにバラバラであっても、市場価格に基づいて自律的に電力の流れが形成されていく。

また、課題としては以下のものが考えられる。

- 極端な価格変動の発生。
- 入札が約定するかは不確定であるため、複数の市場に同時に入札を行う市場参加者が過剰に買電、もしくは売電を行ってしまう可能性がある。
- 郊外における市場の構成。

## 2.2 系統全体の概要

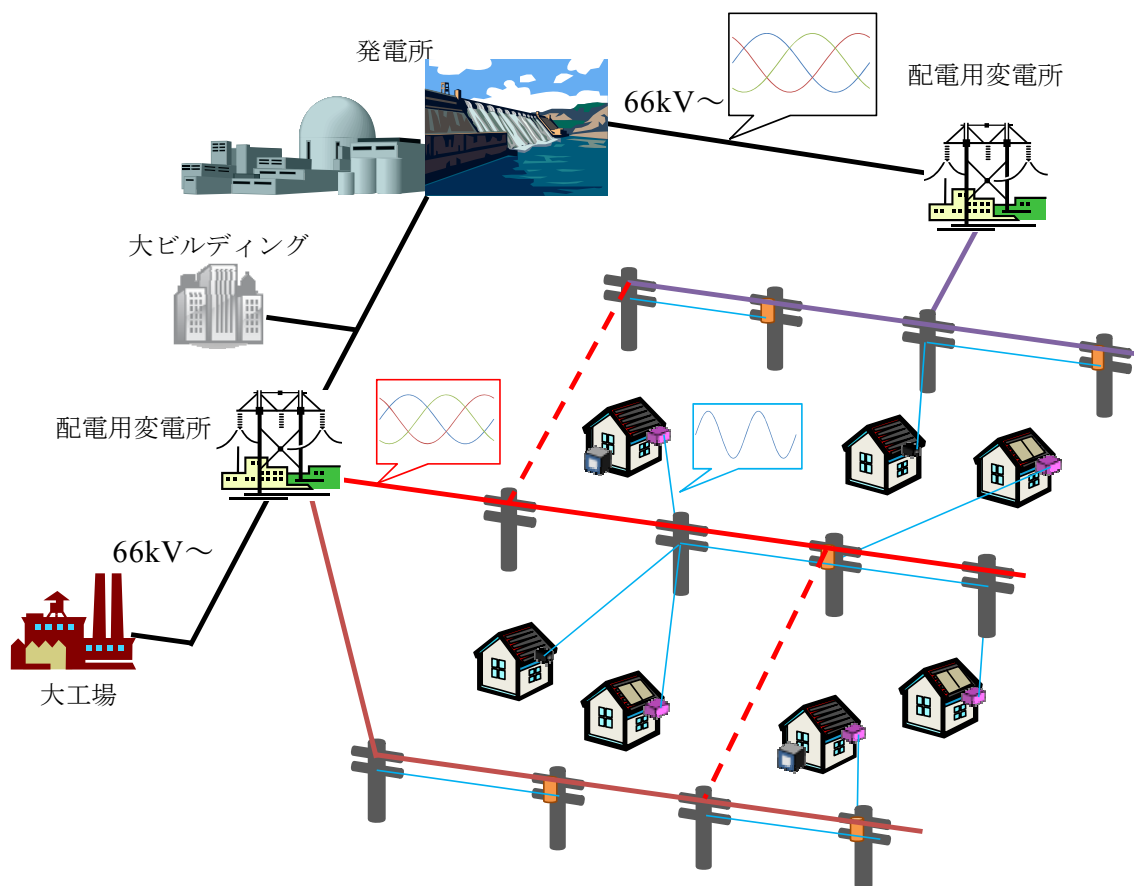
本節ではまず既存の系統を述べた後に、分散型市場を含む系統全体像を示す。

### 2.2.1 既存の電力系統と分散市場型電力流通システム

既存の電力系統の概要を図 2-4 に示す。既存の電力系統では発電所で発電された電力は高圧送電線で配電用変電所に送電される。そして配電用変電所で降圧され、柱上変圧器まで届く。発電所から柱上変圧器までは三相交流である。そして柱状変圧器で 100V,200V まで降圧されて、引き込み線によって単相または三相交流で各家庭に届けられる。

そして図 2-5 に示すのが分散型電力系統である。発電所から三相交流で柱上変圧器まで運んでくる範囲は送電方式、設備など全て従来の電力系統と同じである。分散型市場を含む新しい電力流通ネットワークは柱上変圧器以下の範囲である。そこで分散市場型電力流通システムは柱上変圧器以下の範囲を呼ぶことにする。

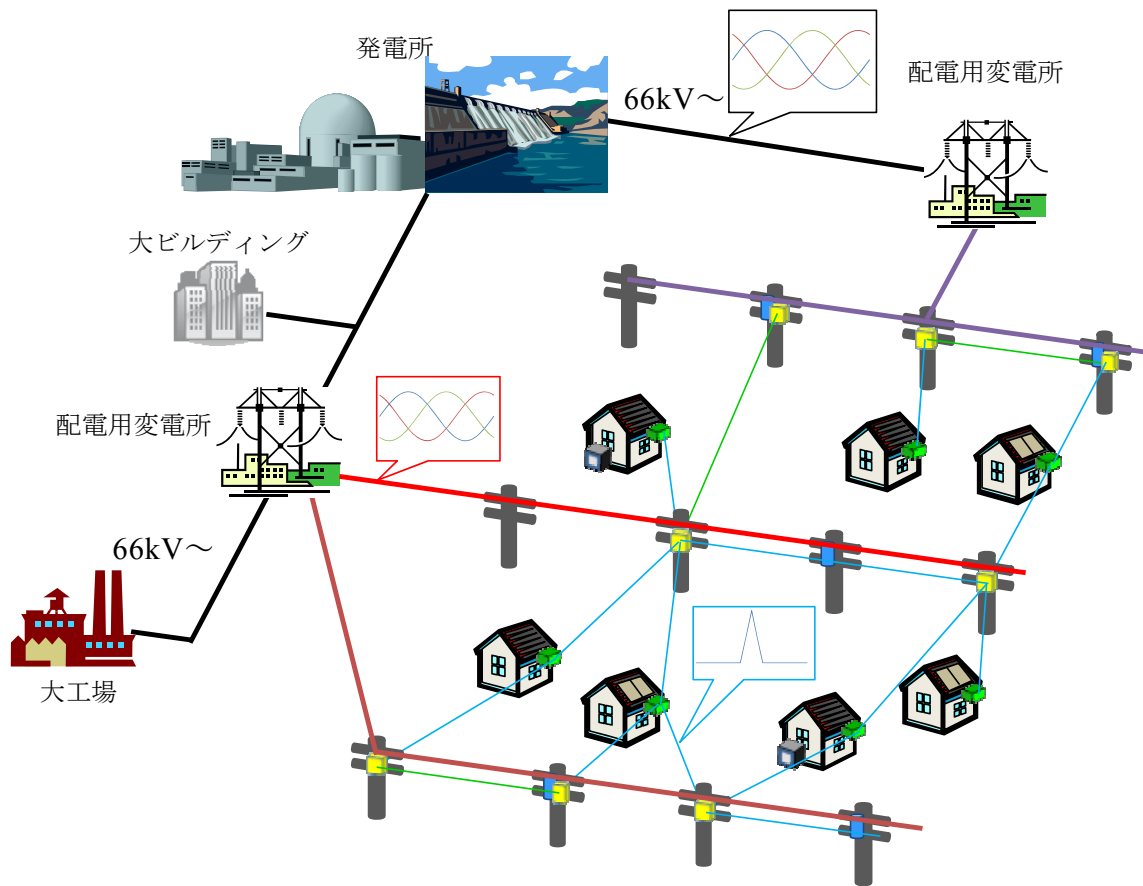
分散市場型電力流通システムでは、柱上変圧器の代わりに系統インターフェイスと呼ぶ設備を、またそれとは別に分散型市場を各電柱に、そして各家庭には従来の系統において余剰電力を逆潮流させるために必要な設備の代わりにアダプタと呼ぶ設備を設置する。それぞれの設備を設置することによって配電網において電力をバケットのように扱った取引が可能となる。そして既存の 100,200V 引き込み線をそのまま利用し、増設の必要があれば各家庭が増設して複数の市場に接続していく。また。市場同士を結ぶ送電線も存在する。



	PV導入家庭
	燃料電池導入家庭
	柱上変圧器
	逆潮設備

- 三相高圧送電線
- 連絡用配電線
- 6.6kV三相配電線
- 100,200V引き込み線

図 2-4 従来の電力系統



	PV導入家庭
	燃料電池導入家庭
	系統インターフェイス
	アダプタ
	分散市場

- 三相高圧送電線
- 6.6kV三相配電線
- 非同期双方向配電線
- 市場間接続

図 2-5 分散市場型電力流通システム



さらに図 2-6 に従来の配電網のイメージ図を、図 2-7 に分散市場型電力流通システムの配電網のイメージ図を示す。このように従来の電力系統では放射状の配電系統であったのに対し、分散市場型電力流通システムでは放射状の配電系統が実現できる。

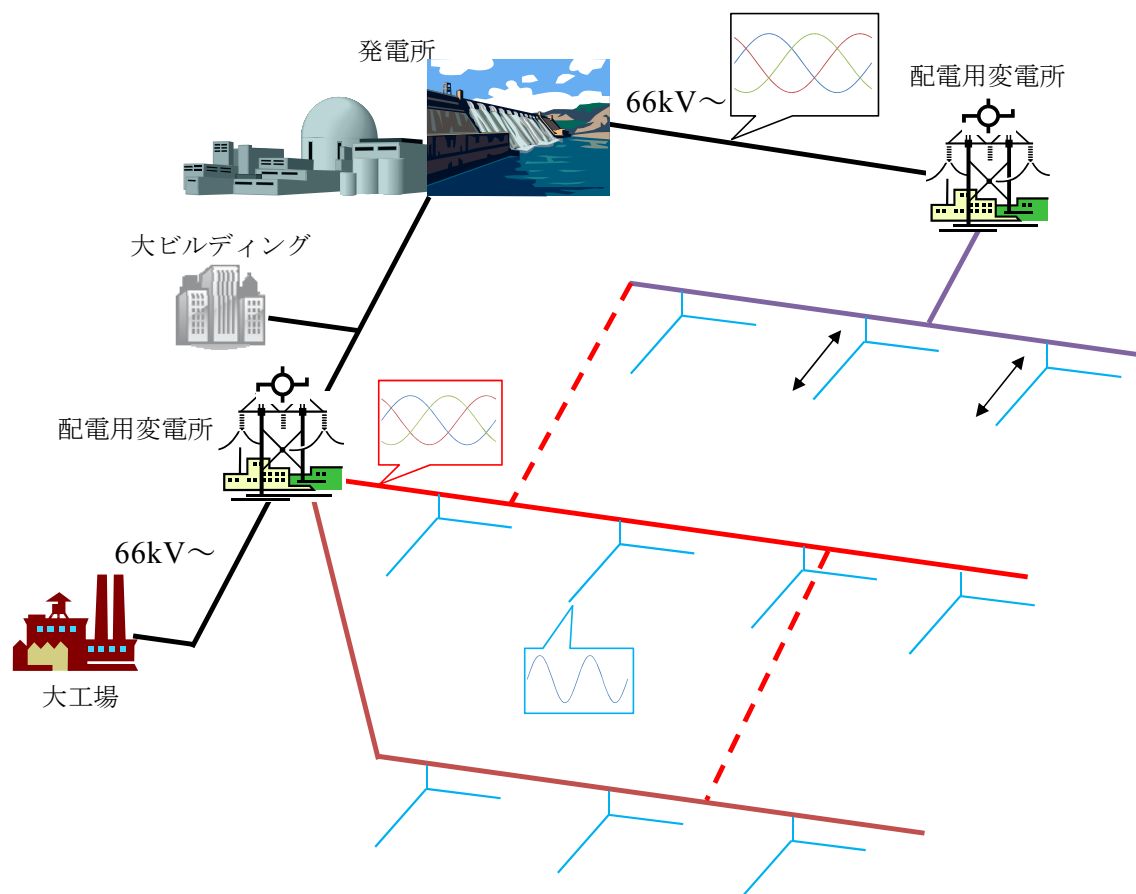


図 2-6 従来の配電網のイメージ図

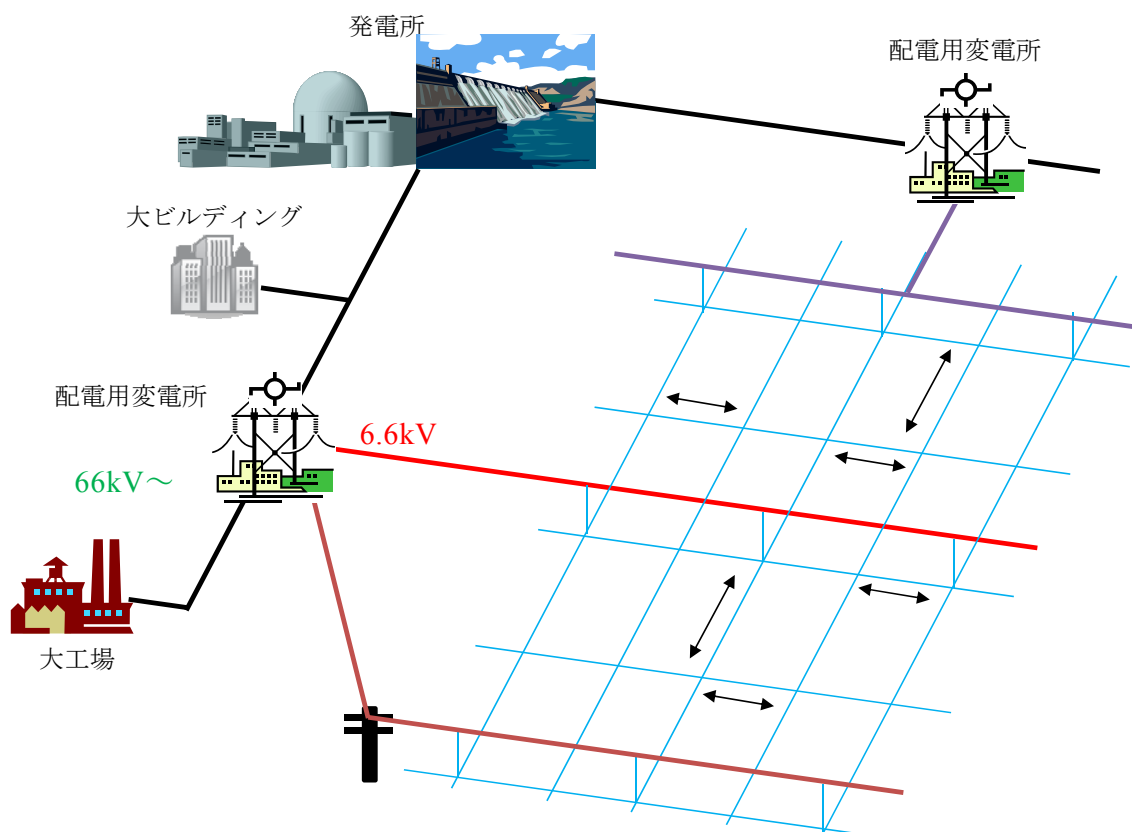


図 2-7 分散市場型電力流通システムにおける配電網のイメージ図

### 2.2.2 送電方式

分散市場型電力流通システムにおいてはパルス電圧による非同期双方向送電を行うものとする。分散市場型電力流通システムでは 6.6kV 送電線以上の範囲は従来の電力系統と変わらないため、6.6kV 以上の範囲においては従来通り三相交流を用いた送電方式である。従来の電力系統では 100,200V 引き込み線では単相や三相交流で配電を行っているが、分散市場型電力流通システムではこの部分をパルス電圧によって断続的な電力のやり取りを行う。従来の交流による配電では、電流の値を変えることによって送電電力量を変化させているが、パルス送電においては電流、電圧の値は変化させず、パルス数を変えることによって送電電力量を調節する。図 2-8 に従来の電力系統における交流送電の様子を、図 2-9 に分散市場型電力流通システムにおけるパルス送電の様子を示す。

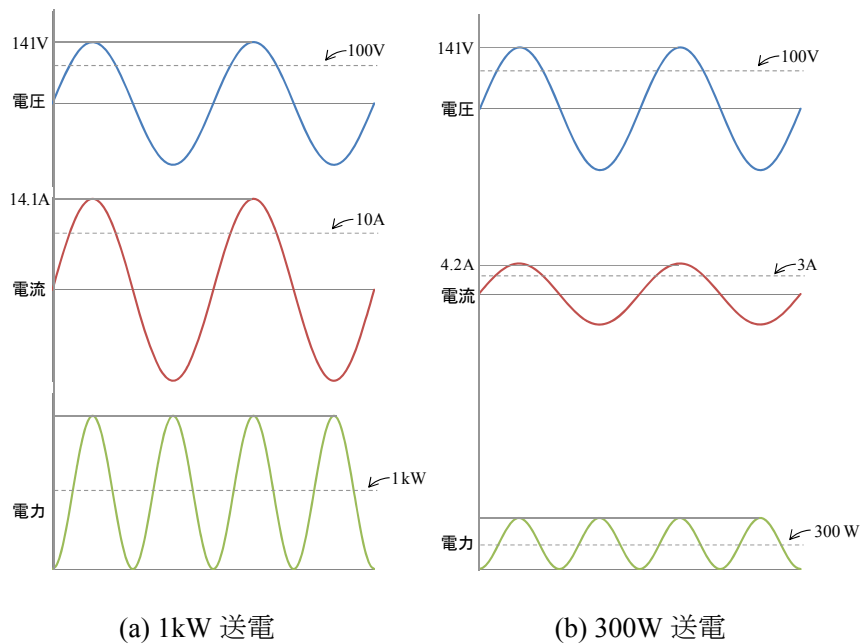


図 2-8 従来の電力系統における交流送電の様子

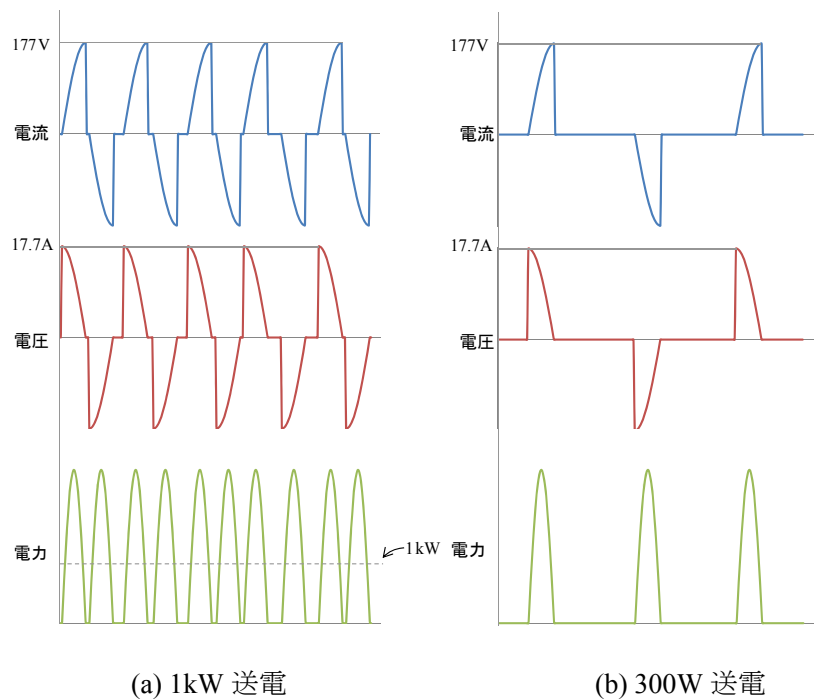


図 2-9 分散市場型電力流通システムにおけるパルス送電の様子

いずれも 1kW 送電する際と 300W 送電する際の電流、電圧、電力波形を示した。同じ時間をかけて異なる電力量を送電する場合、電流の値を 3 割に絞る従来の方式に比べ、パルス送電ではパルスの数を 3 割に減らすことで送電電力を調節する。また、パルス送電は非同期に断続的に行われているのでそれぞれのパルスの間隔は揃っていない。

普通、交流 100V という場合実効値 100V のことを指すが、パルス送電においても交流の実効値を算出する場合と同様の計算を行い電流、電圧最大値を算出すると 100V、10A の電圧、電流で送電するといったときはそれぞれの最大値は $\sqrt{\pi}$  倍である 177V、17.7A という結果になった。しかし、パルス送電は常時電圧印加ではなく、必要なときのみ電圧がかかるのでさらに電圧を上げて送電を行える可能性もある。

ここでパルス送電によるメリットを挙げると以下のものが考えられる。

- 常時電圧印加ではなく、数パルスを 1 単位というようにして取引を行うため、買い手が使う量を制限できる。
- 常時電圧がかかっていないため、安全性が高い。
- メッシュ状の配電システムが実現できるため、事故に強い。
- 導入にあたっては例えば 2 軒だけが導入すると言ったように、小規模からの導入が可能であり、巨大な初期投資が不要。
- 例えば 1 パルス毎に電力の価格や CO<sub>2</sub> 排出原単位等の情報を付帯させることによって、電力をパケットのように扱うことができる可能性がある。

また一方で課題として考えられるものを以下に挙げる。

- 高効率なスイッチング素子や電力貯蔵装置が必要となる。
- スイッチを切り替えるだけで受電できてしまうため、不正な受電が起こる可能性がある。

### パルス電圧とパケットの関係

本研究では電力をパケットのように扱おうと述べたが、1 パルスが 1 パケットというわけではない。パケット電力 1 パケットの電力量は改めて定義する必要があり、例えば 1 パルスが 1[Wh]、1 パケットが 100[Wh]であるとする、100 パルス分の電力を 1 パケットとして扱い、その 100 パルス分の情報等を付帯させた集合を 1 パケットと呼ぶことになる。

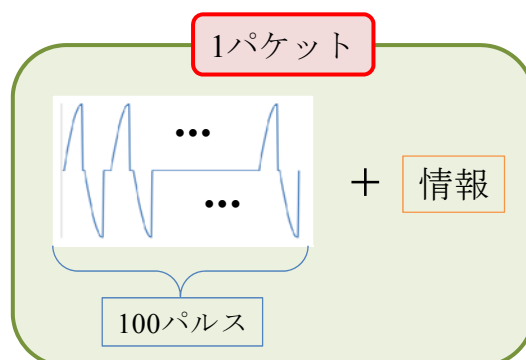


図 2-10 パルスとパケットの関係

### 2.2.3 各設備の特徴

ここで図 2-5 に示した各設備の特徴や役割について述べる。

#### 家庭

各家庭は市場参加者となり、複数の分散型市場に参加する。各家庭は発電装置・需要・電力貯蔵装置を持つが、このうち全てを持つ必要はない。発電装置を持つ家庭は全てを持つことが考えられるが、例えば発電装置は持たずに貯蔵装置のみを持ち市場に参加する家庭なども考えられる。

#### 分散型市場

分散型市場は数軒の家庭から構成されており、ザラバ方式による取引で需給をバランスさせる。マイクログリッドの集中制御のような機能はなく、市場自体は意思を持たずに入札を約定していく仕組みのみを持つ。電力系統とはアダプタを介してつながっている。

#### 系統インターフェイス

従来の柱上変圧器の代わりに設置される設備。三相交流とパルス電圧の変換を行い、系統が分散型市場に入札することができるようにする役割を担う。

#### アダプタ

分散型市場に参加するために家庭側に設置される設備。市場と電力のやり取りを行い、家庭内への給電を行う。

#### 非同期双方向配電線(ABDL:Asynchronous Bidirectional Distribution Line)

分散型市場と家庭を結び、パルス電圧のやり取りを行う。電力のやり取りと同時に家庭ー市場間で通信も行う必要があるが、この非同期双方向配電線を用いて通信を行うことも考えられる。

#### 市場間接続線

電力価格の安い市場から電力を買い、高い市場に売ることによって利得を得ようとする事業者によって張られる線。接続する 2 市場に入札される価格を観測することができ、価格差が現れた時点で送電を行い利得を得る。また、合致する注文がないときは自ら入札も行い、隣の市場の状況を伝えるような役割も持つ。

系統インターフェイスのある市場とない市場をつなぐことで系統側は間接的に全ての市場に参加できることになる。

## 2.3 配電回路の概念設計

### 2.3.1 基本構成回路

分散市場型電力流通システムにおいては家庭側、市場側にパルス電圧による電力流通を可能とする設備を設置する必要がある。本研究で想定している配電設備の基本構成単位となる回路を図 2-11 に示す。

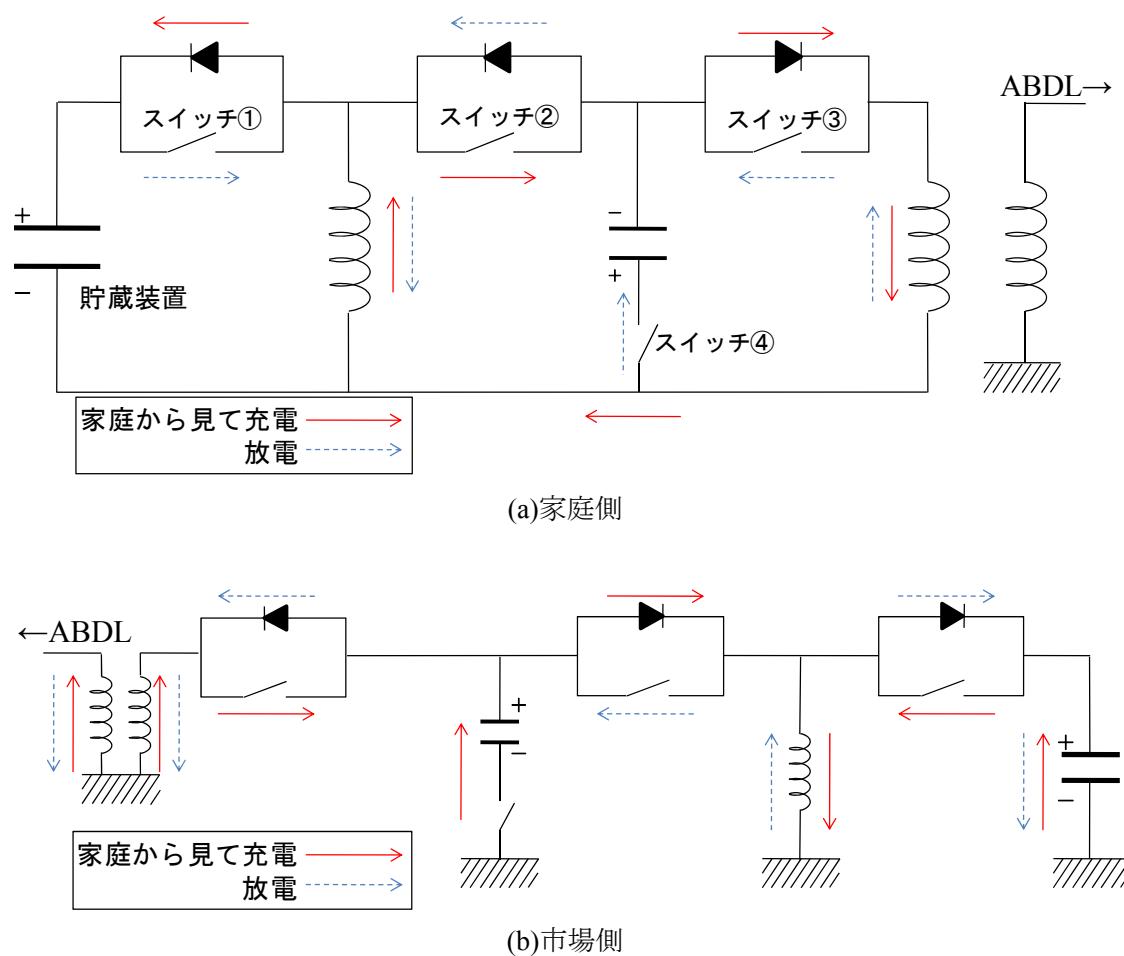


図 2-11 配電回路

これらの回路によってパルス状の電圧を発生させて、それを送受電することが可能となる。家庭側の回路を例に取り、パルス状の電圧を送電する仕組みを説明すると、まずスイッチ①を操作することによって送りたい電力を、コイルを介してバッファとなるコンデンサに溜める。そして変圧器で電圧を高めて市場側へ送る。市場側はコイルを介していったん自身が持つバッテリーに貯蔵し、買い手である家庭に送る。市場側にも同様の回路が設置されており、市場が家庭に送る際にも同様の手順で送電する。

### 2.3.2 全体の構成

前節で述べた基本構成回路を組み合わせた全体の構成について述べる。図 2-12 に全体図を示す。

パルス電圧による送電では電圧の交番がないため、帯電による汚染物吸着などが考えられる。そこで家庭側、市場側共に基本構成回路をもう 1 つ、変圧器の極性を逆にして配置することを考える。そして極性が逆のパルス電圧を交互に送り、交流送電のようにすることでそういった欠点を補うことができる。

また、パルス電圧はスイッチを操作することによって生み出す仕組みになっているが、バッテリーからコイル、バッファとエネルギーを移し替えるためにスイッチのリレーを行ってから送電するため、時間的なロスが発生し、送電線の利用率が低下してしまう。しかし 2 つの回路を交互に動作させることで、時間的に効率良く送電を行うことができる。受電側も 2 つの回路で交互に受電を行う。

このように 2 つの回路で時間的にロスのないように送受電するためには、送り出す時間とパルス幅が等しくならなければならない。そのためには送り出す際と、受け取る際に異なったインダクタンスを持つコイルを介さなければならず、コイルも 2 つ設置する必要がある。

市場側は図 2-12 に示すように N 家庭と接続しており、短い時間で接続先を切り替えていくことで N 軒と同時に取引を行っているかのように見せかけるタイムシェアリングが実現できる。

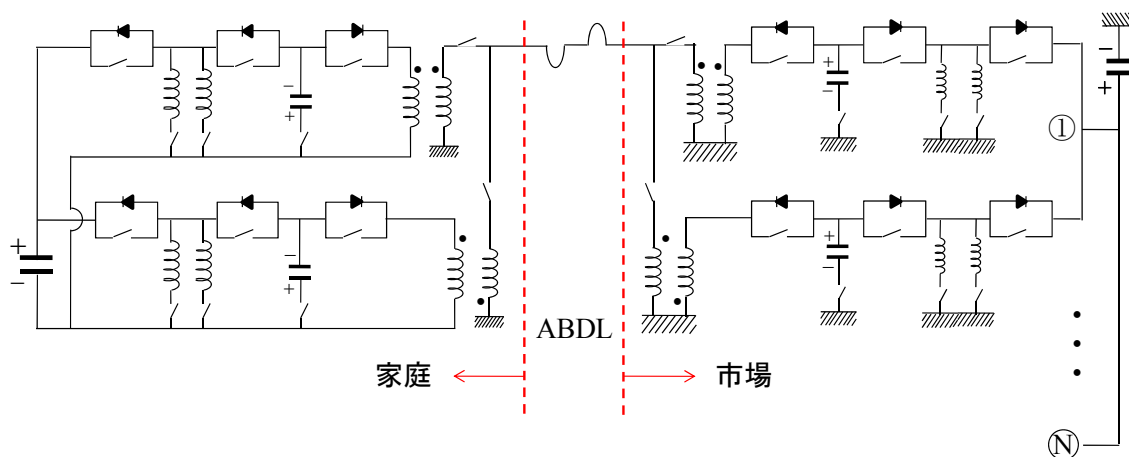


図 2-12 配電回路の全体図

### 2.3.3 各素子の値の決定

送電の仕組みと回路について述べてきたが、実際の規模ではどの程度の素子で実現が可能か、計算によって各素子の値を求めた。

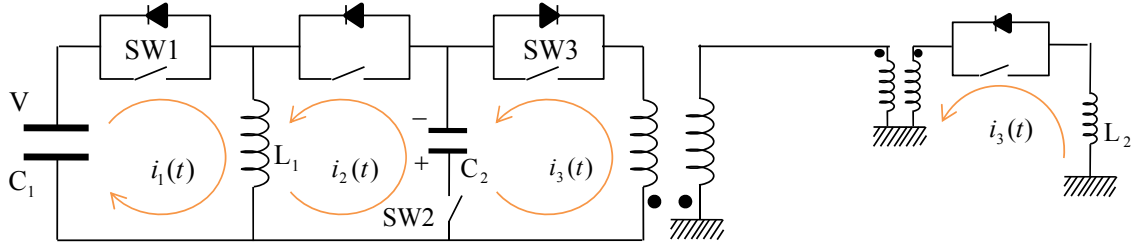


図 2-13 シミュレーション回路

家庭側から市場側に送る場合を想定し、図 2-13 の回路において計算を行った。コイル  $L_1$  に溜めるまでをフェーズ 1、コイル  $L_1$  からバッファとなるコンデンサ  $C_1$  に移るまでをフェーズ 2、コンデンサ  $C_1$  から市場側のコイル  $L_2$  に送電するまでをフェーズ 3 とし、フェーズ 1 完了時刻を  $t_1$ 、フェーズ 2 完了時刻を  $t_2$ 、フェーズ 3 完了時刻を  $t_3$  とする。電流値を図のように定め、過渡解析を行うと

$$i_1(t) = \frac{V}{\omega_1 L_1} \sin \omega_1 t \quad (0 \leq t \leq t_1) \quad \text{式(2.1)}$$

$$i_2(t) = k \cos \omega_2 (t - t_1) \quad (t_1 \leq t \leq t_2) \quad \text{式(2.2)}$$

$$i_3(t) = k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \sin \omega_3 (t - t_2) \quad (t_2 \leq t \leq t_3) \quad \text{式(2.3)}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_2}}, \quad \omega_3 = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}}$$

$$k = i_1(t_1), \quad t_2 = \frac{\pi}{2\omega_2} - t_1, \quad t_3 = \frac{\pi}{2\omega_3} - t_2$$

となる。これらの波形を図 2-14 に示す。



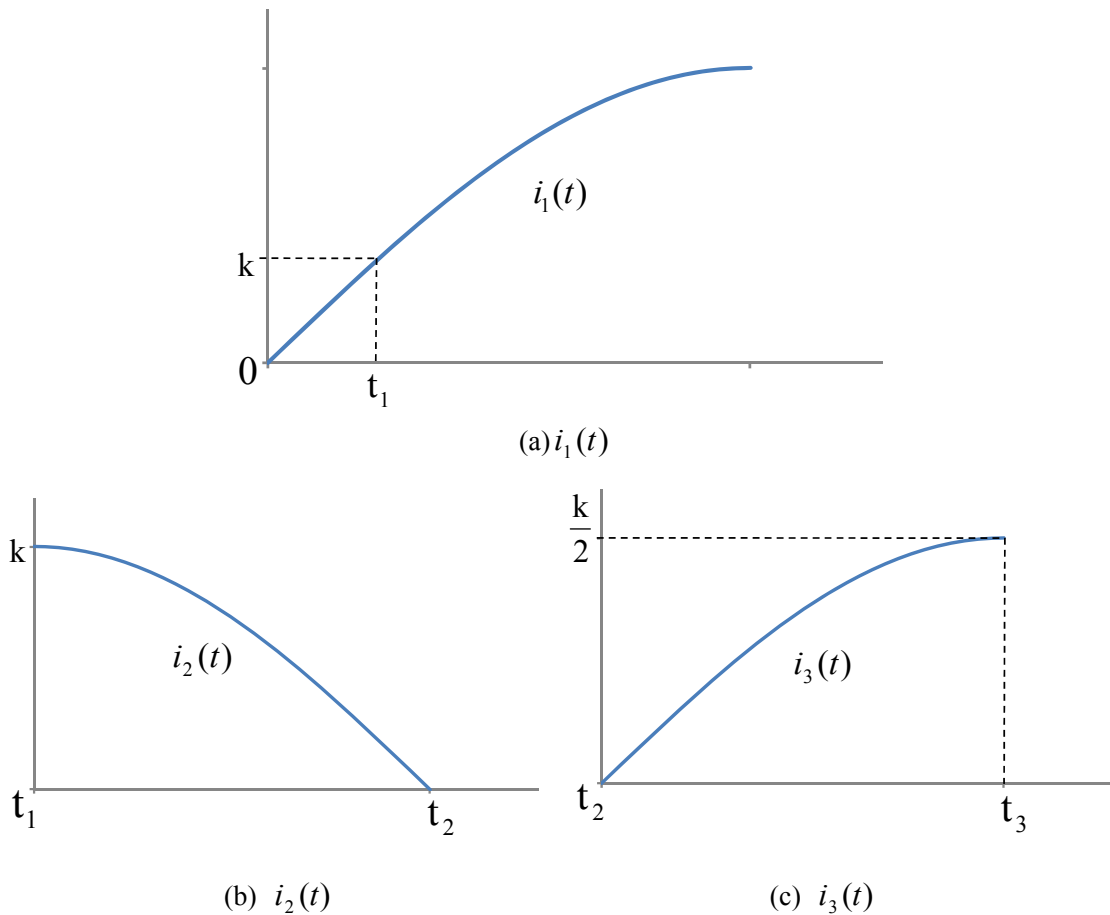


図 2-14 各電流波形

$i_1(t)$ は式(2.1)に従って変化するが、図 2-14(a)に示したように送りたい電力量を満たす電流値を取った時点でスイッチを切り替える。その後コイル、バッファとなるコンデンサを経て市場へと送り出される。2.3.2 でも述べたが、送り出すまでにかかる時間  $t_2$  とパルス幅( $t_3-t_2$ )を等しくしなければならないので

$$t_3 = 2t_2$$

が成立する。さらに今回は  $t_1 = t_2$  として計算を行った。

そして今回は 1kW 送電するとして計算を行う。このとき 2.2.2 節で述べたように電流最大値は 17.7[A]、電圧最大値は 177[V]である。そして 1 パルスを 10[J]、パルス幅を 10[ms]とする。連続的に送り続けたとすると 1 秒間に 100 パルス、そして極性が逆のものが交互に送られるので 50Hz の交流と近い設定となる。これらの設定から各素子の値を定めると

$$L_1 = 25[\text{mH}]$$

$$L_2 = 100[\text{mH}]$$

$$C_2 = 405[\mu\text{F}]$$

となる。

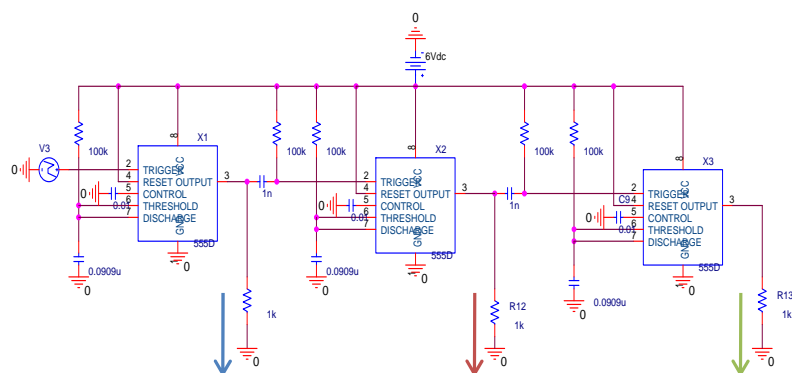
### 2.3.4 回路シミュレーション

前節で求めた各素子の値が妥当であるか、パルス状の電流、電圧を発生させることができるのかどうかを確かめるために回路シミュレータ **pspice**（無料版）によるシミュレーションを行った。

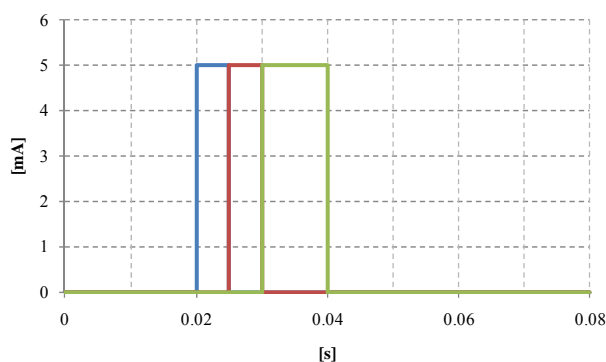
まずスイッチングについて述べるが、図 2-11 の回路において送電を行うためには 3 段階のスイッチの切り替えが必要となる。また、送電の際には図 2-11 に示した **sw1**, **sw2**, **sw3** の 3 つのスイッチを用いる。その流れとしては(**sw1**,**sw2**,**sw3**)を

(on,off,off) → (off,on,off) → (off,on,on)

とすれば良い。このようなスイッチングを行うためには、時間で切り替える方法、電流値を見て切り替える方法などが考えられるが、今回は任意のパルス幅を持ったパルスを発生させることを考えているので、時間で切り替える方法を採用する。図 2-15 にタイマー回路とその波形を示す。タイマー IC である **LM555** を 3 つ使い、出力と別の IC のトリガを接続することで 5ms, 5ms, 10ms と 3 連続で出力するスイッチを作成した。スイッチとしてトランジスタを利用し、この入力を行うことでスイッチの切り替えを行う。



(a)タイマー回路



(b)波形

図 2-15 タイマー回路とその出力波形

そして図 2-16 にシミュレーション結果を示す。図 2-14 と比較してみると同じ波形になっており、幅 10[ms]のパルス状の電流が 10[ms]の時間をかけて作りだされている様子が観測できた。

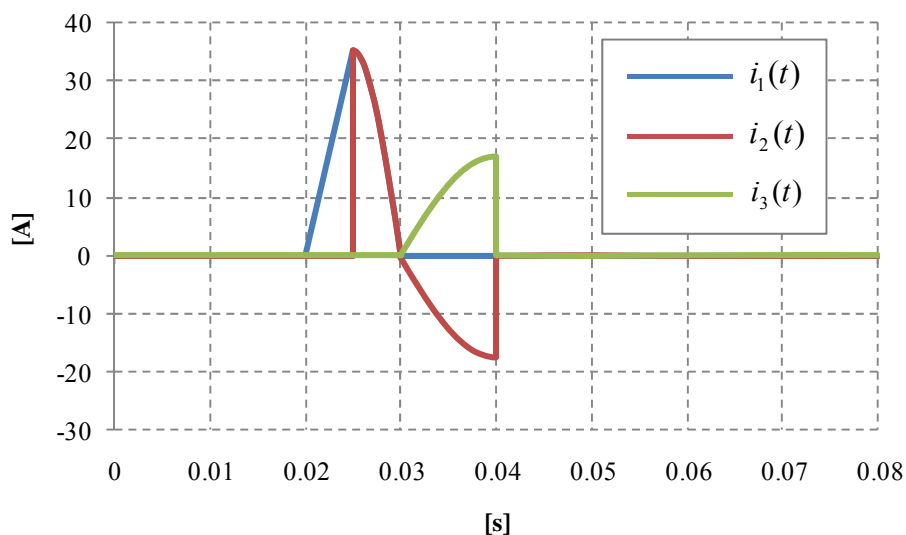


図 2-16 シミュレーション結果

### 2.3.5 損失について

1 回の送電を考えたとき、送電側のバッテリーから受電側のバッテリーに届くまでには

- コイル 2 回
- ダイオード 3 回
- コンデンサ 1 回
- 変圧器 2 回
- トランジスタ 5 回

を通過することになるが、これらの素子による損失は決して無視できない。そこで本節ではこれらの素子による損失について述べる。2.3.3 で求めたような値を満たす素子を調べ、その損失をまとめたものを表 2.1 に示す。

表 2.1 各素子の損失 <sup>[11][12][13][14][15]</sup>

コイル	内部抵抗
	11 [mΩ]
ダイオード	電圧降下
	0.85 [V]
コンデンサ	損失
	0.30 [%]
変圧器	効率
	99.28 [%]
トランジスタ	電圧降下
	1.8 [V]

この表を基に 1 回の送電で失われる電力を計算すると 1 パルス送電すると 10[J]のうち約 1.2[J]が失われるという計算結果になる。すなわち約 12%もの電力が失われることになるが、パルス電圧による電力流通においては常時電圧印加ではないため、さらに高い電圧で動作する可能性がある。そこで電圧を上げた際の損失の様子を表 2.2 及び図 2-17 に示す。

表 2.2 電圧を上げた際の損失

電圧最大値	177	251	396	561	793
電流最大値	17.7	12.5	7.9	5.6	4.0
周波数	50	100	250	500	1000
C2[μF]	40.5	10.1	1.6	0.4	0.1
損失[J/sec]	121.2	85.2	54.1	38.6	27.7
損失率[%]	12.0	8.5	5.4	3.8	2.8

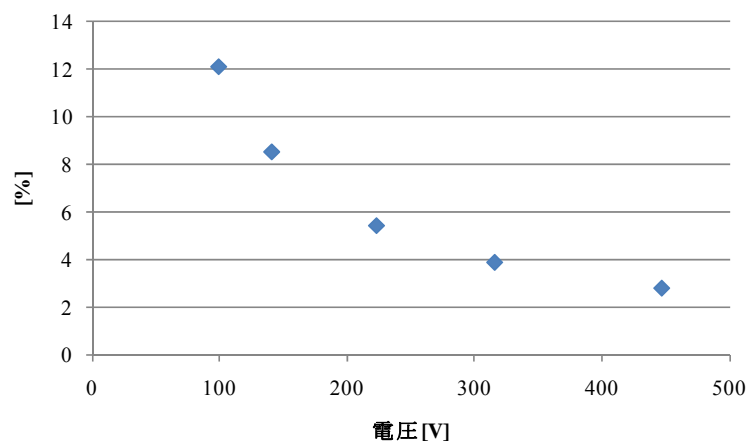


図 2-17 電圧と損失の関係

この結果から最大動作電圧を 400~500[V]まで上げれば損失は約 3%程度まで抑えられることが分かった。さらに開発の進められている SiC デバイスの利用を考えれば損失はさらに減少すると考えられる。

### 2.3.6 三相交流との変換

上述してきたように、家庭と市場側には同様の回路を置くことによって家庭から市場へ、そして市場から家庭へと送電を行っていく。ここで一旦市場には貯めずに家庭と市場では異なる装置を置き、市場側は取引を行う家庭に接続する線のスイッチングだけを行い、直接家庭同士で電力のやり取りを行うことも考えられる。その場合、通過するスイッチング素子の数が少なくなるので損失も減る。しかし、市場側がスイッチングを行い家庭同士で直接やり取りをする場合、その 2 軒の家庭で同期を取る必要が出てくる。するとシステム上、複雑さが増してしまう。さらにある市場に新たに参加したいと考える市場参加者が現れた場合、新しい市場参加者と既存の市場参加者の間の通信網などの整備を行う必要が出てくるために、余計なコストと手間がかかってしまうことになる。そこで市場側の回路と家庭側の回路を対称にし、家庭側から送られた電力を一旦市場に貯めることによって家庭同士同期を取る必要がなくなり、新たに参入することが容易となる。

以上のような理由から、市場と家庭には同様の回路を設置することになるのだが、このことを考えると電力会社が参加するための設備である系統インターフェイスにも同様に図 2-10 に示した回路を設置する必要がある。そこで図 2-10 の配電回路を基に三相交流との変換を行う回路を示すと図 2-18 のようなものが考えられる。三相交流を直流に整流し、基本構成回路によってパルス電圧を作り出している。

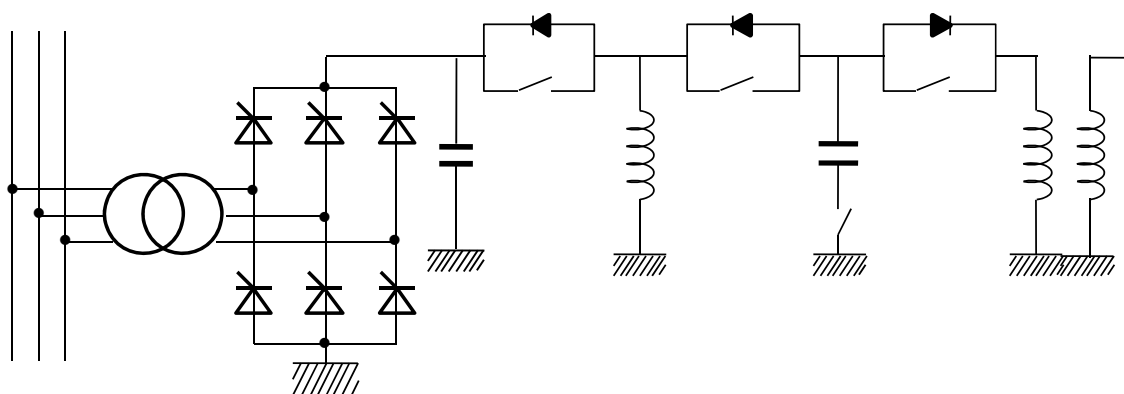


図 2-18 三相交流とパルス電圧の変換回路

## 2.4 プロトコル

次に取引成立後、送受電を行う際のプロトコルについて述べる。市場には複数の家庭が接続しており、受電すべき家庭以外の家庭で誤ってスイッチが入ってしまえば電力の誤送が容易に起こりうる。そこで家庭と市場間で電力のやり取りを行う際には高い信頼性が要求されるため、送電を行う際の通信プロトコルを整理する必要がある。図 2-5 に示した非同期双方向配電線は電力のやり取りを行う電線であるが、この線が通信線も兼用し、市場と家庭間で通信を行うことが考えられる。もし兼用しない場合は通信線を別に利用し通信を行う。そして数回を行いながら送受電することで信頼性を高められる。図 2-19 に本研究で考えている送受電の流れを示す。

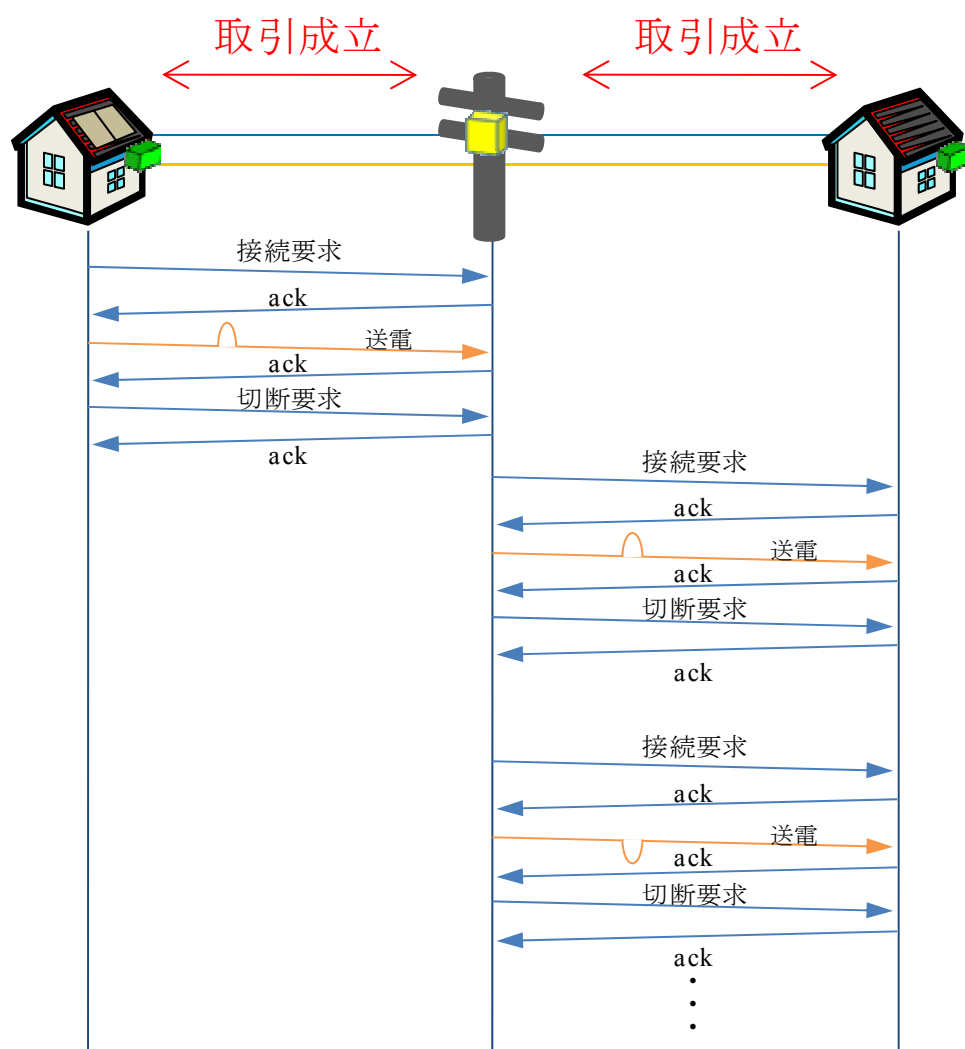


図 2-19 送電のプロトコル

## 2.5 電力系統の階層化

本章では電力売買方式と送電方式について述べてきたが、現状でハードウェアの部分（送受電）からアプリケーションの部分（市場取引）まで一体化している送配電システムに対して、取引の部分とハードウェアの部分に関して分離して考える情報通信の分野では常識となっている階層化の概念を用いることができる可能性を示すことができた。

図 2-20 に示すように最も上位の層で電力取引が行われ（もしくは他の固定料金サービスや託送サービスなども考えられる）、その後中間層同士で通信が行われる。どのくらいの時間をかけて送電を行うのか、どの周波数で送電を行うのかといったこともこの中間層で決定されるかもしれない。そしてその後ハードウェア層同士で実際に送受電を行う。

電力流通の分野にもこのような階層化という概念を導入すれば、考慮せねばならない対象を小分けにし、システム的な複雑さを減少させ、技術革新を促進させられるのではないかと考えられる。

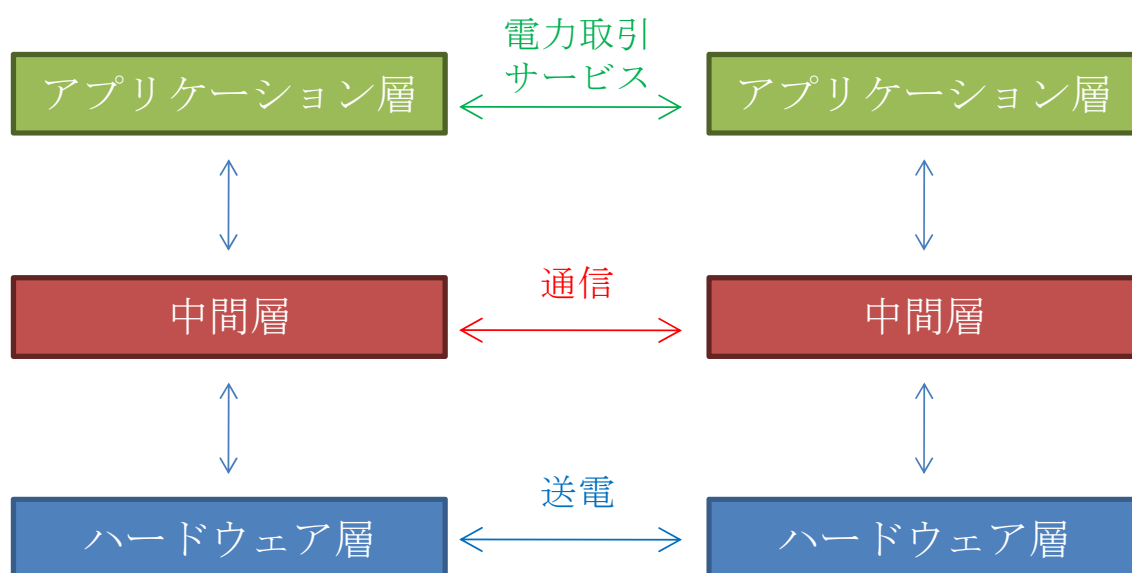


図 2-20 階層化

## 第3章 市場のモデル化

### 3.1 市場参加者の行動決定手法

#### 3.1.1 確率動的計画法<sup>[16]</sup>

動的計画法は時間的または空間的に多段階の最適問題を取り扱う手法である。入札量・充電量・電源の動作の決定は多段階決定過程であり、動的計画法は本研究で対象とする問題を解くのに適する。

時点 $t$ における将来のコストを $V_t$ とするとその値はその時の状態量の行列 $\mathbf{s}_t$ に対して決定される。すなわち、 $V_t(\mathbf{s}_t)$ と書ける。また、時点 $t+1$ 以降のコスト $V_{t+1}$ を用いると時点 $t$ での動作 $action$ は式(2.1)で求まる。ここで、 $action$ によるコストを $C(action)$ とする。

$$V_t(\mathbf{s}_t) = \min_{action} [C(action) + V_{t+1}(\mathbf{s}_t)] \quad \text{式(3.1)}$$

この時の $\mathbf{s}_t$ は $action$ によって変化するので式(2.2)のように書ける。

$$\mathbf{s}_{t+1} = f(\mathbf{s}_t, action) \quad \text{式(3.2)}$$

しかし、将来の状態量は不確実性 $\omega$ が含まれることが多い。(式(2.3))

$$\mathbf{s}_{t+1} = f(\mathbf{s}_t, action, \omega_{t+1}) \quad \text{式(3.3)}$$

そこで、 $\mathbf{s}_{t+1}$ が $action$ に対して確率的に変化すると仮定する。そうすると時点 $t$ での行動は式(2.4)を解くことで求まる。

$$V_t(\mathbf{s}_t) = \min_{action} [C(action) + E(V_{t+1}(\mathbf{s}_{t+1}))] \quad \text{式(3.4)}$$

さらに満期時( $T$ )の境界条件を定めておくと、式(3.1)の $V_T(\mathbf{s}_T)$ は定数と考えられるので $T-1$ 時点のすべての状態量 $\mathbf{s}_{T-1}$ に対して最適な行動が決定する。

$$V_{T-1}(\mathbf{s}_{T-1}) = \min_{action} [C(action) + V_T(\mathbf{s}_T)] \quad \text{式(3.5)}$$

同様にして後進的に解いていくことで $t$ 時点での最適な行動が決定する。



### 3.1.2 定式化

3.1.1 で紹介した確率動的計画法を用いると、各市場参加者の行動は式(3.6),(3.7)によって決定される<sup>[17]</sup>。

式(3.6)で当該時点での取引にかかる費用、燃料費、不足に対するペナルティの費用、そして次時点以降の評価値の期待値の合計が最小になる動作を決定している。また、満期時を24 時間後としている。

式(3.7)は取引にかかる費用を求める式である。ここでは約定価格の遷移が確率的に起こり、その遷移の幅内にある注文はすべて約定するとして費用を計算している。

$$V_k^n(S_k^n, \mathbf{B}_k^n, \mathbf{m}_k^n) \\ = \min_{\Delta \mathbf{B}_k^n, G_k^n, \text{charge}_k^n} [Deal_k^n + Fuel_k^n + Shortage_k^n \times Pe_k^n + E(V_{k+1}^n(S_{k+1}^n, \mathbf{B}_{k+1}^n, \mathbf{m}_{k+1}^n))] \quad \text{式(3.6)}$$

$$Deal_k^n = \sum_l \sum_{\mathbf{m}_{k+1}} \left\{ P(\mathbf{m}_{k+1} | \mathbf{m}_k) \times \sum_{i=\mathbf{m}_k}^{\mathbf{m}_{k+1}} \left( i \times (b_{i,l,k}^n + \Delta b_{i,l,k}^n) \right) \right\} \quad \text{式(3.7)}$$

$n$ : エージェントの番号

$k_n(t)$ : エージェント $n$ における意思決定のタイミング

同じ時刻 $t$ に対して、エージェントによって異なる $k$ を持つ

$S_k^n$ : エージェント $n$ の時点 $k$ での電力貯蔵量(kWh)

$\mathbf{B}_k^n$ : エージェント $n$ の時点 $k$ での入札量の行列(市場, 価格)

$\mathbf{m}_k(t)$ : 時点 $t$ における各市場の約定価格ベクトル

$\Delta \mathbf{B}_k^n$ : エージェント $n$ の時点 $k$ での入札量の変化分の行列(市場, 価格)

$G_k^n$ : エージェント $n$ の時点 $k$ での電源の動作

$\text{Charge}_k^n$ : エージェント $n$ が時点 $k$ で充電する電力量(kWh)

$Deal_k^n$ : エージェント $n$ が時点 $k$ の取引で支払った金額(円)

$Fuel_k^n$ : エージェント $n$ の時点 $k$ での電源の燃料費(円)

$shortage_k^n$ : エージェント $n$ の時点 $k$ での電力不足分(kWh)

$Pe_k^n$ : エージェント $n$ が時点 $k$ で不足した時に失う効用[円/kWh]

$l$ : 市場の番号

$P_l(\mathbf{m}_{k+1} | \mathbf{m}_k)$ : 市場 $l$ の約定価格が $\mathbf{m}_k$ から $\mathbf{m}_{k+1}$ に遷移する確率

$b_{i,l,k}^n$ : 行列 $\mathbf{B}_k^n$ の市場 $l$ , 価格 $i$ の成分

また、各エージェントは式(3.8), (3.9), (3.10)の制約条件式を満たしながら電力を運用していく。

$$G_k - D_k + Trade_k + Shortage_k = x_k \quad \text{式(3.8)}$$

$$x_k = Charge_k - Discharge_k \quad \text{式(3.9)}$$

$$\frac{S_{k+1}}{\delta_1} = S_k + \delta_2 \times Charge_k - \frac{Discharge_k}{\delta_3} \quad \text{式(3.10)}$$

$G_k$ : 時点 $k$ における発電量 ( $kWh$ )

$D_k$ : 時点 $k$ における需要 ( $kWh$ )

$Trade_k$ : 時点 $k$ での取引で得た電力量 ( $kWh$ )

$Charge_k$ : 時点 $k$ で充電を行う電力量 ( $kWh$ )

$Discharge_k$ : 時点 $k$ で放電を行う電力量 ( $kWh$ )

$\delta_1$ : 自然効率

$\delta_2$ : 充電時の効率

$\delta_3$ : 放電時の効率

式(3.8)は全体の電力の収支の式である。式(3.9)は充放電のいずれを行っているかを表しており、 $Charge$ と $Discharge$ のうち片方は常に0である。式(3.10)は充放電の効率を表現している。

FC に関してはさらに制約条件式(3.11)を加える。

$$FC_{\min} \leq G_k \leq FC_{\max} \quad \text{式(3.11)}$$

$FC_{\min}$ : 燃料電池の最低出力

$FC_{\max}$ : 燃料電池の最大出力

### 目的関数の簡易化

式(3.6)が、市場参加者が行動を確率動的計画法によって決定するための一般的な式である。しかし式(3.6)に含まれる状態変数・最適化の対象の場合の数は多く、計算する評価値が膨大になってしまう。ここで本研究では以下の簡易化を持って状態変数・最適化の対象を減らし、計算を行っていく。

#### ① 接続する市場の数

確率動的計画法によって行動を決定する市場参加者は、1 市場にのみ接続しているものとする。複数市場に接続する市場参加者は第 4 章で述べるような送電事業者によって表現されるものとする。

#### ② 電源の動作

PV の動作を仮定する場合、出力は時刻によって異なるが、制御は不可能であるとする。FC に関しては最低出力分に関しては常に出力しており制御不可能とし、昼間の時間帯(7~23 時)には負荷を追従するように運転を行う。さらに余力がある場合はその余力分を状態量として計算を行う。

#### ③ 入札について

毎回入札する直前に前回の注文の未約定分を取り下げるものとする。

以上の設定によって式(3.6),(3.7)は式(3.12),(3.13)のように簡略化される。

$$V_k^n(S_k^n, m_k^n) = \min_{B_k^n, G_k^n, charge_k^n} \left[ Deal_k^n + Fuel_k^n + Shortage_k^n \times Pe_k^n + E(V_{k+1}^n(S_{k+1}^n, m_{k+1}^n)) \right] \quad \text{式(3.12)}$$

$$Deal_k^n = \sum_l \sum_{m_{k+1}} \left\{ P(m_{k+1}:m_k) \times \sum_{i=m_k}^{m_{k+1}} (i \times b_{i,l,k}^n) \right\} \quad \text{式(3.13)}$$

### 入札パターンの簡略化

さらに計算の簡易化をするために入札パターンを設定する。一般的な需給曲線(図 3-1)に見られるように、買電時は安い価格ほど多く、売電時は高い価格ほど多く注文すると考えられる。よって、本研究でもこれに倣い三角形のような入札を行うことにする。入札パターンを売り買い(0,1)、底辺の長さ、高さ、最も低い入札価格の4種類( $i, j, k, l$ )で表現する。ここで  $j < k$  とする。

図 3-2 に  $(i, j, k, l) = (0, 5, 3, 5)$  のときの例を示す。これはすなわち売りのとき( $i=0$ )、最大で5単位( $j=5$ )、3つの( $k=3$ )入札を行う。ただし最低入札価格は5( $l=5$ )ということを示している。

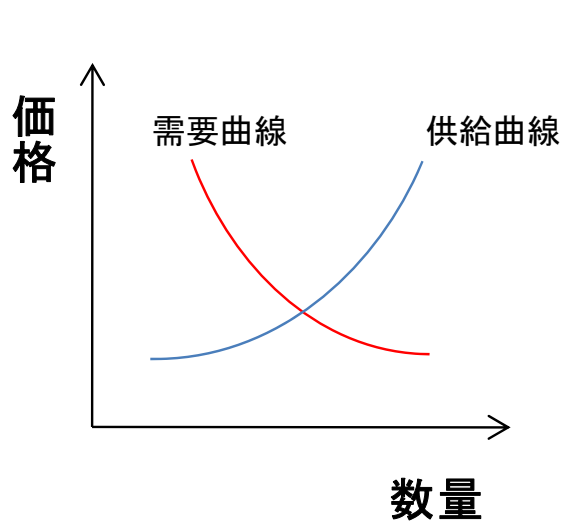


図 3-1 一般的な需給曲線

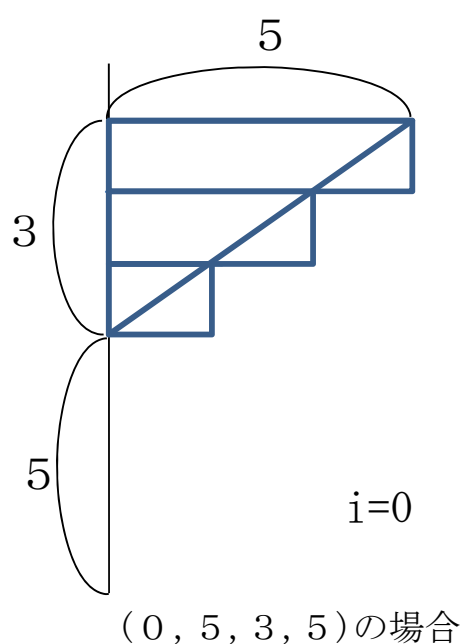


図 3-2 入札パターン例

### 3.1.3 EM アルゴリズム<sup>[18]</sup>

市場参加者は毎回の約定価格の遷移を記録し、学習していく。1 日を 24 の時間ステップに分け、ある時間ステップで約定価格を観測した際の前回の観測値からの遷移を学習していく。表 3-1 に市場参加者の持つ遷移確率表の例を示す。

本研究における電力取引では取り扱う価格帯は 5 円/kWh から 50 円/kWh の 46 価格帯であるが、学習、計算はそれを 10 段階に離散化して行うものとする。入札を行う際は前回約定価格の最も近い 2 つの価格帯の情報を重みづけして用いることとする。

本研究ではこの遷移確率表を学習し、更新していく手法として EM アルゴリズムという手法を用いる。EM アルゴリズムとは、反復法により、不完全な観測を伴うデータに基づくパラメータの最尤推定を行う方法である。すなわち、遷移確率表がある確率関数に従うものと仮定し、得られたデータからその確率関数の最も尤もらしいパラメータを求める手法であり、最尤法の一つである。

表 3-1 約定価格遷移確率表

前回観測した 約定価格帯	今回観測した約定価格帯									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.26	0.21	0.12	0.08	0.09	0.11	0.08	0.04	0.01	0.00
1	0.15	0.19	0.16	0.12	0.11	0.12	0.09	0.05	0.02	0.00
2	0.06	0.12	0.17	0.17	0.16	0.14	0.10	0.05	0.02	0.00
3	0.02	0.06	0.13	0.19	0.21	0.19	0.12	0.06	0.02	0.00
4	0.00	0.02	0.07	0.16	0.24	0.24	0.16	0.07	0.02	0.00
5	0.00	0.01	0.04	0.11	0.21	0.27	0.21	0.11	0.04	0.01
6	0.00	0.00	0.02	0.07	0.16	0.24	0.24	0.17	0.08	0.02
7	0.00	0.00	0.01	0.05	0.11	0.17	0.22	0.21	0.15	0.07
8	0.00	0.00	0.01	0.04	0.08	0.12	0.16	0.21	0.22	0.17
9	0.00	0.00	0.01	0.03	0.06	0.08	0.10	0.15	0.25	0.30

### 最尤法

未知パラメータベクトル  $\theta (\theta \in \Theta)$  を持つ確率関数  $f(\mathbf{x} | \theta)$  から成る分布によって生成された  $n$  個のデータ  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$  が与えられたとする。これらのデータは互いに独立にこの確率関数によって定義される分布に従う確率変数  $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n)^T$  の実現値  $X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n$  である。このとき観測  $\mathbf{X}$  の確率関数を

$$f(\mathbf{x} | \theta) = f(x_1, \dots, x_n | \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i | \theta) \quad \text{式(3.14)}$$

と書くことにする。この  $\mathbf{x}$  が固定されたと考え、式(3.13)はパラメータ  $\theta$  の関数と見ることができる。この関数のことを尤度関数と呼び、

$$L(\theta, \mathbf{x}) = f(\mathbf{x} | \theta) \quad \text{式(3.15)}$$

と書くことにする。

最尤法はこの式(3.15)を最大にするパラメータの値である最尤推定値  $\hat{\theta}$  を求めることにより推測を行う方法である。しかし多くの場合はこの最尤推定値を陽に得ることは難しく、その際には式(3.15)の自然対数をとった対数尤度

$$l(\theta, \mathbf{x}) = \log L(\theta, \mathbf{x}) = \log f(\mathbf{x} | \theta) = \sum_{i=1}^n \log f(x_i | \theta) \quad \text{式(3.16)}$$

を目的化数とし、パラメータ  $\theta$  を変数として最大化をはかる最適化問題を解くことによって  $\hat{\theta}$  を求めることが多い。

この尤度あるいは対数尤度の最適化手法として典型的に用いられている数値解法だが、尤度関数の最大化問題は尤度のパラメータによる 1 階微分

$$\frac{\partial}{\partial \theta} L(\theta, \mathbf{x}) = 0 \quad \text{式(3.17)}$$

あるいは対数尤度の 1 階微分

$$\frac{\partial}{\partial \theta} l(\theta, \mathbf{x}) = \frac{\partial}{\partial \theta} \log L(\theta, \mathbf{x}) = \frac{\partial}{\partial \theta} \log f(\mathbf{x} | \theta) = 0 \quad \text{式(3.18)}$$

から構成される尤度方程式を解く問題として捉えられる。

### EM アルゴリズムの計算手順

今、観測されたデータ  $\mathbf{y}$  に対応する確率変数を  $\mathbf{Y}$ 、確率密度関数を  $f(\mathbf{y} | \theta)$  とする。一方、欠測や何らかの欠損により計測値が得られていない観測に対する確率変数を  $\mathbf{Z}$  とする。このとき完全データに対する確率変数を  $\mathbf{X}^T = (\mathbf{Y}^T, \mathbf{Z}^T)$  とし、その確率変数を  $f^c(\mathbf{x} | \theta) = f^c(\mathbf{y}, \mathbf{z} | \theta)$  と書くことにすると EM アルゴリズムは次のような手順として定式化される。

①まず適当なパラメータの推定値を  $\theta^{(0)}$  とする。

②E ステップ

欠測  $\mathbf{Z}$  について、観測値  $\mathbf{y}$  が与えられたという条件のもとでその条件付期待値を求め、欠測となっている観測  $\mathbf{z}$  について擬似的な観測値として代入するという操作をする。一般的には関数

$$\begin{aligned} Q(\theta, \theta^{(0)}) &= E_{\theta^{(0)}} [l^c(\theta, \mathbf{X}) | \mathbf{Y} = \mathbf{y}] \\ &= E_{\theta^{(0)}} [\log L^c(\theta, \mathbf{X}) | \mathbf{Y} = \mathbf{y}] \end{aligned} \quad \text{式(3.19)}$$

を求める段階として捉えられる。

③M ステップ

欠測値  $\mathbf{z}$  を条件付期待値で置き換えて得られた擬似的な完全データに基づいて、完全な観測に関する尤度を最大化する。つまり E ステップで計算した  $Q(\theta, \theta^{(0)})$  を  $\theta$  の関数と考えて、

$$Q(\theta^{(1)}, \theta^{(0)}) = Q(\theta, \theta^{(0)})$$

となるようなパラメータ  $\theta^{(1)}$  を求める計算を行う。

④以上のような計算によって得られた  $\theta^{(1)}$  を更新されたパラメータとして  $\theta^{(0)}$  と入れ替えて E ステップと M ステップの計算を収束条件を満足するまで繰り返す。

### 遷移確率表への適用

まず、遷移確率表が2つの正規分布からなる混合分布であると仮定する。2つの正規分布は同じ分散であるとする、その確率関数は

$$f(x, y) = \sum_{j=1}^2 \xi_j f_j((x, y) | (\mu_{xj}, \mu_{yj}, \sigma^2, \rho)) \quad \text{式(3.20)}$$

$$\xi_1 + \xi_2 = 1$$

$$f_j((x, y) | (\mu_j, \sigma^2, \rho))$$

$$= \frac{1}{2\pi\sigma^2\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left[ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \frac{(x-\mu_{xj})^2}{\sigma^2} + \frac{(y-\mu_{yj})^2}{\sigma^2} - \frac{2\rho(x-\mu_{xj})(y-\mu_{yj})}{\sigma^2} \right\} \right]$$

$f_j$ : 母集団  $j$  の確率関数

$\mu_{xj}$ : 母集団  $j$  の  $x$  座標の平均

$\mu_{yj}$ : 母集団  $j$  の  $y$  座標の平均

$\sigma_j^2$ : 母集団  $j$  の分散

$\xi_j$ : 混合比率

$\rho$ : 相関係数

と書けるので EM アルゴリズムを用いてパラメータ更新式を得るとそれぞれ

$$\mu_{xj}^{(k+1)} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{ij}^{(k)} x_i}{\sum_{i=1}^n z_{ij}^{(k)}} \quad , \quad \mu_{yj}^{(k+1)} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{ij}^{(k)} y_i}{\sum_{i=1}^n z_{ij}^{(k)}} \quad ,$$

$$\xi_1^{(k+1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{i1}^{(k)} \quad , \quad \xi_2^{(k+1)} = 1 - \xi_1^{(k+1)}$$

$$\rho^{(k+1)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_{xj}^{(k+1)})(y_i - \mu_{yj}^{(k+1)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_{xj}^{(k+1)})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_{yj}^{(k+1)})^2}}$$

$$(\sigma^2)^{(k+1)} = \frac{1}{2n(1-(\rho^{(k+1)})^2)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 z_{ij}^{(k)} \left\{ (x_i - \mu_{xj}^{(k+1)})^2 + (y_i - \mu_{yj}^{(k+1)})^2 - 2\rho^{(k+1)}(x_i - \mu_{xj}^{(k+1)})(y_i - \mu_{yj}^{(k+1)}) \right\}$$

$$f_{ij}^{(k+1)} = \frac{1}{2\pi(\sigma^2)^{(k+1)}\sqrt{1-(\rho^{(k+1)})^2}} \times \exp \left[ -\frac{1}{2(1-(\rho^{(k+1)})^2)} \left\{ \frac{(x_i - \mu_{xj}^{(k+1)})^2}{(\sigma^2)^{(k+1)}} + \frac{(y_i - \mu_{yj}^{(k+1)})^2}{(\sigma^2)^{(k+1)}} - \frac{2\rho^{(k+1)}(x_i - \mu_{xj}^{(k+1)})(y_i - \mu_{yj}^{(k+1)})}{(\sigma^2)^{(k+1)}} \right\} \right]$$

$$z_{ij}^{(k+1)} = \frac{\xi_j^{(k+1)} f_{ij}^{(k+1)}}{\sum_{j=1}^2 \xi_j^{(k+1)} f_{ij}^{(k+1)}}$$

となる。

ここで  $z_{ij}$  は観測  $(x_i, y_i)$  がその部分母集団へ属するかを示す指示変数ベクトル  $\mathbf{z}_i$  の  $j$  番目の要素である。

### 遷移確率表の更新

まず初期値であるが、EM アルゴリズムは初期値設定にはあまり強く依存しないという特徴がある。今回は初期値を以下のように設定した。

$$\mu_{x1} = 7, \mu_{y1} = 7, \mu_{x2} = 3, \mu_{y2} = 3$$

$$\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 5$$

$$\xi_1 = \xi_2 = 0.5$$

$$\rho = 0.5$$

EM アルゴリズムの計算を行うためにはサンプルが必要である。そこでこの初期分布に従う乱数を最初から 40 個読み込んであるものとし、約定が起こるたびにそのときの値をサンプルに追加していき、EM アルゴリズムによって遷移確率表を更新していく。



### 3.1.4 市場参加者の行動決定手順

市場参加者は図 3-3 のフローチャートに従って行動する。

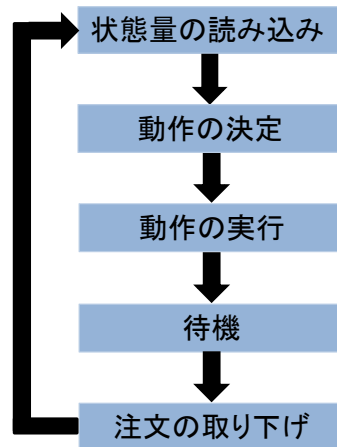


図 3-3 行動手順

#### 状態量の読み込み

市場参加者は自身の充電量と接続する市場の直前の約定価格を読み取る。

#### 動作の決定

読み込んだ状態量から、確率動的計画法を用いて各動作を決定する。

#### 動作の実行

各市場への入札を行う。

#### 待機

次の意思決定のタイミングまで、入札した注文の約定への対応を行う。本研究では市場との約定までのやり取りは図 3-4 のようになっている。

対当する注文があった際に注文を保持するのは、注文の約定に対して安全性を与える意味がある。例えば送電事業者のように一方で買った電力を他方で売る場合には両市場での約定が確保できることが送電の必要条件である。そのため、両市場での注文が約定したときのみ取引を行うことが可能になる。その他のエージェントにとっても望ましい取引が正しく行われるために、保持の段階が必要であると考えられる。

### 注文の取り下げ

本研究では前回までの注文の未約定分を状態量として持たないために、意思決定のタイミングが訪れると未約定分をすべてキャンセルする。

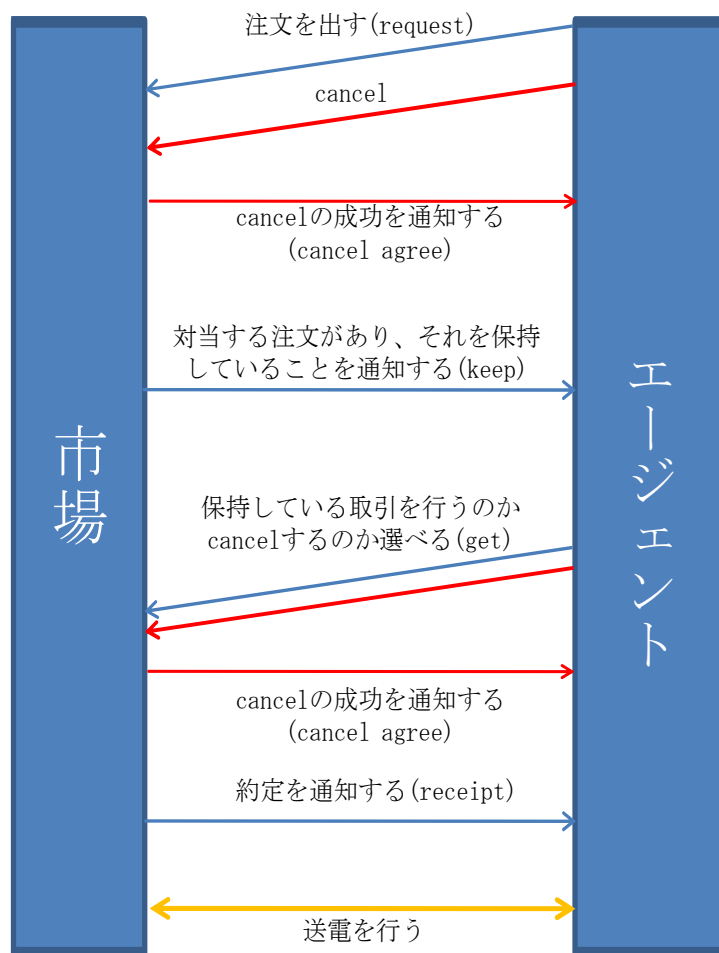


図 3-4 注文から約定までの手順

### 3.2 一般電気事業者

既存の電力会社のような大規模電源をもつ事業者も、本システムではインターフェイスを介して 1 つのエージェントとして各家庭と同等に市場に入札する。本節ではそのような大規模電源を所有する事業者の入札についてモデル化を行う。

分散型市場に参加する一般電気事業者は、各家庭にとって無限ともいえる発電量と貯蔵量を持っているように映る。つまり分散型市場のような小規模の市場において、一般電気事業者は無限の発電量・貯蔵量を持っているかのように振舞うと考えられる。

具体的な入札としては、一般電気事業者は自身の全体の電力の過不足を考慮しつつ、分散型市場の中では比較的高価格での売電と比較的低価格の買電を行うと考えられる。

このような入札を家庭のような小規模な市場参加者から見ると、悪条件でも必ず売買電を行いたい場合の取引相手として一般電気事業者は存在しているように映り、バックアップのような役割を果たすと考えられる。

本来は一般電気事業者の分散型市場への入札も一般電気事業者の最適化の結果、戦略的に行われるはずである。しかし、上記の理由から本研究では一般電気事業者は高価格の売電と低価格の買電を常に入札し続けるエージェントとする。

### 3.3 市場間送電事業者

分散市場型電力流通システムでは、一つのエージェントが複数の市場に参加することで全体の電力系統が形成されていく。エージェントは自身の利得を高めるためだけに行動を行うと考えられるので、あるエージェントが複数の市場に参加しているのも利得を最大化するための行動だと考えられる。そこで複数の市場に参加することで自身の利得を高めるエージェントのうち最も簡単なエージェントとして送電事業者の動作をシミュレートする。

ここでいう送電事業者とは、市場に参加するにあたって発電機やバッテリーを持たずに両市場の価格差をみて低価格の市場から調達した電気をそのまま高価格の市場の流すことで利益を得るエージェントを想定している。実際にはバッファなどの機器が必要だと考えられるが、ここでは簡単のために両市場で価格差のある約定を行った場合に送電が可能であるとする。片方のみの約定しか得られない場合は、それが買電ならば買った電力は捨て、売電ならばペナルティコストを払うものとする。

送電事業者の基本的な動作としては、接続する両市場の入札価格を観測し続け、価格差が生まれた時点で自動的に両市場に入札を行うこととし、自らの意思では入札は行わない。ただし、一方に買いの入札が出ており、他方に売りの入札が出ていない場合、提案する意味で両市場に入札を行うとする。図 3-5 に例を示す。

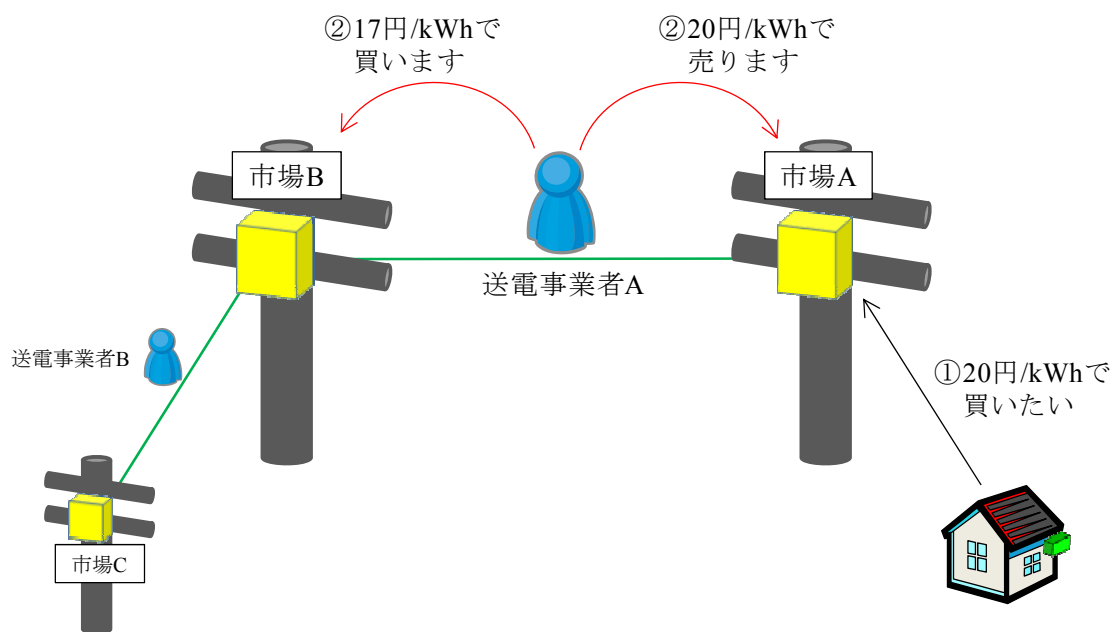


図 3-5 送電事業者の入札

今、市場 B には売りの入札がなく、市場 A に 20 円/kWh の買いの入札があるとする。この状態のとき、送電事業者 A は市場 A に 20 円/kWh で売りの入札を、市場 B に例えば 17 円 kWh の買いの入札を行う。すると、もし市場 C にさらに低い価格で売りの入札が出ている場合、送電事業者 B は市場 C から市場 B へ送電を行い、送電事業者 A はさらにそれを市場 A へ送電する。このようにして市場 C から市場 A へと電気が流れることになり、送電事業者の提案する意味での入札というのは接続しているさらに隣の市場の状況を間接的に観測できるようになるという意味がある。

逆に一方に売りの入札があるときにも送電事業者が他方に売りの提案を出すという行動も考えられるが、本研究では簡単化のため、一方に買い注文があり、他方に売り注文がないときとする。

### 3.4 RDBMS の利用

分散市場におけるザラバ仕法による電力取引では、各市場参加者が非同期的に市場にアクセスしていくことになる。入札、約定の起こるタイミングも非同期的であるために市場をモデル化する場合、同時実行制御性のあるシステムを用いなければならない。本研究ではこの問題を解決するためにリレーショナルデータベースを用いている。

#### 3.4.1 リレーショナルデータベース

データベースとは、蓄積されたデータを後から抽出・加工する、すなわち再利用することを目的としている。市場と市場参加者は入札のデータ、約定のデータ、入札の取り下げのデータ等をやり取りすることになる。市場参加者が作成したデータを市場が利用し、市場が作成したデータを市場参加者が利用する。そして市場は複数の市場参加者のデータを同時に扱わなければならない、これらのことを考えると市場のモデル化にはデータを効率良く扱うことができるデータベースの利用が必要であると考えられる。

リレーショナルデータベースというものについてまとめると以下のようなになる。

##### (1)データベース(DataBase:DB)

データをある関連性に着目してひとまとまりにしたもの。後から容易に抽出・加工などの再利用することを目的としている。

##### (2)データベース管理システム(DataBase Management System:DBMS)

コンピュータのデータベースを構築するために必要なデータベース運用、管理のためのシステム、およびソフトウェアのこと。データファイル、及びデータファイルにアクセスしてデータを管理する頭脳の部分、さらにアクセス手段をまとめてデータベース管理システムと呼ぶ。

##### (3)リレーショナルデータベース(Relational DataBase:RDB)

関係モデルに基づいて設計、開発されるデータベース。データは 2 次元の表に格納されており、複数のデータ間の関係を定義することによってデータを効率的に管理する。「番地」のような物理的なデータの格納位置を意味する概念はなく、ユーザーは SQL 文などを使って物理的な格納順序に関わらず、集合理論に基づいてデータを扱うことができる。

##### (4)リレーショナルデータベース管理システム

(Relational DataBase Management System:RDBMS)

リレーショナルデータベースを制御する頭脳を備えたソフトウェア。

### 3.4.2 市場のモデル化

図 3-4 に示した市場と市場参加者のやり取りを図 3-6 に示すようにデータベースを介して行うものとする。本研究では Microsoft の SQL Server 2008 を利用した。

市場及び市場参加者は ODBC ドライバを介してデータベースに接続し、入札や約定の情報の書き込みと読み込みを行う。RDBMS は複数のユーザーが同時に同一のデータを参照・更新した場合でも矛盾なく正常に処理をこなす機能があるので、複数のパソコンからプログラムを実行することが可能になり、今回の例ではエージェントの数を増やしたシミュレーションが可能となる。

例えば家庭 1 が入札をキャンセルするとき、まず家庭 1 はキャンセルの情報をデータベースのテーブルに書き込む。すると市場側はそのキャンセルの情報を読み取り、処理をした後にキャンセルが成功したという情報をデータベースに書き込む。そしてまた家庭 1 は正常にキャンセルが行われたという情報を読み取り次の入札を行う。

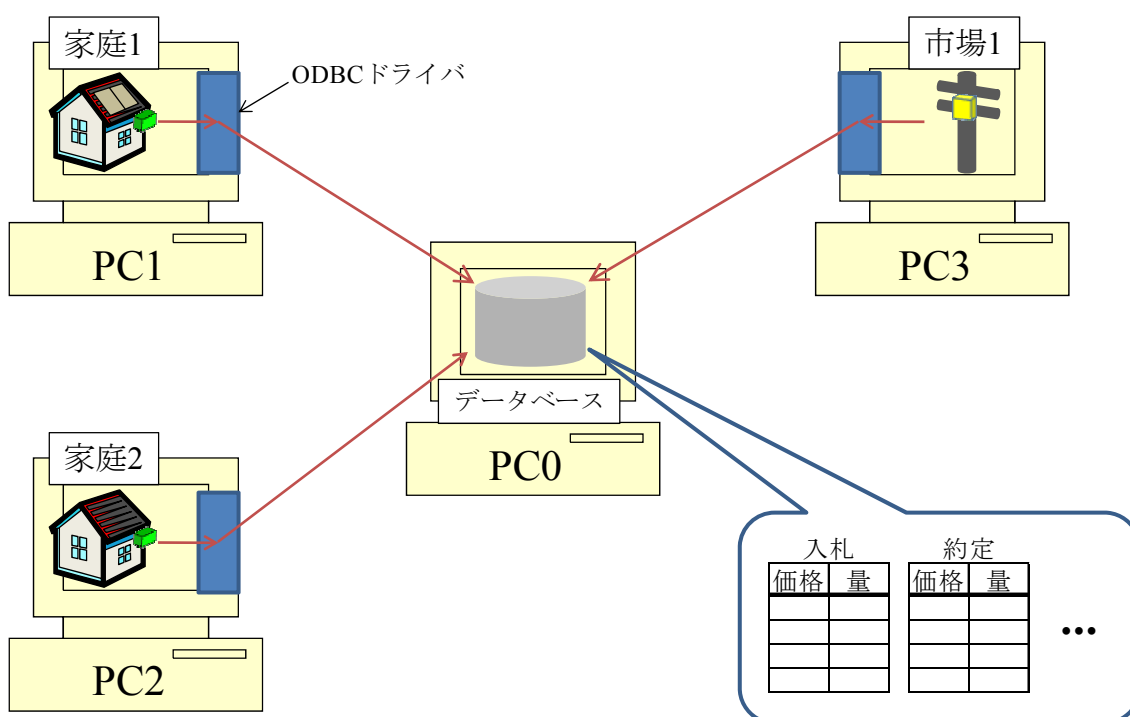


図 3-6 データベースを用いた市場のモデル化

## 第4章 電力取引シミュレーションによる提案方式の評価

本研究では各人が自身の利得を最大化する行動を取ると想定している。それぞれの市場参加者が個々に異なる意思決定を行うことを表現するために、本研究では一つのプログラムで一人の市場参加者をシミュレートする。また、一つの市場も単一のプログラムとすることで、市場の市場参加者との独立性・情報の機密性を表現している。以下の章の結果は市場参加者・市場のプログラムを並列に動作させたものである。

### 4.1 諸条件

#### 4.1.1 市場及び市場参加者の特性

表4-1 市場・市場参加者の特性

市場の特性	入札価格帯	46
	最低入札価格	5円/kWh
	最高入札価格	50円/kWh
	入札単位電力量	100Wh
市場参加者の特性	自然放電効率 $\delta_1$	0.99[%/hour]
	充電効率 $\delta_2$	0.95[%/1回]
	放電効率 $\delta_3$	0.95[%/1回]
	入札間隔	ランダム (平均30分,分散5分)
	最大入札数	5単位
	ペナルティコスト	60円/kWh

表 4-1 に市場および市場参加者の特性を示す。取り扱う価格は 5[円/kWh]から 50[円/kWh]まで 1 円刻みで 46 価格帯、100Wh を 1 単位として取引を行っていく。入札間隔は図 4-1 の分布に従うようにランダムで入札を行うものとする。

本研究でモデル化を行ったのは市場、太陽光発電設備のある家庭である PV 家庭、燃料電池を持つ FC 家庭、発電設備を何も持たない家庭であるベース家庭、昼間に需要を持つような事務所、電力会社、送電事業者である。以下の節で各市場参加者の設定について述べる。

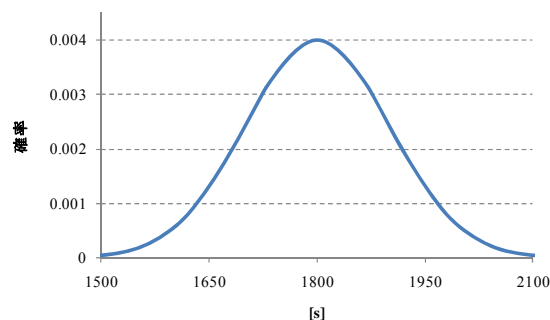


図 4-1 入札間隔



#### 4.1.2 需要

家庭の需要に関しては本研究では、社団法人日本建築学会「住宅におけるエネルギー消費量データベース」<sup>[19]</sup>の関東地方のデータをもとに、1日当たりの需要の総量の近い需要20パターンを用いた。図4-2に今回用いた30分ごとの負荷曲線を示す。一日の中では似通った負荷の傾向を持つものの、各時間帯での負荷は大きく異なる。各家庭はそれぞれが図4-2の中から毎日1本の負荷曲線をランダムで選び、その負荷を満たすために行動を決定していく。なお、これらの需要の一日の総量は約14[kWh/day]である。

事務所の需要としては日本建築学科大会学術講演梗概集の原、湯沢、他「非住宅建築物の環境関連データベース構築に関する研究 その11 関東地区における非住宅建築物の時刻別エネルギー消費量調査」<sup>[20]</sup>において求められた事務所の時刻別エネルギー消費パターン曲線を用い、一日の需要が約30[kWh/day]となる設定にした。図4-3に今回用いた負荷曲線を示す。

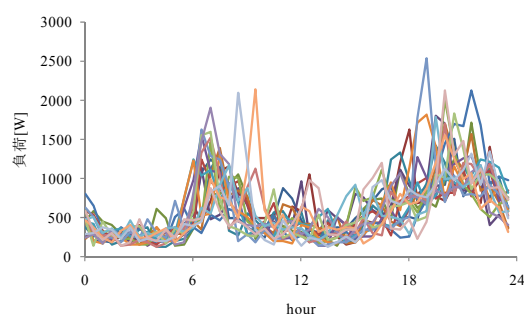


図 4-2 家庭の負荷曲線

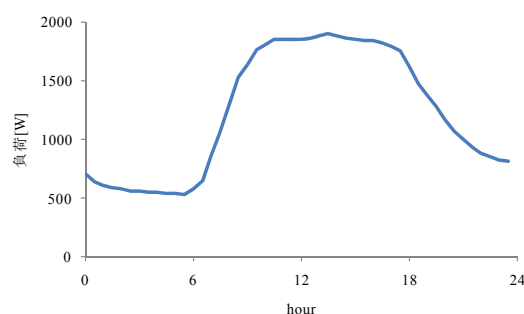


図 4-3 事務所の負荷曲線

#### 4.1.3 発電量

PVの発電パターンであるが、本研究室では過去にアメダスのデータよりPVの発電量の算出を行った。(2002年度米津卒業論文<sup>[21]</sup>)このうち、関東の夏季最大出力のものをPVの発電効率として利用している。図4-4は各時刻における発電効率であり、これにPVの設備容量をかけたものが出力となる。

燃料電池を持つ家庭は最低出力と最高出力の間で負荷を追従するように燃料電池の運転を行い、7時から23時の間は余力があれば入札を行うことができるものとする。図4-5にその発電の様子を示す。

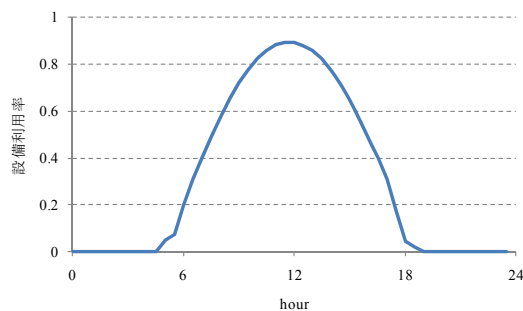


図 4-4 PV の設備利用率

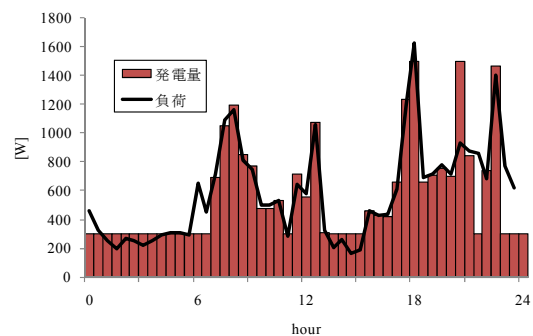


図 4-5 FC 家庭の発電の様子

#### 4.1.4 一般電気事業者

一般電気事業者は、実際には大規模需要家への電力供給を含めた自身の電力の最適運用の結果として分散型市場への入札額を決定する。しかし、今回は一定の価格で入札し続けるエージェントとして存在させる。

一日を大きく昼間と夜間にわけ、それぞれの入札額を表 4-2 のように設定する。

表 4-2 電力会社の時間帯別入札価格

	昼間 (7時～23時)	夜間 (～7時, 23時～)
売電価格[円/kWh]	30	12
買電価格[円/kWh]	10	6

#### 4.1.5 市場間送電事業者

3.3 で述べたように送電事業者は、接続する一方の市場の売り入札価格と、他方の買い入札価格に差が現れたときに両市場に入札を行う。本研究ではその価格差を 3[円/kWh]と設定する。また、一方に買い入札があり、他方には売り入札が出ていないときも入札を行うと述べたが、その価格も買い入札から 3[円/kWh]差し引いた価格とする。

## 4.2 各エージェントの行動の傾向

3 章でモデル化を行った各市場参加者がどのような行動を取るか、基本的な行動の傾向を確認するために図 4-6 に示す条件でシミュレーションを行った。また、各市場参加者の設備に関しては表 4-3 のように設定した。

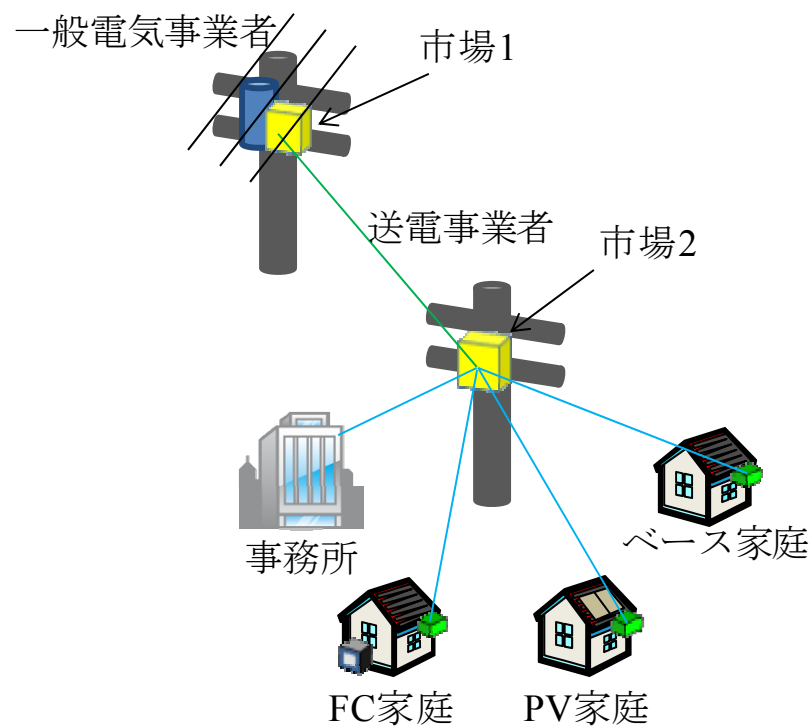


図 4-6 シミュレーション設定

表 4-3 各市場参加者の設定

	設備容量[kW]	バッテリー容量[Wh]
PV家庭	3.5	2000
FC家庭	1.5	1000
ベース家庭		600
事務所		1000

### 4.2.1 約定価格

図 4-7 にシミュレーション開始後 12 日目の市場 1 における約定価格の推移を、図 4-8 にその 30 分毎の平均を取ったものを示す。また同様に、図 4-9, 10 に市場 2 における結果を示す。

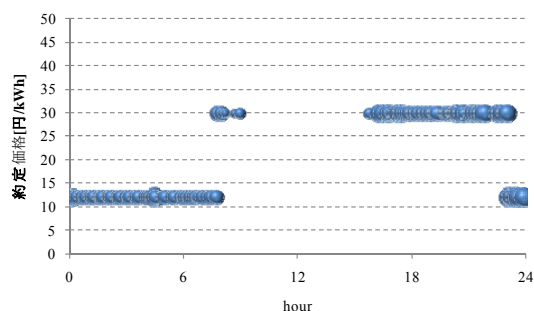


図 4-7 市場 1 の約定価格の推移

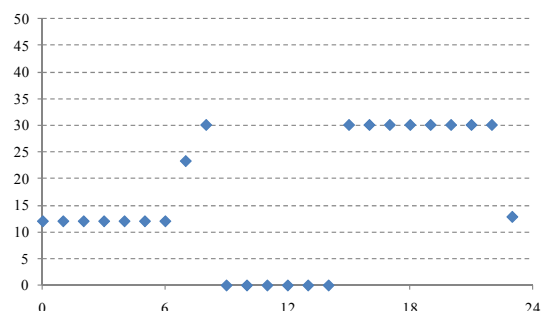


図 4-8 市場 1 の約定価格の 30 分平均値

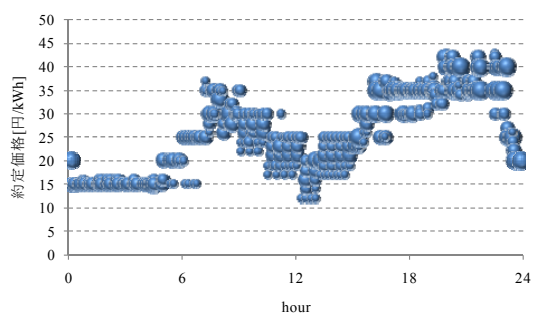


図 4-9 市場 2 の約定価格の推移

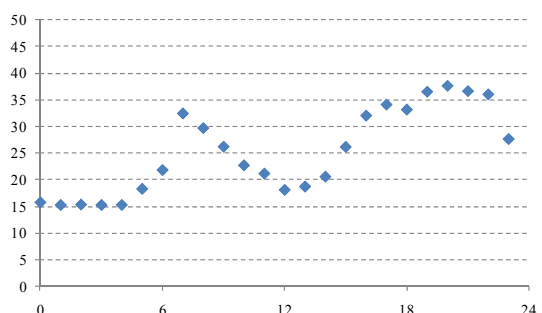


図 4-10 市場 2 の約定価格の 30 分平均値

図 4-7, 9 では横軸に約定の起こった時間、縦軸に約定価格を取り、大きさが約定量を表している（最大 500Wh）。図 4-8, 10 には 30 分ごとに約定価格の平均を取って示した。価格が 0 になっているのは約定が起こっていないことを示している。

市場 1 で起こるのは電力会社と送電エージェントの約定のみであり、電力会社は一定の価格で入札を行い続けているため、昼間は 30[円/kWh]、夜間は 12[円/kWh]でしか約定が起こっていない。

市場 2 の約定価格の推移を見ると 12 時付近が最も約定価格が低くなっており、朝方と夕方から夜にかけて約定価格が高くなっている。これは、昼間は PV の出力も最大になり、かつ家庭の負荷も小さいことから電力が余剰気味になっているために価格が下がっていると考えられる。図 4-7 を見ても昼間は電力会社が売電を行っていないので市場 2 では電力が余剰気味になっていることが分かる。朝方と夕方から夜にかけては PV の出力も落ち、家庭の負荷が大きくなることから電力が不足気味になり、約定価格が上がっていると考えられる。

昼間、市場 2 に送電事業者が送電してくれる電力は最も安くて電力会社の売電価格に 3[円/kWh]上乗せした昼間 33[円/kWh]、夜間 15[円/kWh]であるが、昼間はその価格を超えて約定が起こり、夜間はその価格で安定して約定が起こっている。これは、夜間は負荷が小さく、昼間は負荷が大きいときもあるからであるが、このように売り手が 1 人しかいないときは最低約定価格で安定し、売り手が複数いるときに約定価格が高くなるということが起こるのは、分散市場に電力の過不足を反映する適正な価格を形成する機能があるからであると言える。

ここで、市場 2 に接続する全ての市場参加者の発電量と負荷の総和と、平均約定価格をグラフにすると図 4-11 のようになる。このグラフからも価格が電力の過不足に応じて推移している様子が分かる。

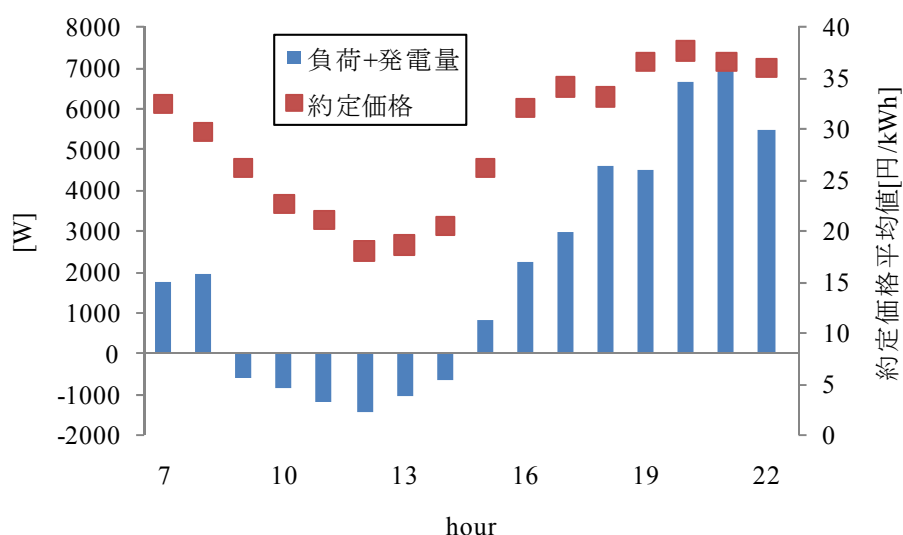


図 4-11 市場参加者の負荷と発電量の総和と平均約定価格

## 4.2.2 PV 家庭

シミュレーション開始 12 日目の PV 家庭の 30 分毎の売買の様子を図 4-12 に、バッテリー貯蔵量の様子を図 4-13 に、30 分ごとの不足量を図 4-14 に、そして約定の様子を図 4-15 に示す。

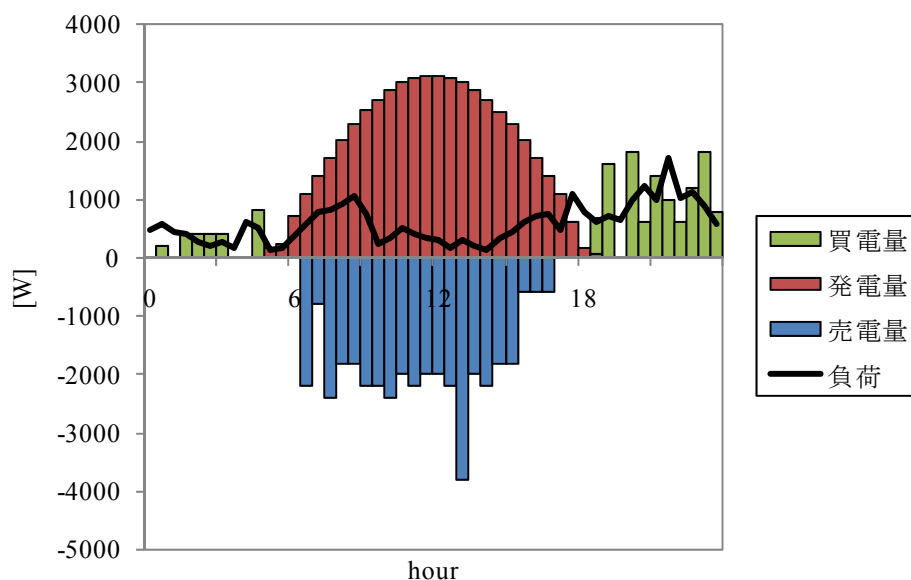


図 4-12 PV 家庭の負荷と売買量の様子

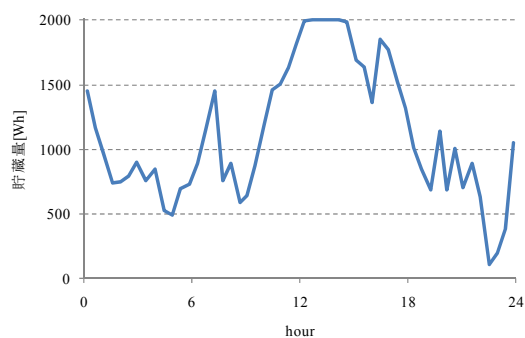


図 4-13 バッテリー貯蔵量

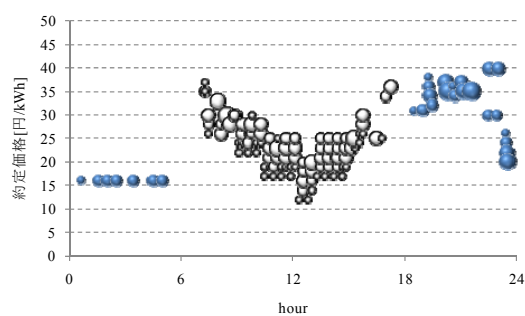


図 4-14 PV 家庭の約定の様子  
(青：買電，白：売電)

PV の発電が始まるとバッテリーを徐々に貯めながら売電を行っている。PV の発電能力がなくなるとバッテリーの電力を使いつつ買電し、電力会社の料金が変わる 23 時頃にバッテリーをほぼ使い切り、23 時以降に安い価格で買電を行うという運用をしている。

昼間売電する価格についてはやはり PV の発電が少なく、負荷の大きい朝と夕方には高価格になっており、PV 発電量が多く負荷の小さい 12 時付近には低価格になっている。

### 4.2.3 FC 家庭

FC 家庭のシミュレーション開始 12 日目の様子を同様に図 4-15～17 に示す。

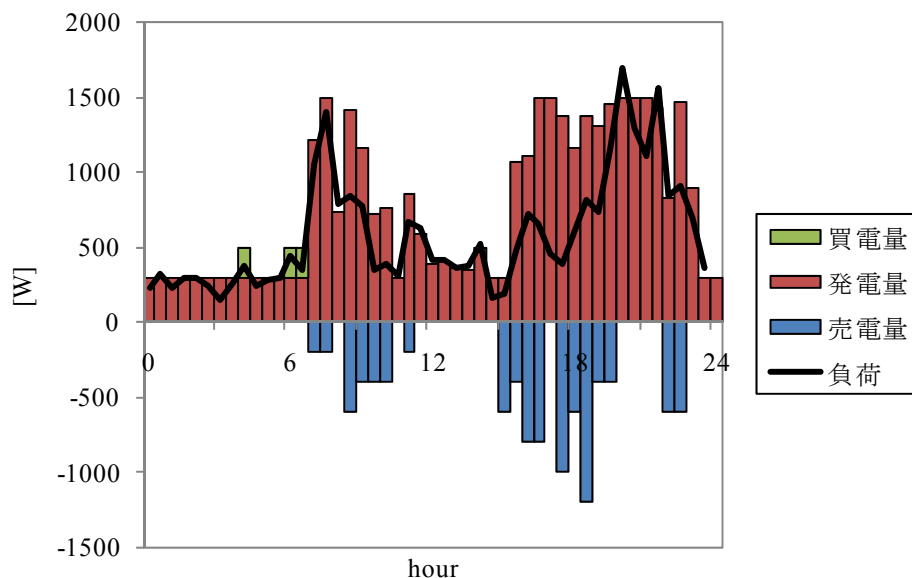


図 4-15 FC 家庭の負荷と売買量の様子

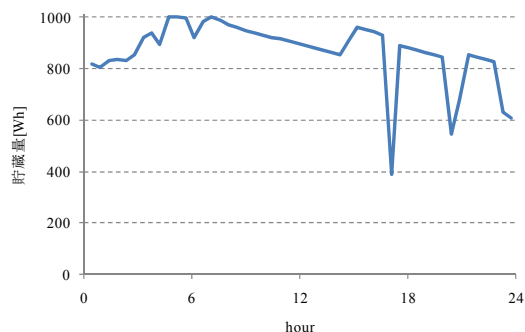


図 4-16 バッテリー貯蔵量

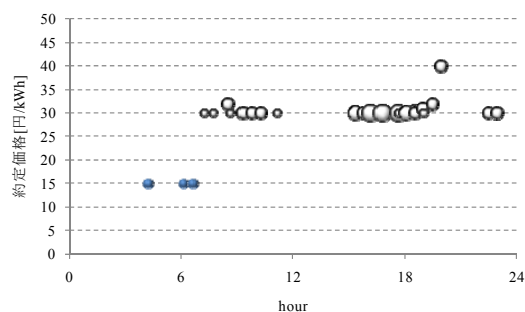


図 4-17 FC 家庭の約定の様子  
(青：買電，白：売電)

PV 家庭が最も低価格で売電を行う 12 時付近には売電せず、高価格で売ることができる朝方と夕方以降に売電するという結果になった。FC 発電コストは 13[円/kWh]と設定しているので、14[円/kWh]以上で売電できれば利得を得ることができるが、低い価格での約定は見られなかった。

#### 4.2.4 ベース家庭

ベース家庭のシミュレーション開始 12 日目の様子を図 4-18～20 に示す。

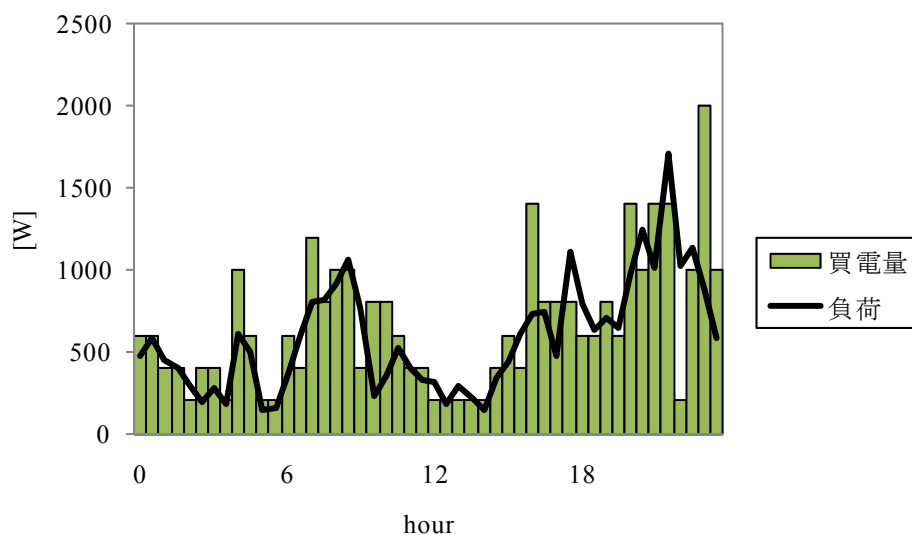


図 4-18 ベース家庭の買電量の様子

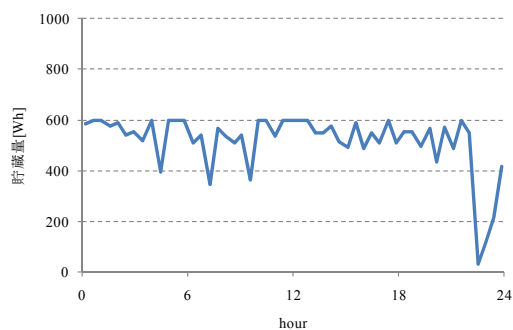


図 4-19 バッテリー貯蔵量

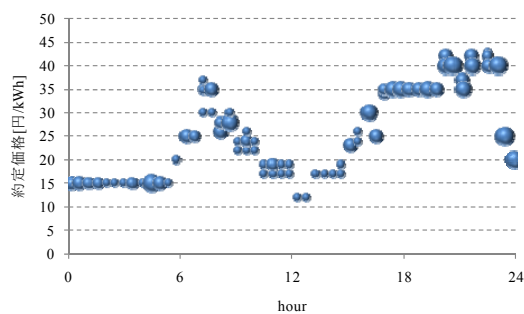


図 4-20 ベース家庭の約定の様子

発電能力を持たないベース家庭は、バッテリーの貯蔵量をほぼ最高に保ちつつ、そのときの負荷の分だけ買電を行うという結果になった。また、やはり電力会社の価格が切り替わる 23 時直前は買電せずバッテリーから電力を使い、23 時以降に安い電力を買ってまたバッテリー満たすという行動を取っている。

買電の約定価格はほぼ自らの負荷曲線と同じような推移を取るという結果になっている。



## 4.2.5 事務所

ベース家庭のシミュレーション開始 12 日目の様子を図 4-21～23 に示す。

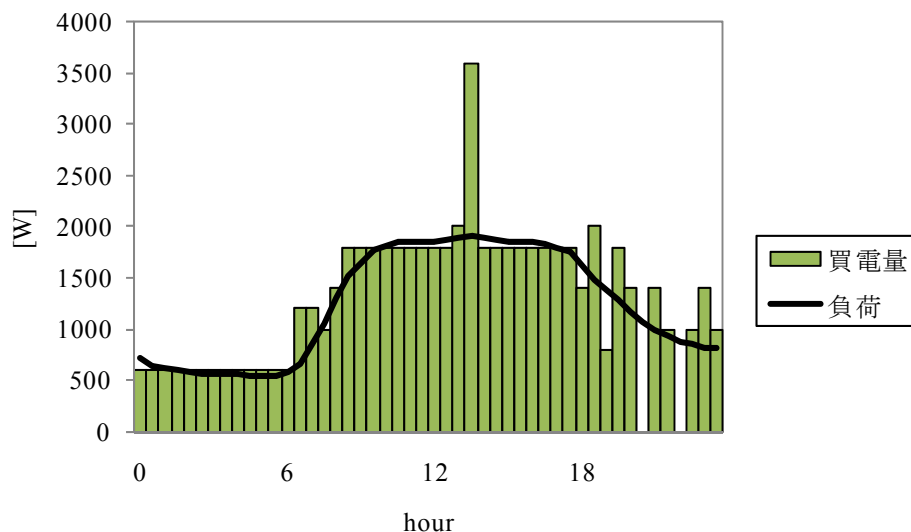


図 4-21 事務所の買電量の様子

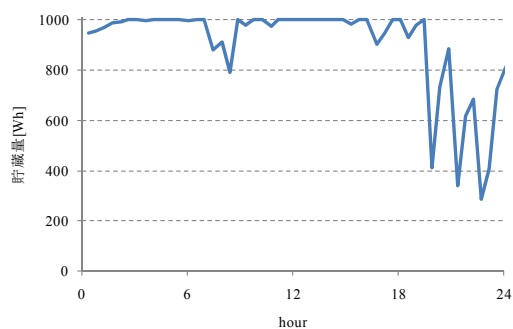


図 4-22 バッテリー貯蔵量

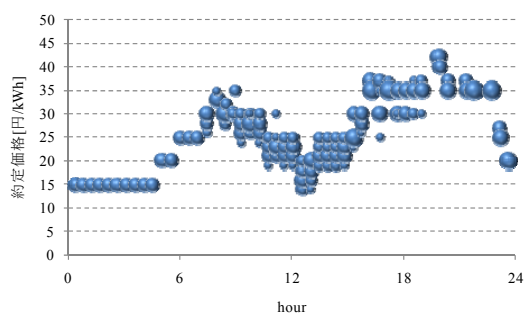


図 4-23 事務所の買電の約定の様子

ベース家庭とほぼ同じ行動を取っているが、バッテリーの貯蔵量に関しては、昼間は常に最高まで貯めており、23 時直前に関してはベース家庭や PV 家庭ほどギリギリまでは使っていない。これは家庭に比べて負荷が大きいため家庭に比べて多めに貯蔵量を保っておきたいという行動であると考えられる。

買電する価格の 1 日の推移もベース家庭と同じ推移になっており、負荷の大きい昼間に低い価格で買電することができている。

#### 4.2.6 入札

次に1日の各市場参加者の入札の様子を図4-24～27に示す。

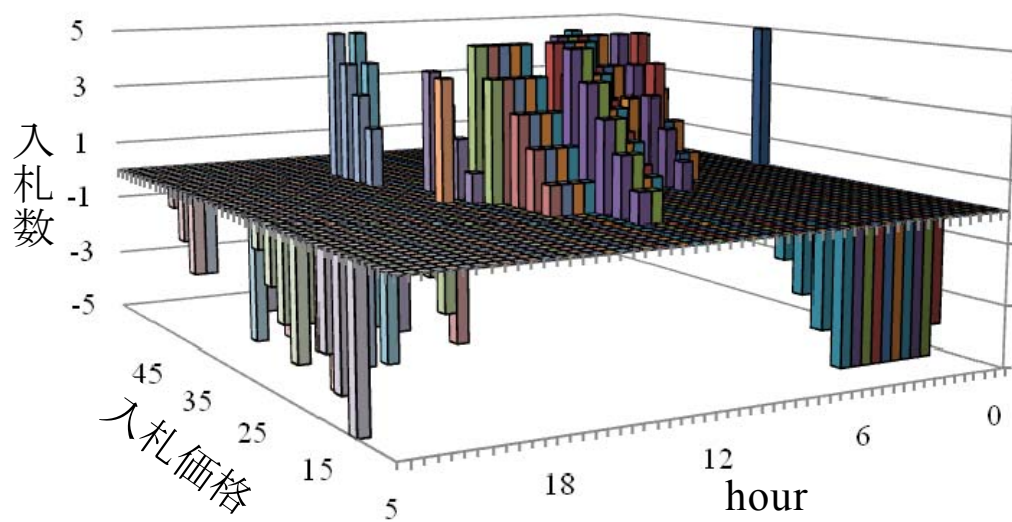


図 4-24 PV 家庭の入札の様子

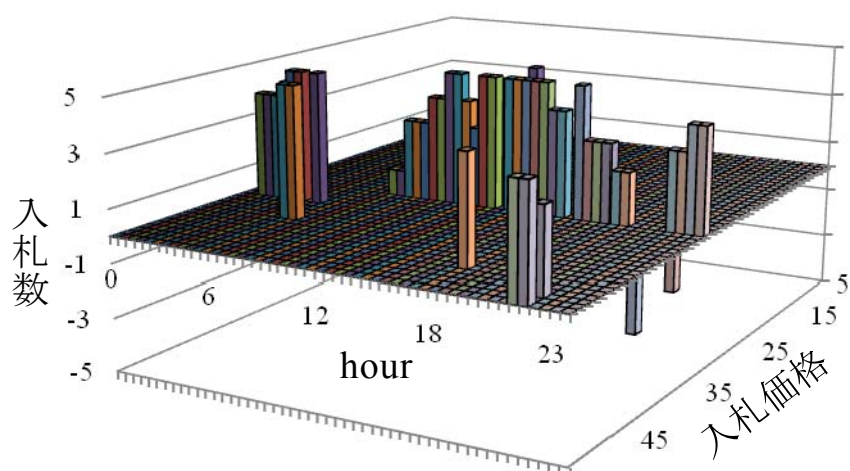


図 4-25 FC 家庭の入札の様子

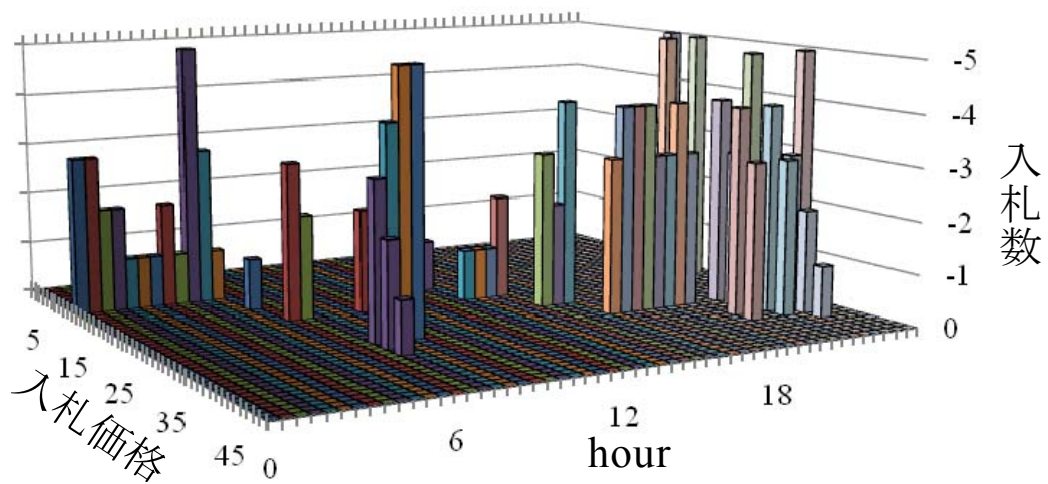


図 4-26 ベース家庭の入札の様子

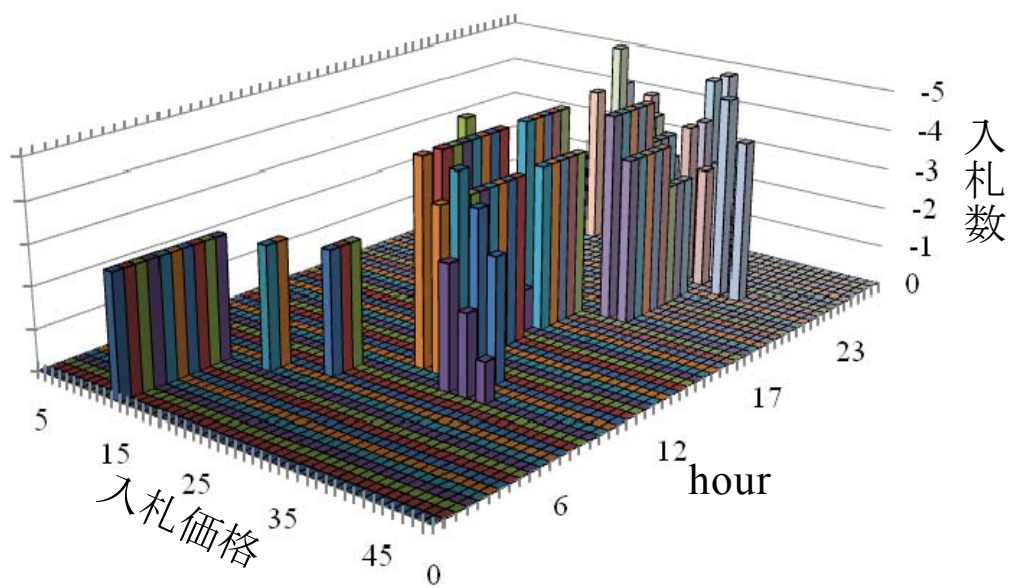


図 4-27 事務所の入札の様子

いずれも入札数が正のときは売りの入札、負のときは買いの入札を示している。ベース家庭と事務所は買いの入札しか行わないため下方方向に伸びる棒グラフとなるが、ここでは見やすくするために軸を反転させ上方方向に伸びる棒グラフで示している。PV 家庭は昼間は低価格での売り入札、夕方に高価格での売り入札、その後 23 時までは高価格の買い入札を行い、深夜帯は低価格での買い入札を行っている。

FC 家庭についてはほぼ一貫して 25[円/kWh]での売り入札を行うという行動を取っている。そして深夜帯では高価格の売り入札を行っているが、この時間帯は燃料電池は最低出力しか行っていないため、自らの負荷に対して発電量が少ない。その需給バランスを考慮に入れた結果の入札であると考えられる。

ベース家庭と事務所に関しては自らの負荷を反映したような価格での買い入札を行っている。ベース家庭は朝方と夜、高価格の買い入札を行い、事務所は昼間も夜間もある一定の価格の買い入札を行っている。

このようにそれぞれの市場参加者が電力の過不足を考慮に入れて入札を行う。市場にはこれらの入札が集まった結果、市場全体の過不足を反映するような価格が形成されていく。

#### 4.2.7 遷移確率表の学習

ここで遷移確率表の学習の様子について述べる。3.1.3 で述べたように市場参加者は約定価格遷移確率表を時刻ごとに持っている。分散市場では市場によって約定価格は異なり、遷移確率も異なる。そこで図 4-28 に示す 2 つのケースに関して遷移確率表の学習の様子を比較する。

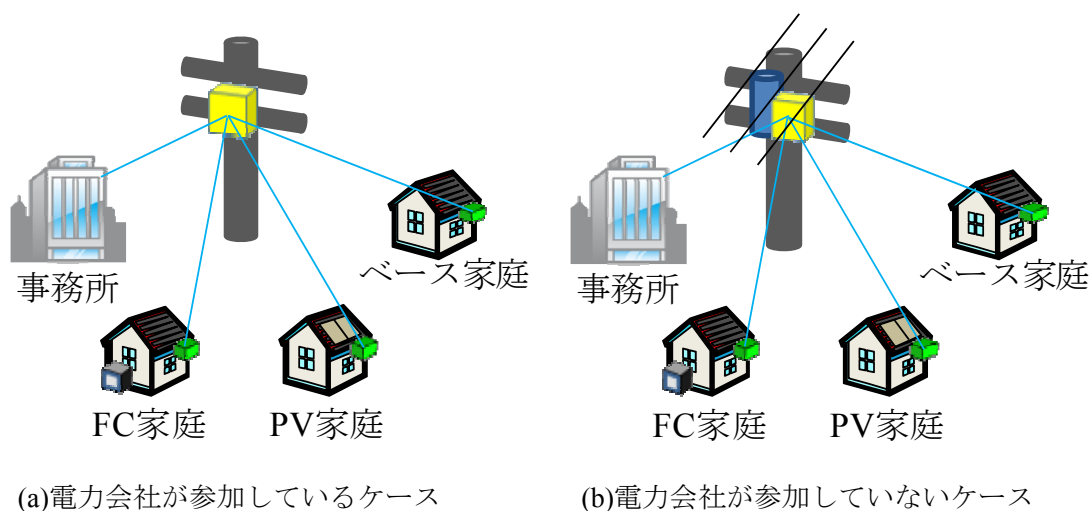


図 4-28 約定価格の異なる 2 つのケース

ケース(a)を電力会社が参加していないケース、ケース(b)を電力会社が参加しているケースとし、これらの 2 つの市場でのシミュレーション開始後 12 日間経過したときの約定価格の 1 日の推移とその 1 時間平均を図 4-29～32 に示す。

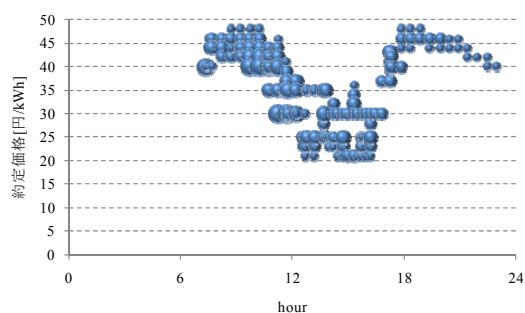


図 4-29 約定価格の推移  
(ケース(a))

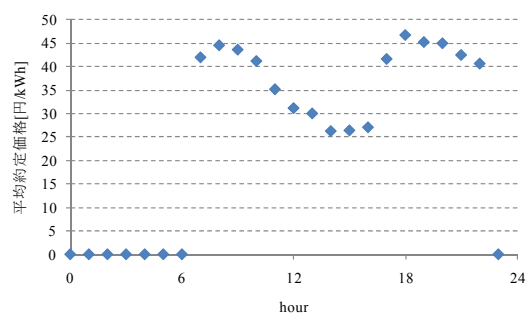


図 4-30 約定価格の 1 時間平均  
(ケース(a))

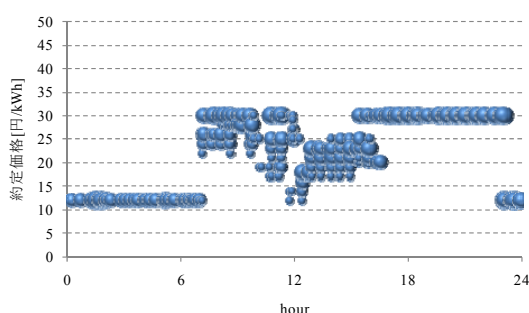


図 4-31 約定価格の推移  
(ケース(b))

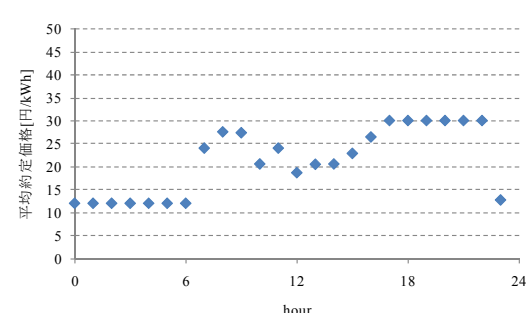


図 4-32 約定価格の 1 時間平均  
(ケース(b))

電力会社が市場に参加していれば、昼は 30[円/kWh]で、夜は 12[円/kWh]で電力を無限に売電してくれているために各時間帯ともその価格を超えて約定が起こることはないが、電力会社が参加していない市場ではほぼ最高価格まで約定が起こっている。また図 4-31 において、約定価格の 1 時間平均値が 0 になっているのは電力会社が参加していない市場では電力を提供する参加者がいなくなる夜 23 時台から翌朝 6 時台までは約定が起こらないことを示している。

ここで各ケースの 9 時の約定価格遷移確率表について比較を行う。ケース(a)の 9 時台の平均約定価格は 43[円/kWh]、ケース(b)では 22[円/kWh]となっている。それぞれのケースにおけるベース家庭の 9 時の約定価格遷移確率表について、シミュレーション開始 0 日目、4 日目、12 日目の様子を図 4-33～38 に示す。

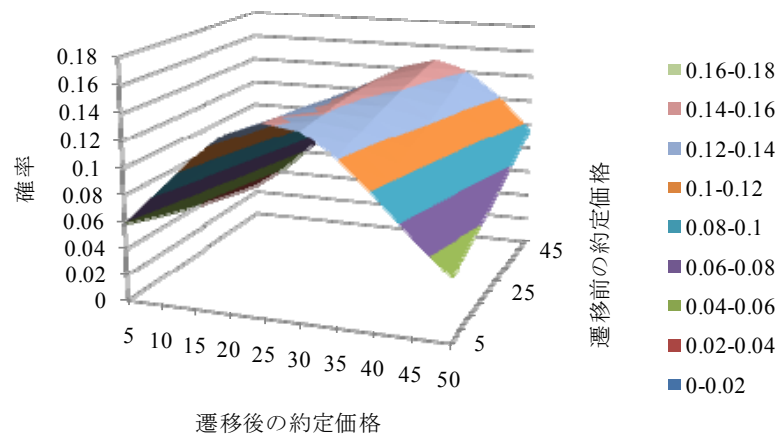


図 4-33 0 日目 (ケース(a))

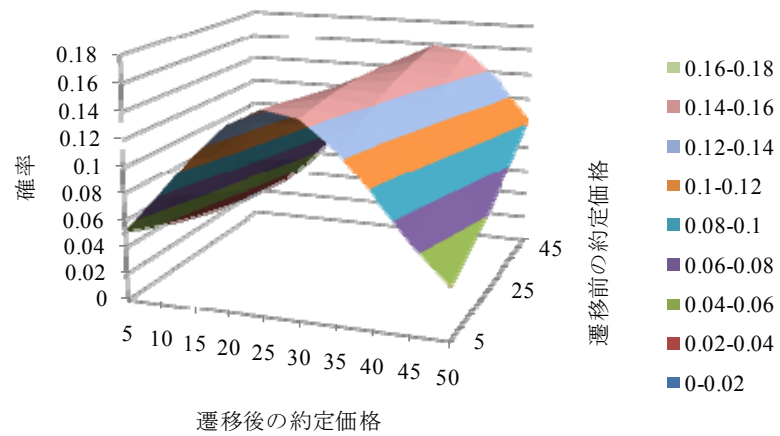


図 4-34 4 日目 (ケース(a))

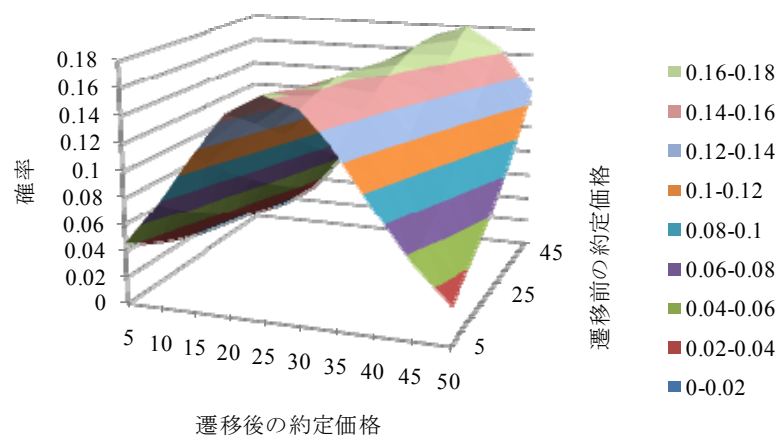


図 4-35 12 日目 (ケース(a))

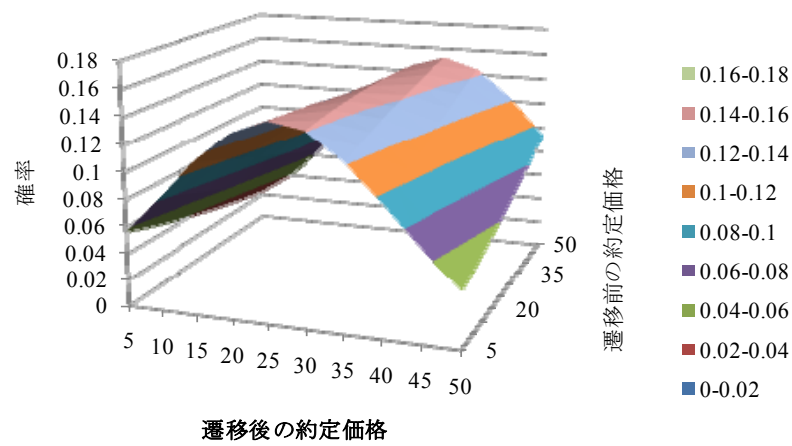


図 4-36 0 日目 (ケース(b))

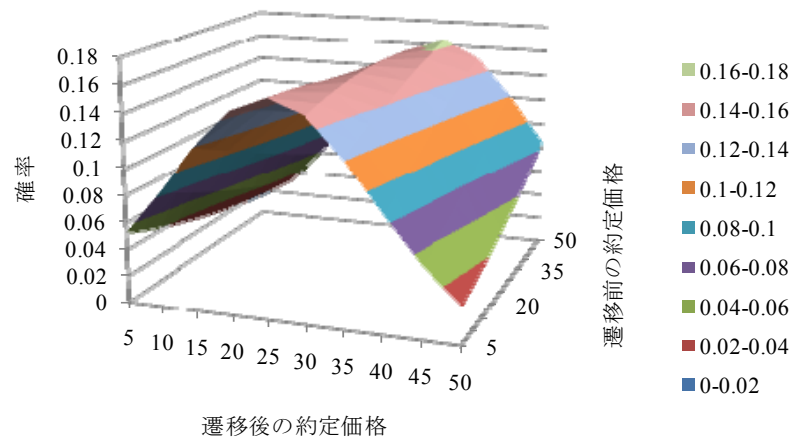


図 4-37 4 日目 (ケース(b))

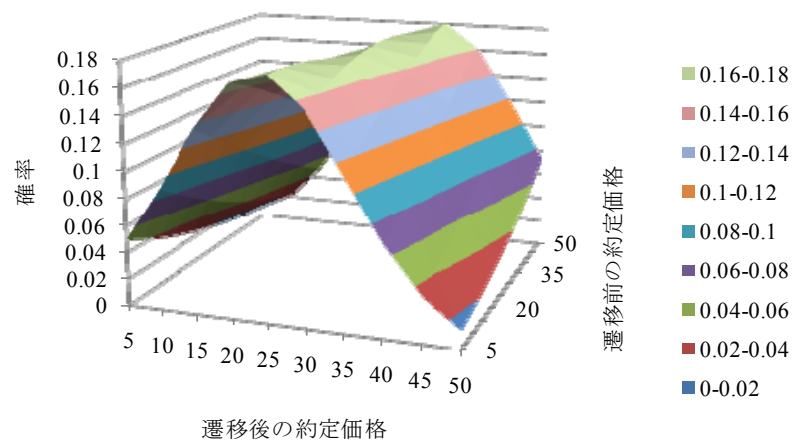


図 4-38 12 日目 (ケース(b))



時間がたつごとに勾配が急になっていく様子が観測できる。ここで遷移前の約定価格 25[円/kWh]で切ったときの 2 次元のグラフについて比較を行うと図 4-39 のようになる。

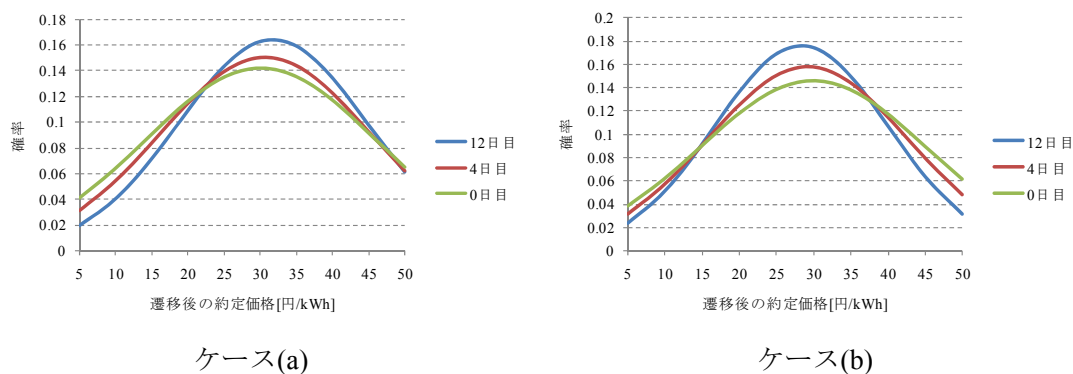


図 4-39 遷移前の約定価格が 25[円/kWh]のときの遷移確率

初期状態では前回の約定価格が 25[円/kWh]ならば次は 30[円/kWh]となる確率が一番高いと学習されている状態であるが、電力会社が参加していないケース(a)では、電気が不足気味なので今回はさらに高めの約定価格となる確率が高くなると学習されている様子が分かる。電力会社が参加しているケース(b)では電力が不足することはないので前回約定価格が 25[円/kWh]ならば今回も 25[円/kWh]である確率が一番高いと学習されていく様子が観測できる。

このように各市場参加者は電力の過不足に対して妥当な学習を行っていることが確認できた。



### 4.3 一般電気事業者の参加形態の異なる市場

分散型市場では全ての市場に一般電気事業者が直接参加しているわけではなく、中には市場間送電事業者を介して市場に参加しているケースもあり得る。そこで本節では一般電気事業者の参加形態が市場価格と市場参加者に与える影響を調べるため、図 4-40 に示す条件でシミュレーションを行った。

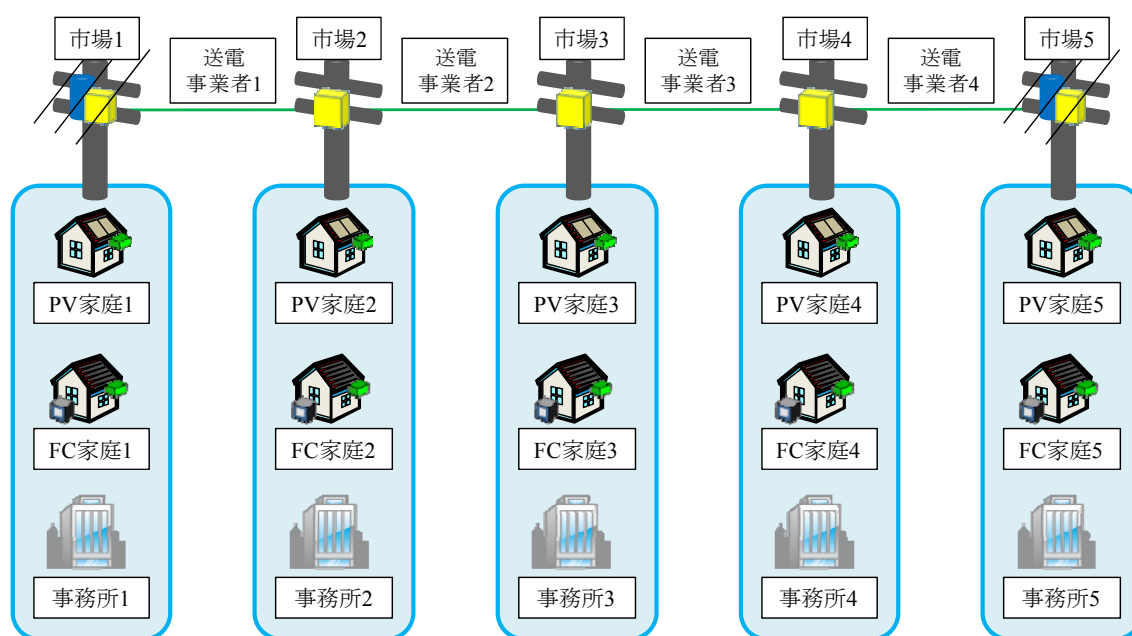
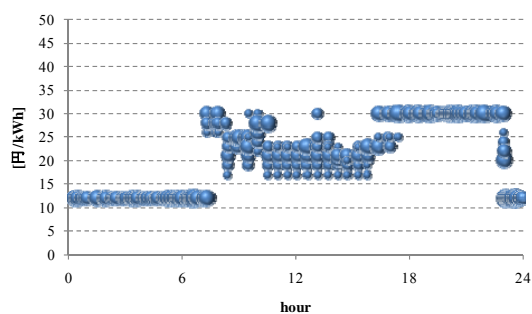


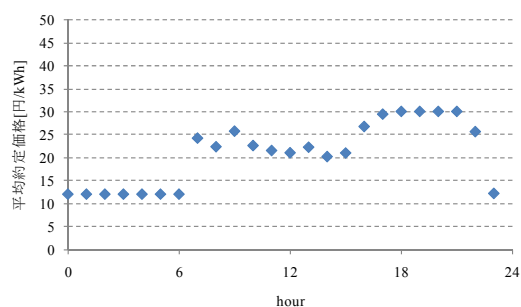
図 4-40 一般電気事業者の参加形態が異なる市場

PV 家庭、FC 家庭、事務所の 3 軒からなる市場が 5 つ、市場間送電事業者によってつながっている。市場 1 および市場 5 には一般電気事業者が接続しており、市場 2, 3, 4 には一般電気事業者は直接接続していないため、この市場に属する市場参加者が一般電気事業者から買電もしくは売電を行うためには市場間送電事業者を介さなければならない。

図 4-41～45 に各市場のシミュレーション開始 12 日目の約定価格の様子を示す。

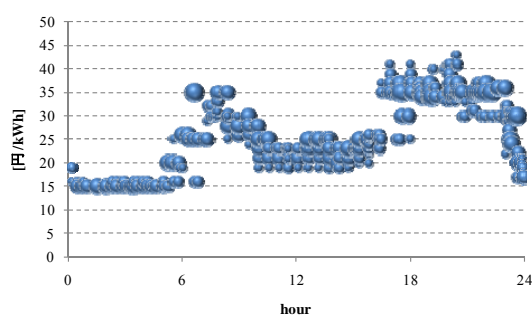


(a)約定価格の推移

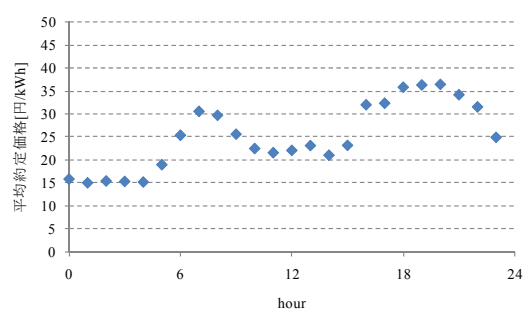


(b)約定価格の1時間平均

図 4-41 市場 1 における約定価格の様子

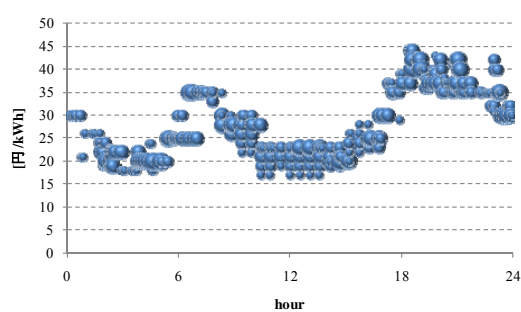


(a)約定価格の推移

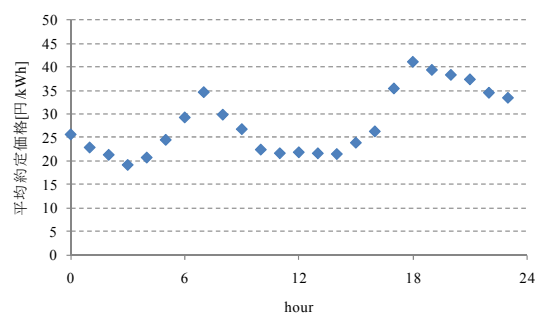


(b)約定価格の1時間平均

図 4-42 市場 2 における約定価格の様子

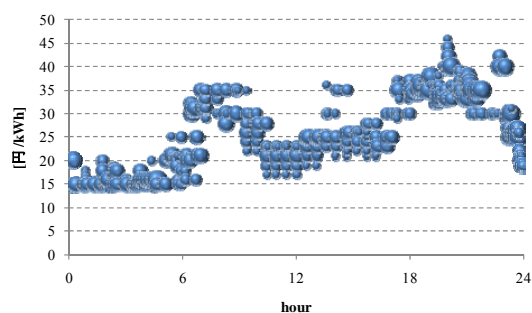


(a)約定価格の推移

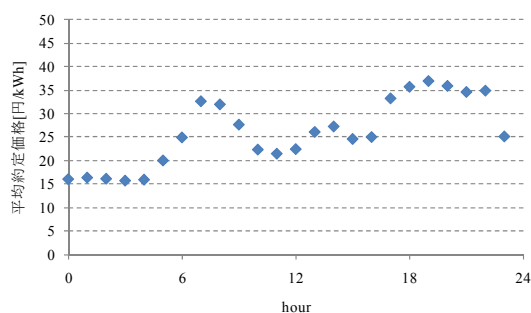


(b)約定価格の1時間平均

図 4-43 市場 3 における約定価格の様子

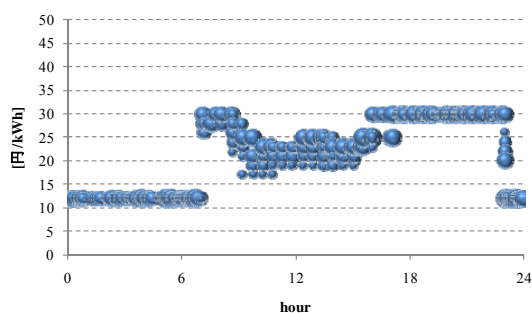


(a)約定価格の推移

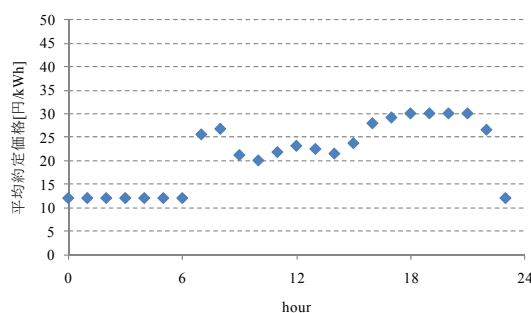


(b)約定価格の1時間平均

図 4-44 市場 4 における約定価格の様子



(a)約定価格の推移

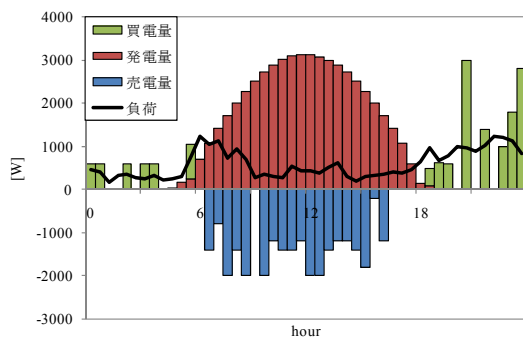


(b)約定価格の1時間平均

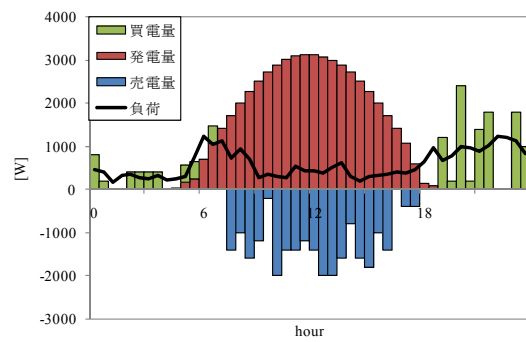
図 4-45 市場 5 における約定価格の様子

これらを見ると、昼間の約定価格についてはどの市場も同様の推移を取っている。これは、どの市場も昼間は PV の発電量で負荷をまかなえており、電力が余剰気味になっているためであると考えられる。電力の不足する朝方と夕方以降に関してはどの市場も約定価格が上がっているが、市場 1 と市場 5 には一般電気事業者が参加しており、昼間は 30[円/kWh]、夜間は 12[円/kWh]で無限に電力を供給してくれているため、その価格が上限価格となり、それを超えて約定が起こることはない。市場 2, 3, 4 では電力が不足した際には市場間送電事業者を介して一般電気事業者から買うことになるため、特に上限価格のようなものはなく、高価格での約定が起こっている。それぞれの市場で電力が余剰気味の時は低価格での約定、電力が不足気味のときは高価格での約定が起こっているが、一般電気事業者が参加している市場から離れるほど、約定価格に対する電力の過不足の影響が大きくなる傾向にあることが分かった。

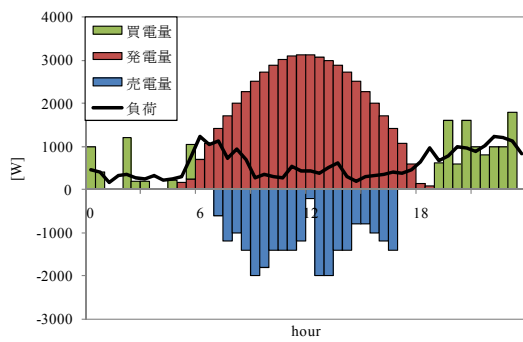
次に各市場参加者の行動を見ていく。まず PV 家庭の売買の様子を図 4-46 に、バッテリー貯蔵量の様子を図 4-47 に示す。



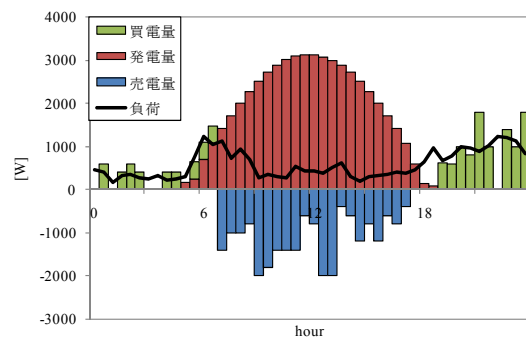
(a)PV 家庭 1



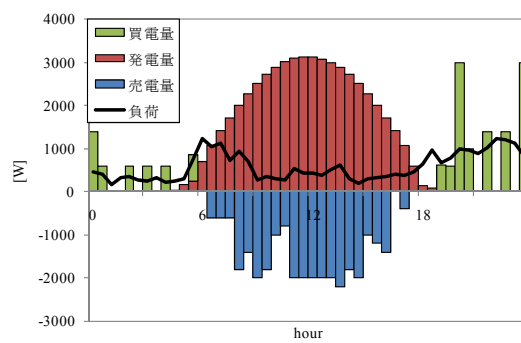
(b)PV 家庭 2



(c)PV 家庭 3

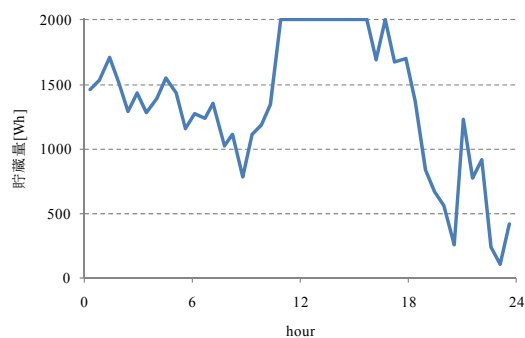


(d)PV 家庭 4

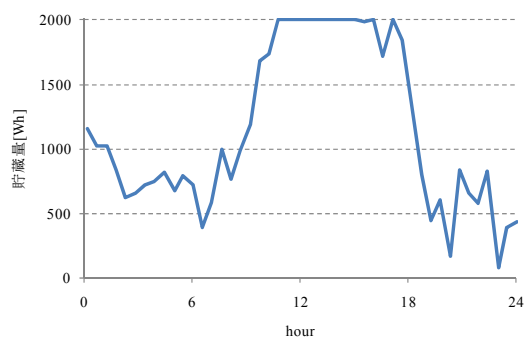


(e)PV 家庭 5

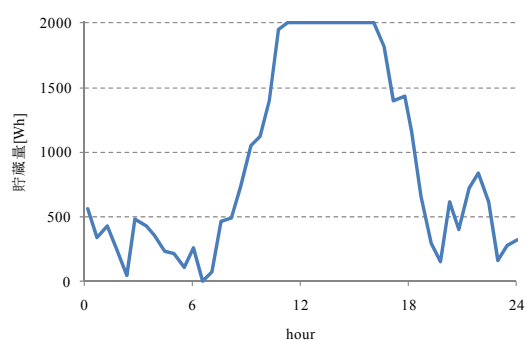
図 4-46 PV 家庭の電力売買の様子



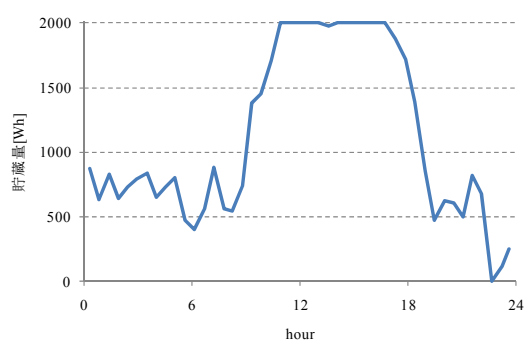
(a)PV 家庭 1



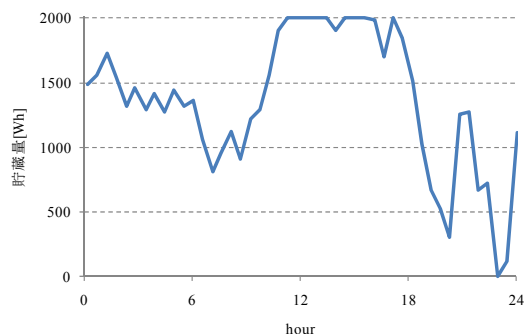
(b)PV 家庭 2



(c)PV 家庭 3



(d)PV 家庭 4

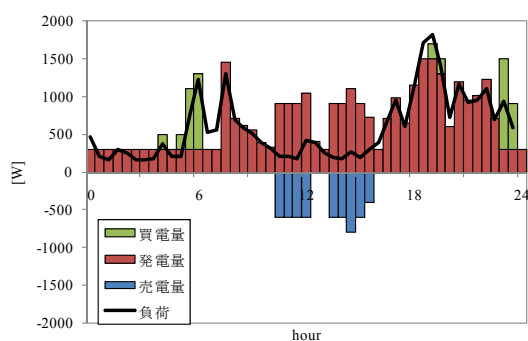


(e)PV 家庭 5

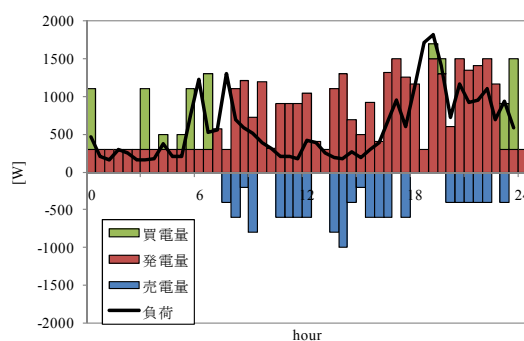
図 4-47 PV 家庭のバッテリー貯蔵量の様子

バッテリーの運用を見ると、夜間の貯蔵量に差が現れている。PV 家庭 1, 5 は低価格で買電することができるため、バッテリー貯蔵量にある程度保っているが、PV 家庭 2, 4 は夜間に保っておく貯蔵量が少なくなり、PV 家庭 3 はほとんど貯蔵は行わないという結果になった。図 4-43 に示す通り PV 家庭 3 は夜間でも比較的高価格でないと買電が行えないため、バッテリーに貯蔵できるほどは買電を行わないためと考えられる。このように市場の価格によってバッテリー貯蔵量にも差が出てくることが分かった。

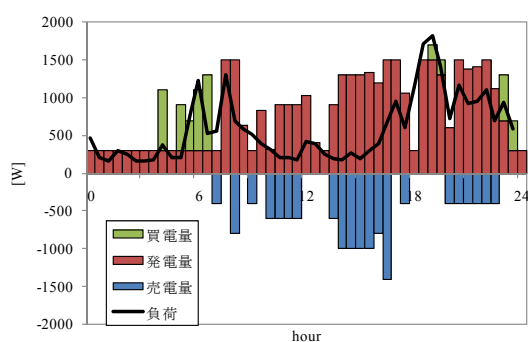
次に各市場の FC 家庭の売買の様子を図 4-48 に、バッテリー貯蔵量の様子を図 4-49 に示す。



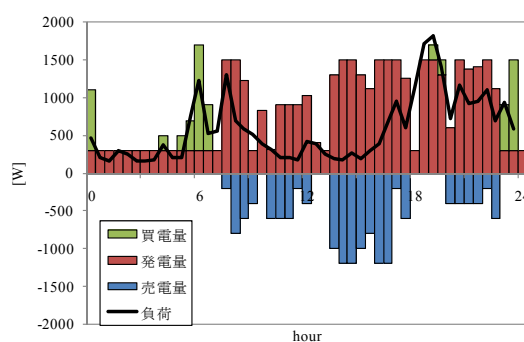
(a)FC 家庭 1



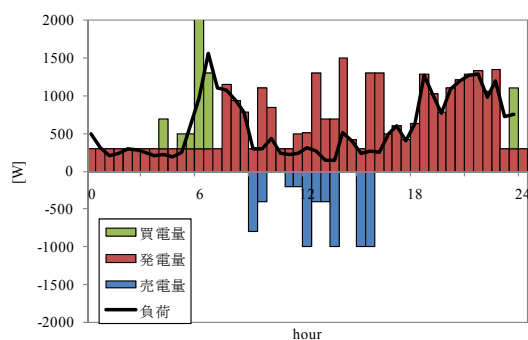
(b)FC 家庭 2



(c)FC 家庭 3



(d)FC 家庭 4



(e)FC 家庭 5

図 4-48 FC 家庭の電力売買の様子

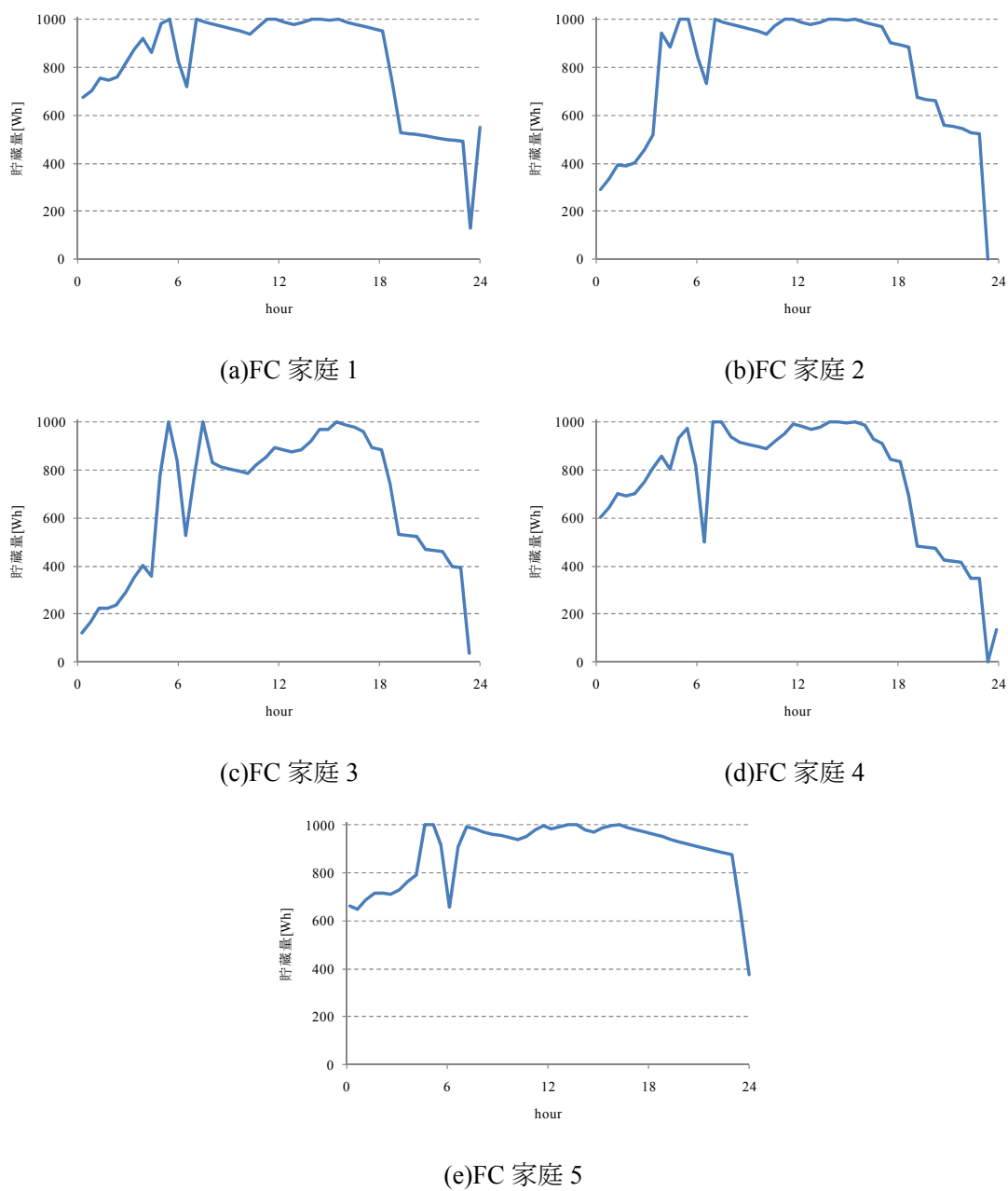
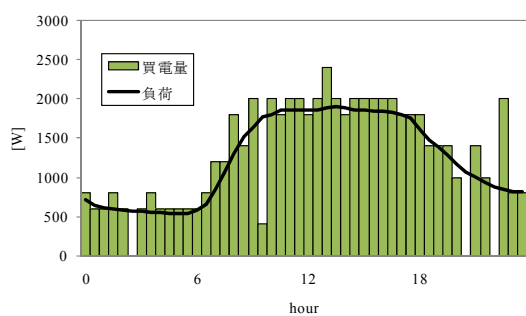


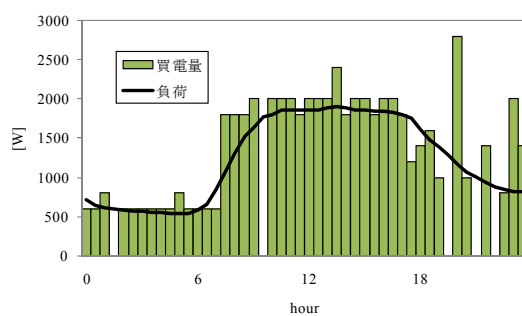
図 4-49 FC 家庭のバッテリー貯蔵量の様子

FC 家庭 1, 5 は夜 23 時になり、一般電気事業者の売電価格が低くなるとすぐに買電を行いバッテリーの貯蔵量を保っているが、FC 家庭 3 は夜間ほとんど貯蔵を行わず、朝のピーク負荷が来る直前になると買電を行いバッテリーへの貯蔵を行っている。これは、FC の発電コストを 13[円/kWh]と設定しているため、FC 家庭 1 と FC 家庭 5 は一般電気事業者から 12[円/kWh]で買った方が良いが、FC 家庭 3 が夜間を買電を行う場合、市場間送電事業者を介さなければならず、13[円/kWh]以下で電力を調達できないためであると考えられる。

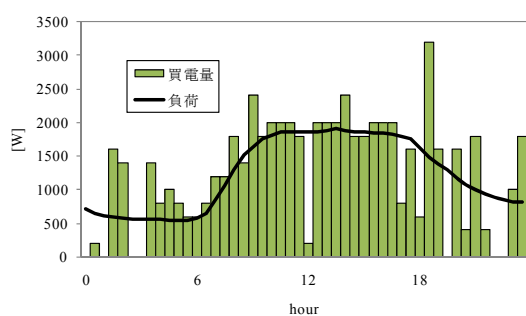
さらに各市場の事務所の買電の様子を図 4-50 に、バッテリー貯蔵量の様子を図 4-51 に示す。



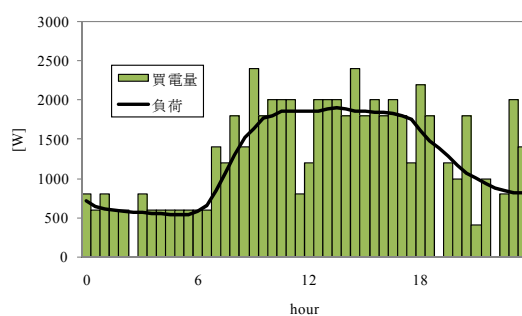
(a)事務所 1



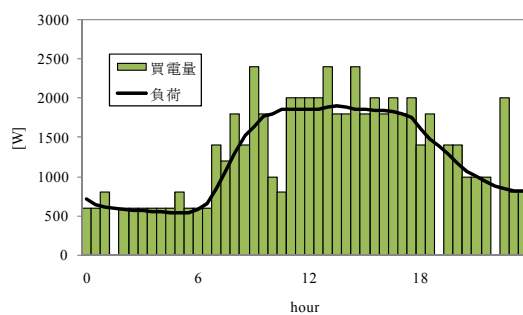
(b)事務所 2



(c)事務所 3



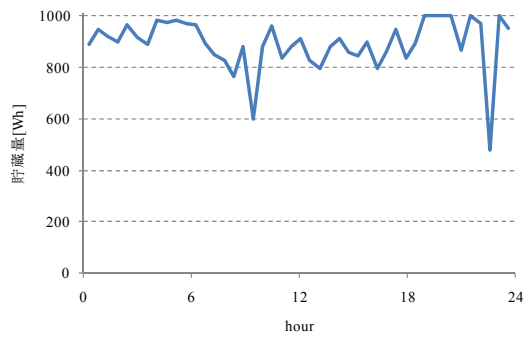
(d)事務所 4



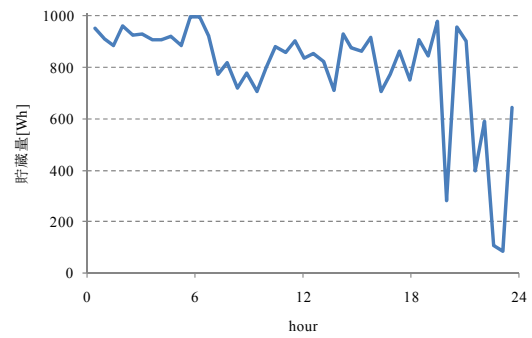
(e)事務所 5

図 4-50 事務所の買電の様子

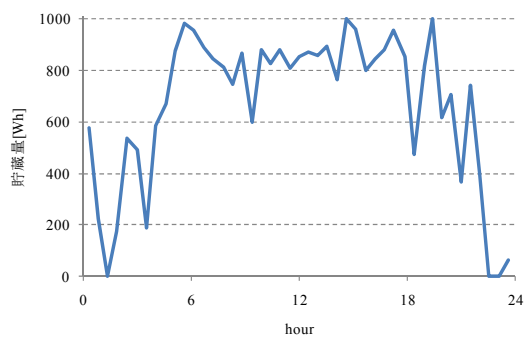




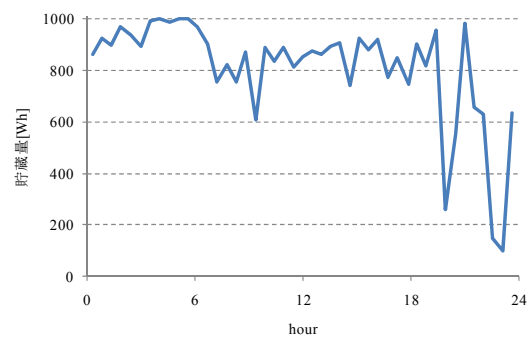
(a)事務所 1



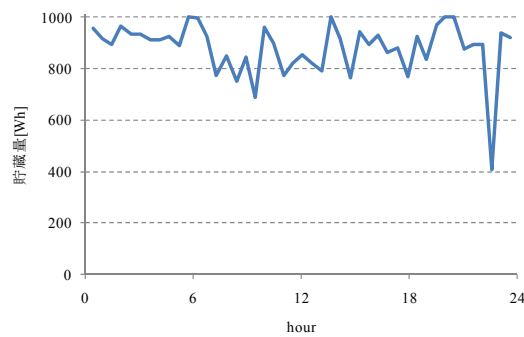
(b)事務所 2



(c)事務所 3



(d)事務所 4



(e)事務所 5

図 4-51 事務所のバッテリー貯蔵の様子

どの市場に属する事務所もほぼ同じような行動を取っている。バッテリーの貯蔵量を保ちつつ、自らの負荷の分だけ買電を行い、電力価格の低くなる 23 時直前にはなるべく買電は行わずバッテリーから補おうとしている。事務所 3 は夜間バッテリーの充放電を繰り返しながら朝方までにフル充電するような行動を取っているが、これはなるべく低い価格で買電を行おうとした結果であり、低い価格で買電できなかったときはバッテリーの電力を使っているためであると考えられる。

ここでそれぞれの市場に接続する市場参加者の 1 日のコストについて、PV 家庭の結果を図 4-52 に、FC 家庭の結果を図 4-53 に、事務所の結果を図 4-54 に示す。これらの結果は 10 日間の平均を取ったものである。

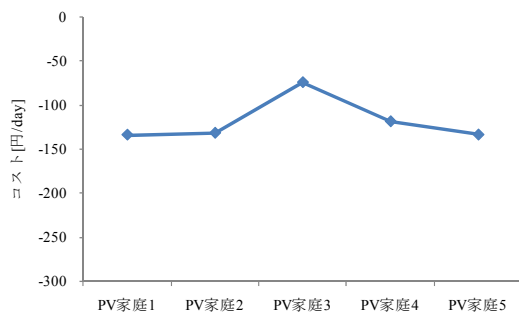


図 4-52 各市場の PV 家庭のコスト

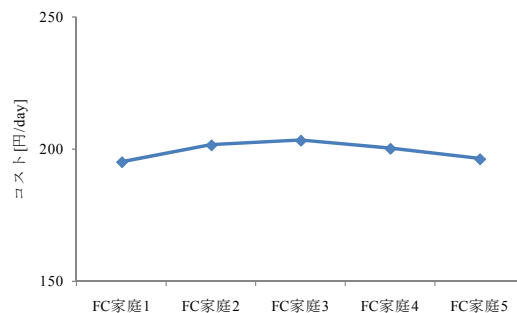


図 4-53 各市場の FC 家庭のコスト

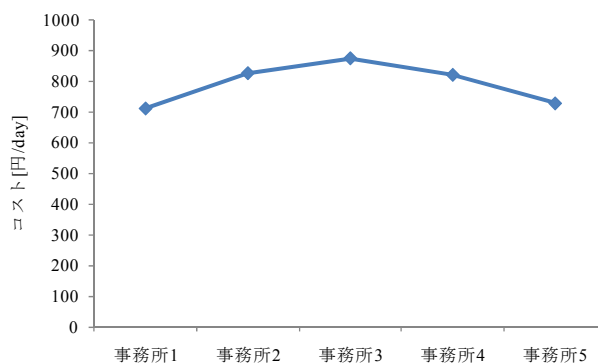


図 4-54 各市場の事務所のコスト

いずれの市場参加者も一般電気事業者の接続している市場から離れるほどコストが上がるという結果になった。事務所に関しては買電しか行わないので約定価格の高くなってしまいう市場 3 に接続する事務所 3 のコストが最も高くなるのは当然であるが、発電能力を持ち、売電を行うことができる PV 家庭と FC 家庭についても市場 3 に接続している家庭が最もコストが高くなっている。これは売電を行う昼間は電力が余剰気味になっているため、どの市場にも約定価格に差が出ないが、電力の不足気味になる夜間などは市場 3 の約定価格が最も高くなっている。すなわち、発電能力を持つ家庭にとってはどの市場でも売電価格は変わらず、買電価格は一般電気事業者の接続する市場から離れるほど高くなるため、1 日のコストは図 4-52, 53 に示すような結果になっている。

## 4.4 事故時の挙動

### 4.4.1 配電線の断絶

従来の系統では配電系統で事故が起きた際、新たに電力の流れを指示していかなければならないが、分散市場型電力系統においては事故が起きた際にも自律的に電力の流れが形成していくはずである。そこで図 4-55 に示す状況において配電線が何らかの事故で使用できなくなるという想定でシミュレーションを行った。なお一般電気事業者の売電価格は昼間(7時～23時)が 30[円/kWh]、夜間(23時～翌7時)15[円/kWh]という設定で行っている。市場間送電事業者が動作するのは両市場の売り入札と買い入札に 3[円/kWh]以上の差があるとき、提案入札も価格差 3[円/kWh]とする。

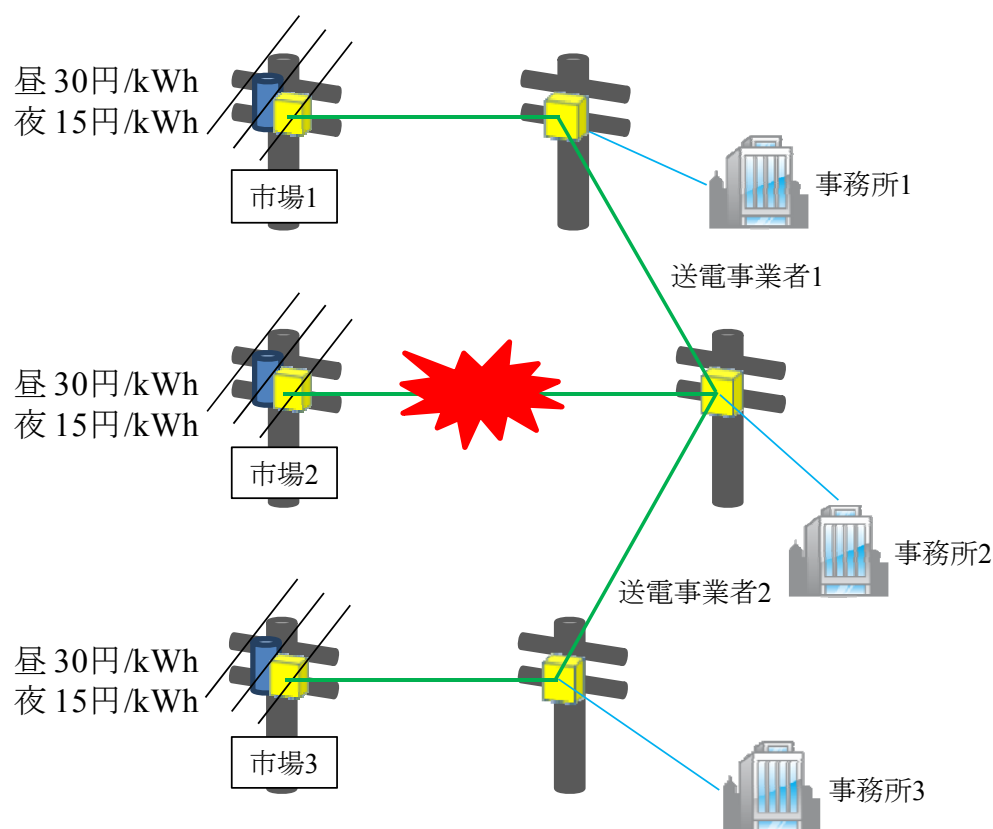


図 4-55 シミュレーション条件

このときの各一般電気事業者の売電量の様子を図 4-56, 57 に示す。

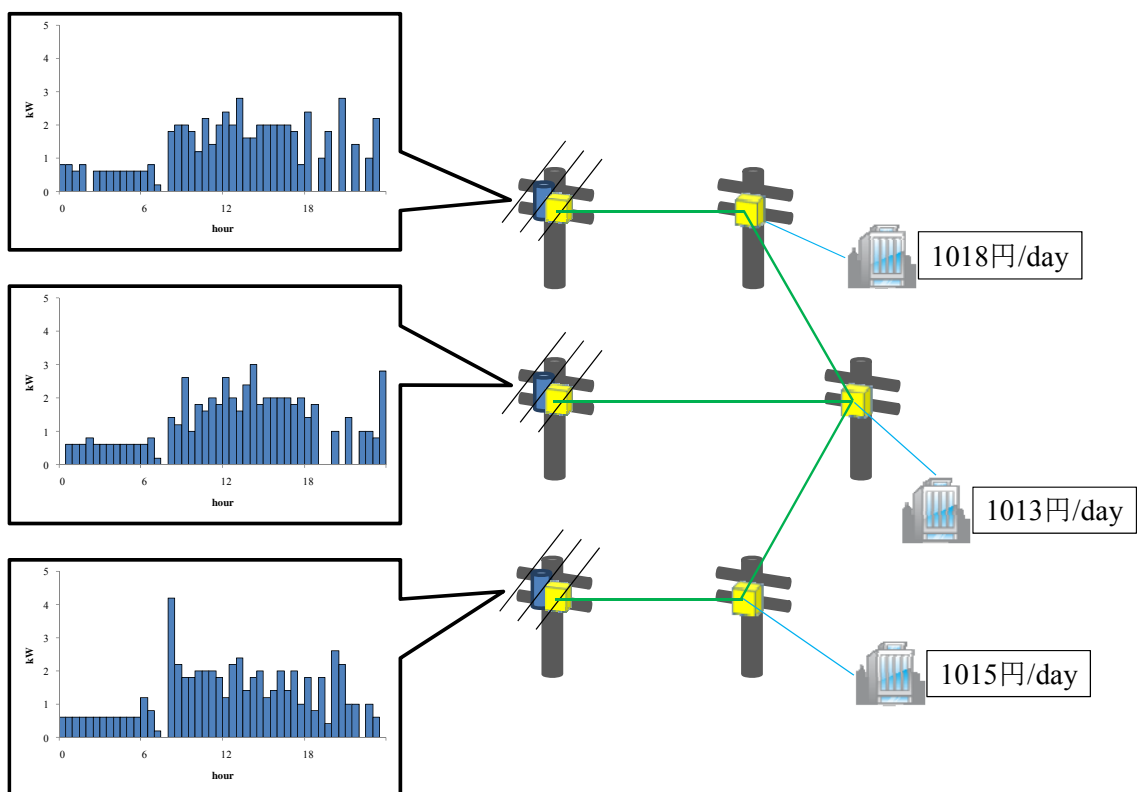


図 4-56 平常時の一般電気事業者の売電の様子と事務所のコスト

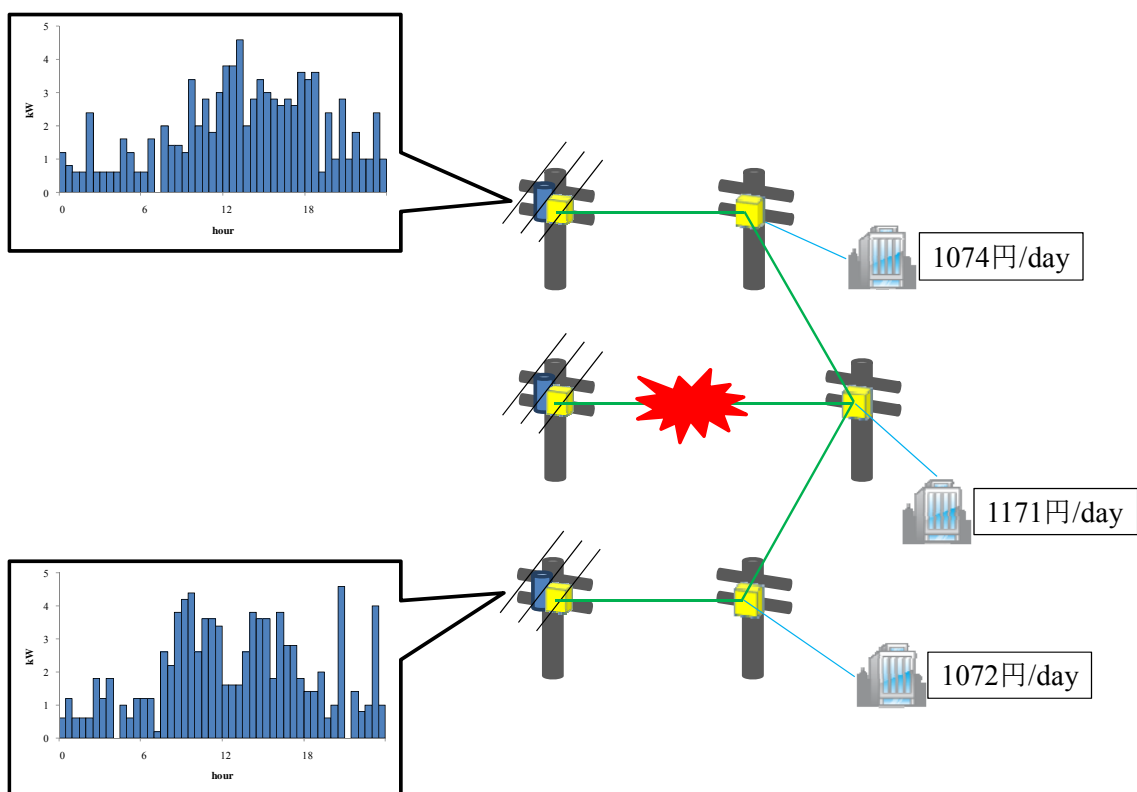


図 4-57 事故が起きたときの一般電気事業者の売電の様子と事務所のコスト

平常時は当然、それぞれの市場参加者は市場間送電事業者を介して一番近い一般電気事業者から電力を調達しているのでそれぞれ平均的に売電を行っているが、事故が起こり真ん中の配電線が使えなくなったときは、事務所 2 は市場 1 か市場 3 から電力を調達しなければならない。今回は左右の市場はどちらも同じ市況であるので、左右の市場から同じように調達を行っている様子が観測できた。

そひて各事務所のコストであるが、平常時に比べ事故時に事務所 2 のコストは当然上がっているが、事務所 1, 3 のコストも上がっている。これは事故が起きたことで送電事業者 1, 2 が動作し始め、事務所 1 及び 3 の接続する市場に入札を行い始めたために各市場の約定価格が上がり、結果的に全ての市場参加者のコストが上がったと考えられる。

#### 4.4.2 配電線の断絶（市況の異なる市場が存在するとき）

4.4.1 では自らが電力を調達する最短のルートで事故が起きた際、条件が同じ 2 つのルートから電力を調達する様子を観測したが、実際には他のルートの条件が異なる場合もある。そこで図 4-58 に示す条件でシミュレーションを行った。

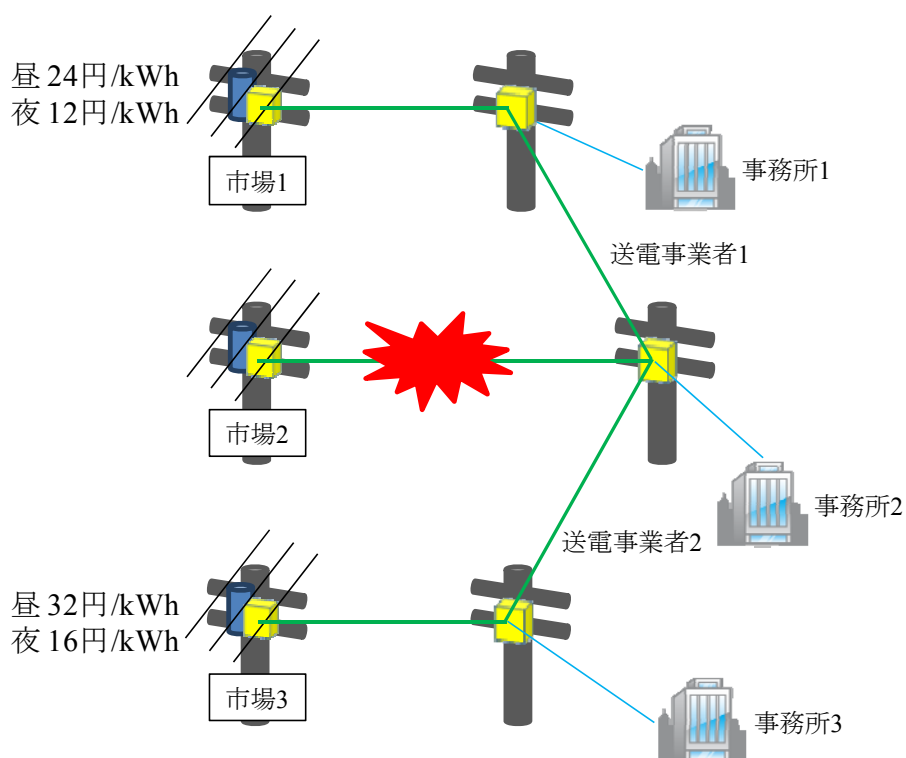


図 4-58 シミュレーション条件

図 4-55 と異なるのは市場 1 に接続する一般電気事業者の売電価格は昼間 24[円/kWh]、夜間 12[円/kWh]、市場 3 に接続する一般電気事業者の売電価格が昼間 32[円/kWh]、夜間 16[円/kWh]となっている点である。これは事務所 2 から見れば、取引価格の低い市場 1 と高い市場 3 が等距離にある、もしくは事務所 2 から見れば市場 1 より市場 3 が遠いという状況に置き換えて見ることができる。このような状況下で事務所 2 が電力を調達する様子を観測した。一般電気事業者の売電の様子を図 4-59 に、市場間送電事業者 1, 2 の送電の状況を図 4-60 に示す。

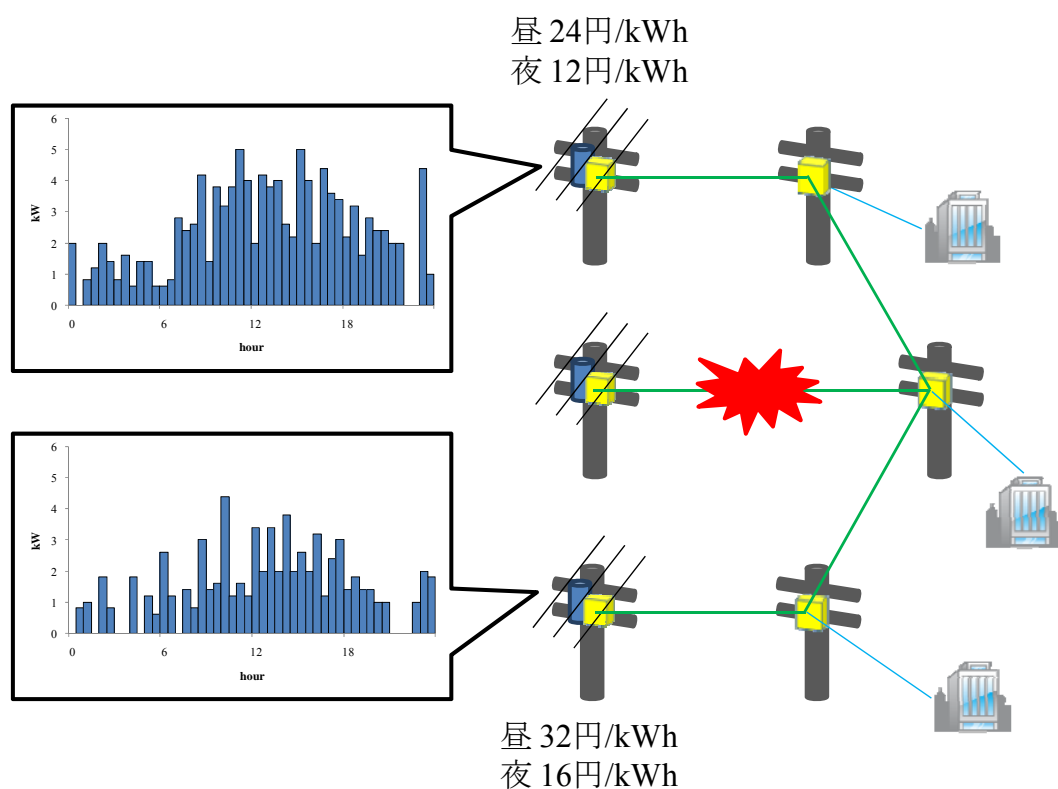


図 4-59 一般電気事業者の売電の様子

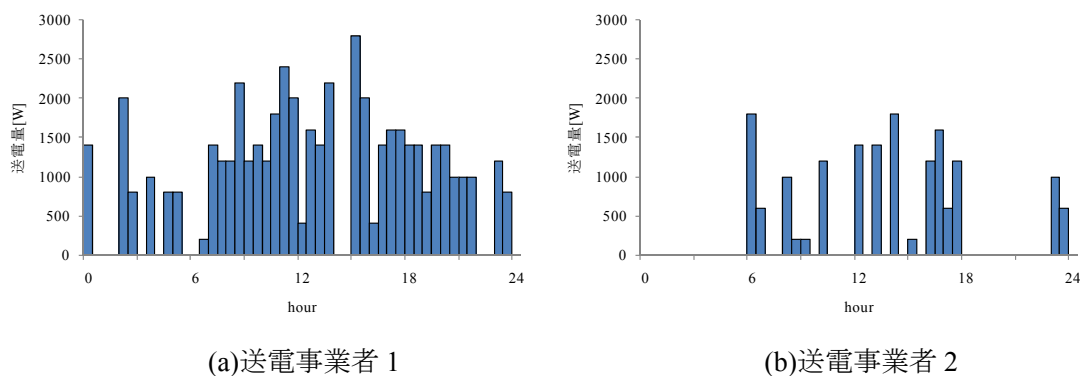


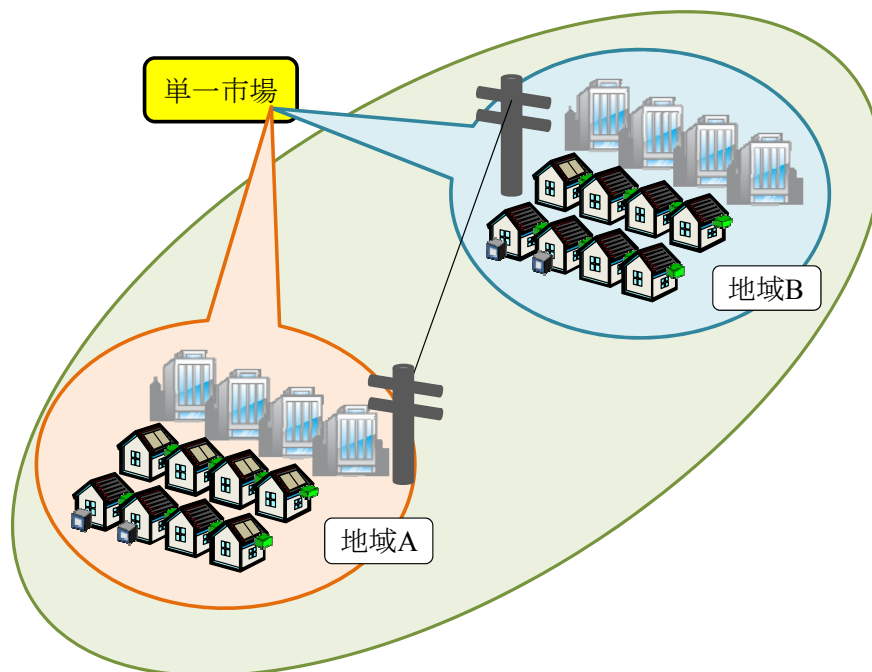
図 4-60 市場間送電事業者の送電量

これらの結果から事務所 2 はほとんどの電力を価格の低い、もしくは距離の近い市場 1 から調達していることが分かった。

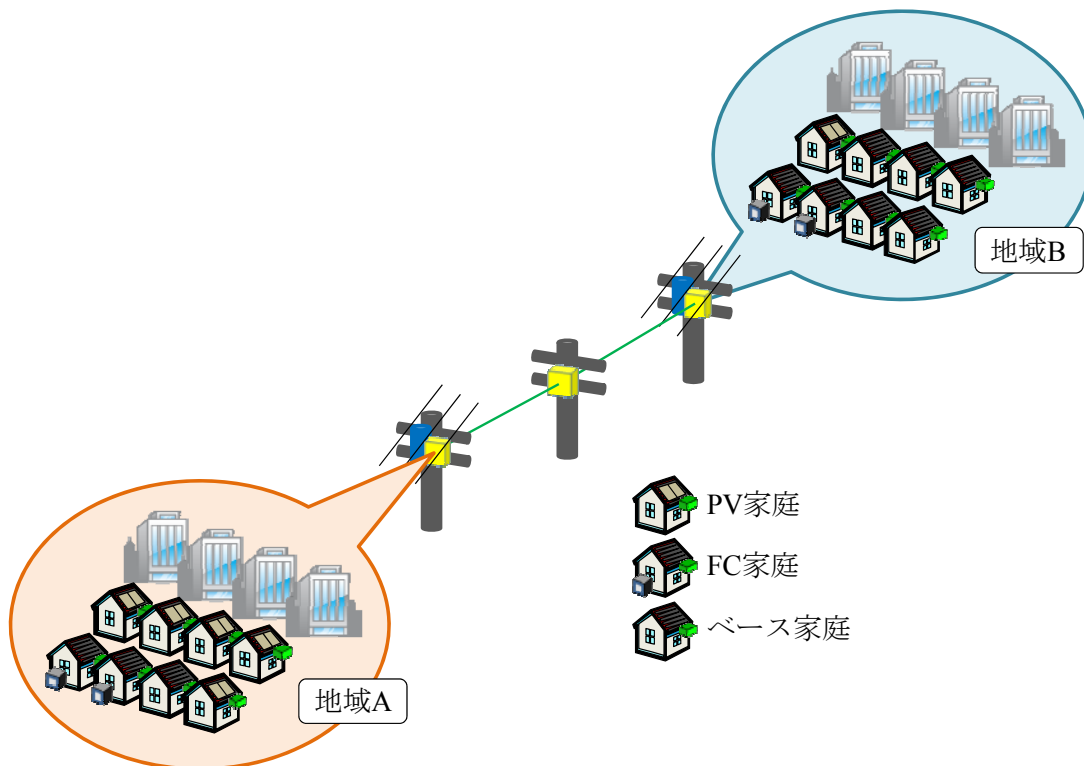
本節では事故が起きた際のシミュレーションとして結果を示したが、これらの結果は分散市場型電力流通システムにおいては各分散市場の取引価格によって電力の流れが自律的に形成されていくことを示している。また、市場参加者は電力を調達する際には自然と最短経路を通るように電力を調達することができる。

#### 4.5 単一市場と分散市場の相違について

単一市場における電力取引と分散市場における取引の様子を比較するために図 4-61 に示す設定でシミュレーションを行った。



(a)単一市場の場合



(b)分散市場の場合

図 4-61 シミュレーション条件



地域 A と地域 B という離れた地域があるとし、両方の地域に属する家庭、事務所が全て単一の市場で取引を行う場合と、地域 A には地域 A の市場、地域 B には地域 B の市場があり、2つの市場が市場間送電事業者によって結ばれている場合でシミュレーションを行った。ケース(b)分散市場の場合は、地域間を超えて電力が流通するとき、市場間送電事業者を介するため、一方の市場で調達された電力は他方の市場に届く時には 6[円/kWh]以上上乗せされていることになる。ケース(a)単一市場の場合は、地域 A に属する参加者と地域 B に属する参加者の間で取引があった場合、託送料金のようなものとして 6[円/kWh]だけ買い手のコストに課金するものとし、2つのケースでコストの比較を行った。家庭が単一市場に参加する場合、様々な市場の形態が考えられるが、今回は考えられうる一つのケースとして本研究で用いている分散型市場のモデルを用いた。

地域 A には事務所 4 軒、FC 家庭 2 軒、PV 家庭 5 軒、ベース家庭 1 軒の計 12 軒で構成され、地域 B は事務所 4 軒、FC 家庭 2 軒、PV 家庭 1 軒、ベース家庭 5 軒の計 12 軒で構成される。すなわち、地域 A では昼間電力が余剰気味になっており、地域 B では不足気味になっている。

まずシミュレーション開始 12 日目のそれぞれの市場の約定価格の推移を図 4-62～64 に示す。

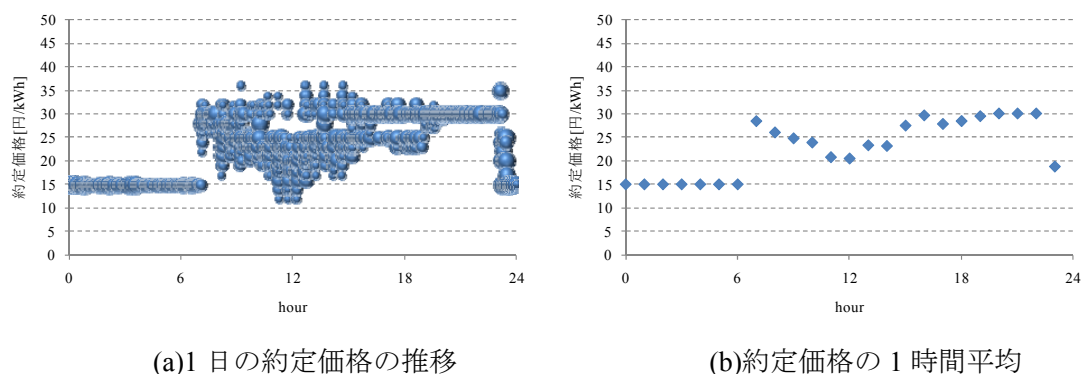


図 4-62 単一市場の約定価格

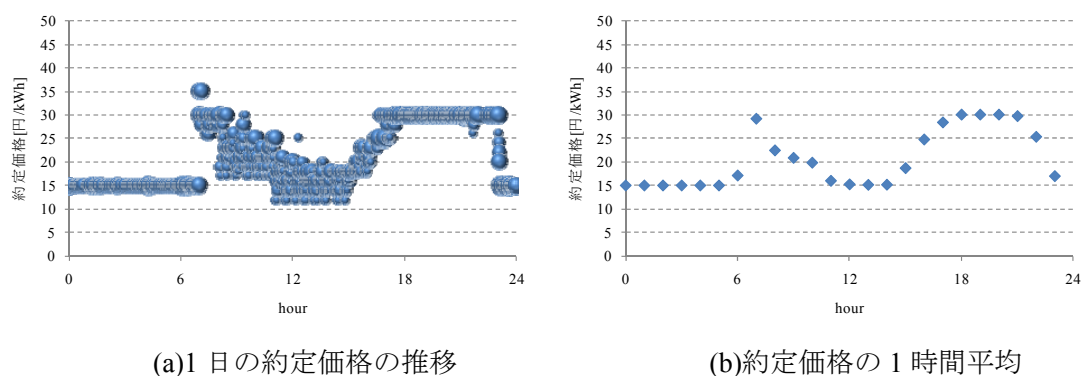


図 4-63 分散市場地域 A の約定価格

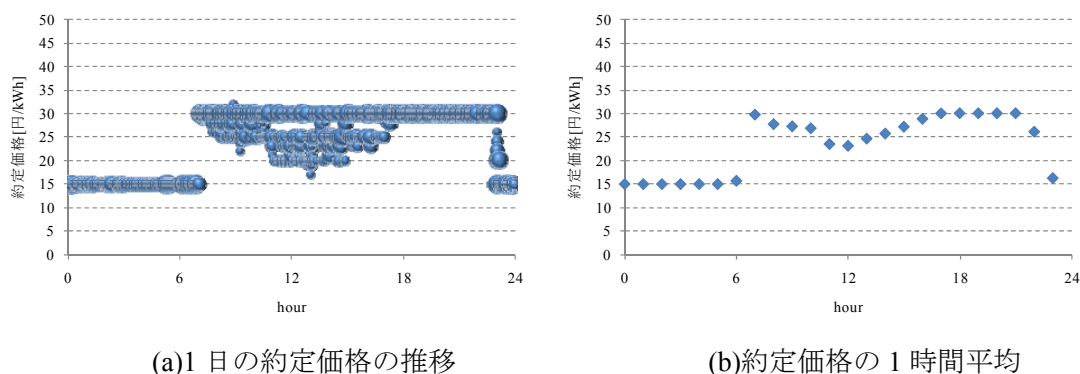


図 4-64 分散市場地域 B の約定価格

分散市場地域 A は電力が余剰気味なので昼間は低めの価格帯で、地域 B は不足気味なので高めの価格帯での約定が起こっている。そして単一市場では分散市場の地域 A と地域 B の約定価格を平均したような価格帯での約定が起こっている。このように分散市場ならばその地域ごとに電力の過不足を反映し価格を形成するが、単一の市場では全ての地域が同じ価格で電力のやりとりを行うことになってしまう。

そしてそれぞれのケースにおいて各市場参加者の1日のコストを比較すると表 4-4 のような結果になった。

表 4-4 市場参加者の1日のコスト（10日間平均[円/day]）

(a) 地域 A

(b) 地域 B

	単一市場	分散市場		単一市場	分散市場
事務所	796	686	事務所	865	817
FC家庭	211	215	FC家庭	210	203
PV家庭	-164	-94	PV家庭	-161	-240
ベース家庭	379	370	ベース家庭	422	389
計	3166	3078	計	3497	2862

地域 A のお PV 家庭と FC 家庭については単一市場より分散市場の方が市場の約定価格が下がるのでコストが上がるという結果になったが、その他の市場参加者については単一市場より分散市場の方がコストは下がるという結果になった。買電中心の市場参加者のコストが下がったことは、離れた地域間の取引による余分な価格上昇が抑えられた結果であると考えられる。

それぞれのケースにおいて地域 A と地域 B の間でどのくらいの電力のやり取りがあったのかを示す。図 4-65 に単一市場のケースで、各市場参加者が他地域の参加者から1日に購入した電力量を、図 4-66 に分散市場のケースで市場間送電事業者の送電量の様子を示す。いずれも10日間の平均を取った結果である。

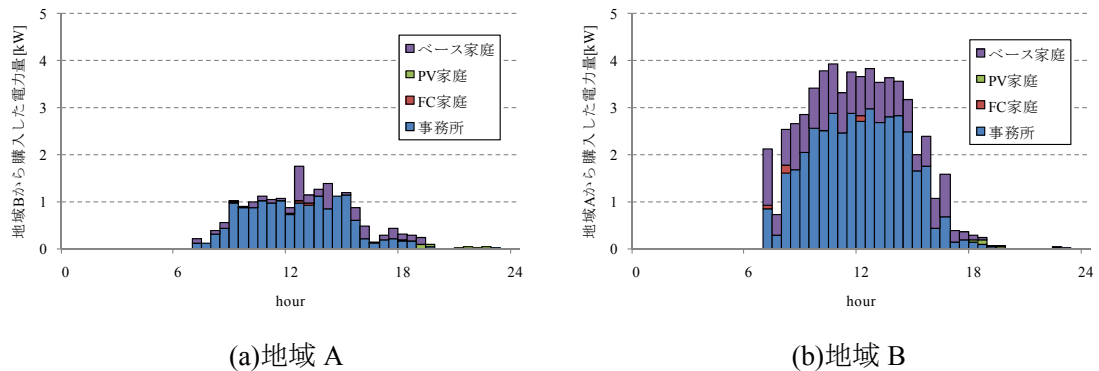


図 4-65 単一市場において他地域の市場参加者から 1 日に購入した電力量

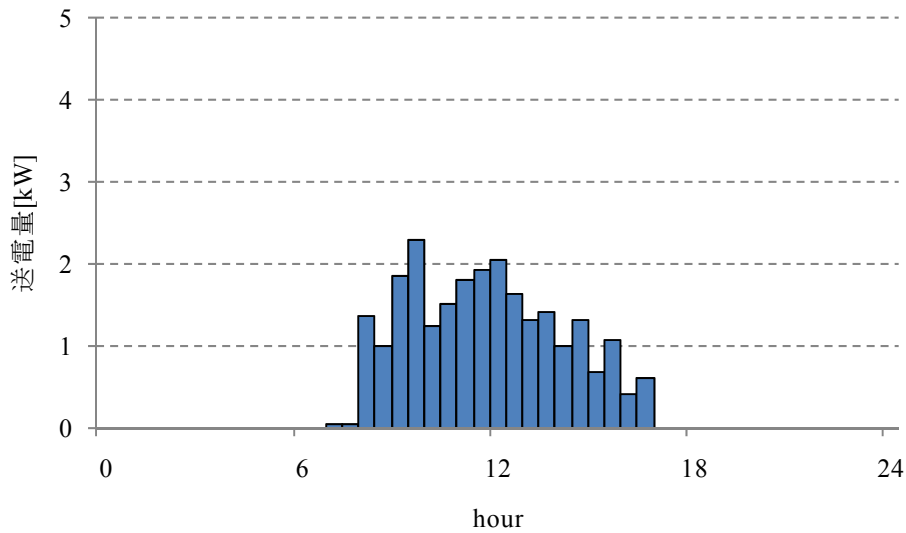


図 4-66 分散市場における市場間送電事業者の送電量

単一市場において、発電能力を持つ FC 家庭と PV 家庭は買電するときはほとんどが一般電気事業者からであり、他の市場参加者から買電する機会は少ないが、発電能力を持たない事務所とベース家庭は他地域の市場参加者からの買電をかなりの量行っている。電力が余剰気味である地域 A に属する事務所とベース家庭でさえわざわざ不足気味の地域 B からの買電を行っているという結果になった。一方、分散市場の場合は図 4-68 から分かる通り昼間に地域 A の余剰電力を地域 B に流すだけで他にはやり取りを行っていない。

以上のことから、分散市場は地域ごとに適正な価格を形成するだけでなく、余剰電力をその地域で効果的に運用させる役割も持つことが示された。さらにその結果、離れた地域への送電から生じる余分な価格上昇も抑えることができ、ほとんどの市場参加者のコストも抑えられた。

## 4.6 一般電気事業者による需給制御

### 4.6.1 負荷制御

現在世界中で取り組みが進んでいるスマートグリッドの特徴の一つに「負荷制御」がある。電力会社側がスマートメーターを通して家電機器を強制的に抑制することによってピーク電力の削減や電力網の安定化を実現するものである。例えば夏場のピーク電力時にエアコンの温度を上げるといった制御も可能になる。

本節では分散市場型電力流通システムにもピーク電力を削減するための負荷制御機能があることを示す。ここでは負荷制御と述べているが、分散市場型電力流通システムにおいてはスマートグリッドの負荷制御とは異なり、需要家の負荷を直接制御することはない。分散市場型電力流通システムにおいては、一般電気事業者も一市場参加者として分散市場に入札を行い需要家に売電する。前節までは無限の売電を行うことができるエージェントとして表現していたが、この売電量に上限を設けることによってピーク電力削減を行うことができる。

そして需要家はこの限られた電力をめぐって入札を行う。この場合、一般電気事業者の売電量が制限された市場においては電力が不足してしまい、各需要家に負荷の分だけの電力が届かないことが考えられる。需要家は自らが得た電力量でやり過ぎさなければならなくなるが、このとき優先度の高い家電機器から動かしていくと考えられる。本研究では各需要家が自らの負荷を補う電力が得られないときはペナルティコストを支払うとしているが、このペナルティコストで考えると、不測電力分とは図 4-67 に示すような関係があると考えられる。重要度の高くない負荷に対しては電力が不足したとしても大きな問題はなく、不足量が多く重要度の高い負荷も補えないときにはペナルティコストが高くかかってしまう。本研究においては図 4-68 のように負荷の重要度に 2 段階あると仮定し、1 段階目のペナルティコストを 40[円/kWh]、2 段階目のペナルティコストを 60[円/kWh]とした。そして不足量の境界をその時点での負荷の 3 割とした。

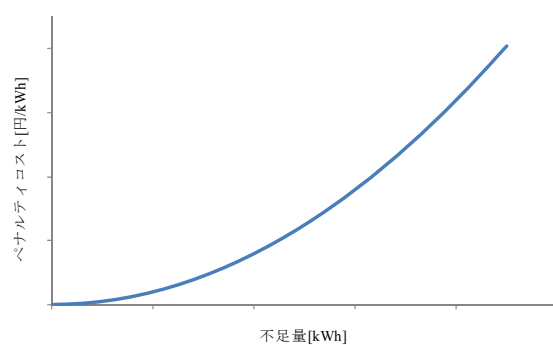


図 4-67 不足量とペナルティコスト

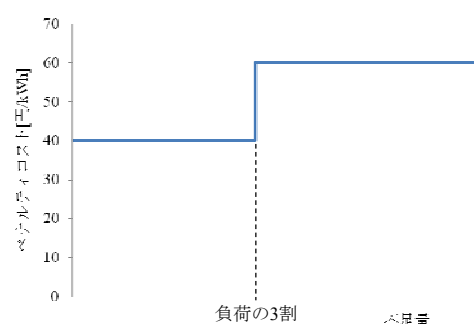


図 4-68 本研究における設定

市場参加者は図 4-69 のような 2 段階のペナルティを持つ者とし、かつ一般電気事業者には売電量制約をかけてシミュレーションを行った。図 4-71 にシミュレーション条件を、表 4-5 にその他の設定を示す。一般電気事業者の接続している市場に 3 軒の事務所が参加しているとした。

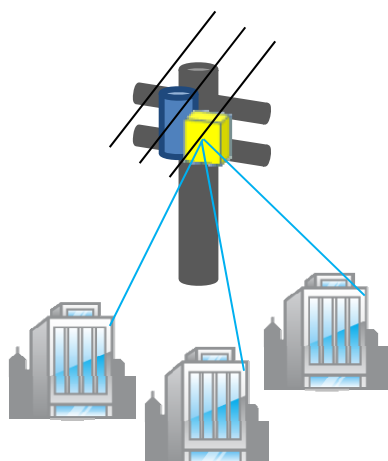


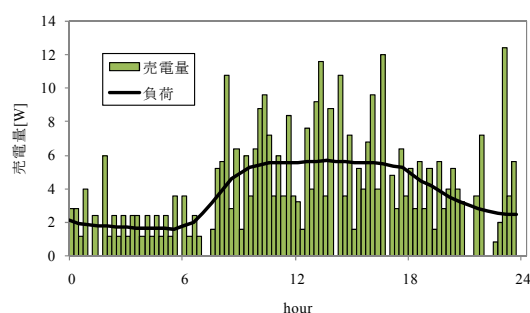
表4-5 各設定値

一般電気事業者の入札間隔	15 [分]
売電制約	1 [kWh/15分]
売電価格	30 [円/kWh]

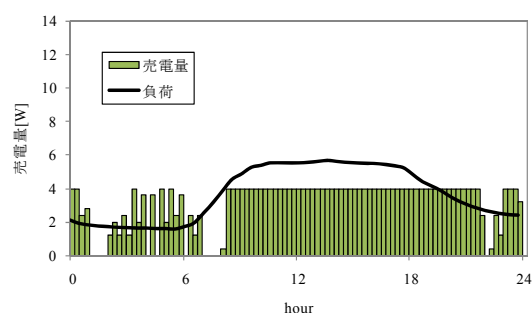
図 4-69 シミュレーション条件

本研究では市場参加者は約 30 分間隔で入札を行っている。前節までの一般電気事業者には入札間隔というものはなかったが、ここでは 15 分間隔で入札を行うものとする。そしてその売電量は 15 分毎に 1[kWh]とする。また、売電価格は前節までと同様 30[円/kWh]とする。

まず一般電気事業者に売電量制約がないときとあるときの一般電気事業者の 1 日の売電量の推移を図 4-70 に示す。



(a)売電量制約なし



(b)売電量制約あり

図 4-70 一般電気事業者の売電量の推移

このようにピーク電力を削減できている様子が分かる。次に図 4-71 に売電量制約があるときの市場における約定価格の推移を示す。

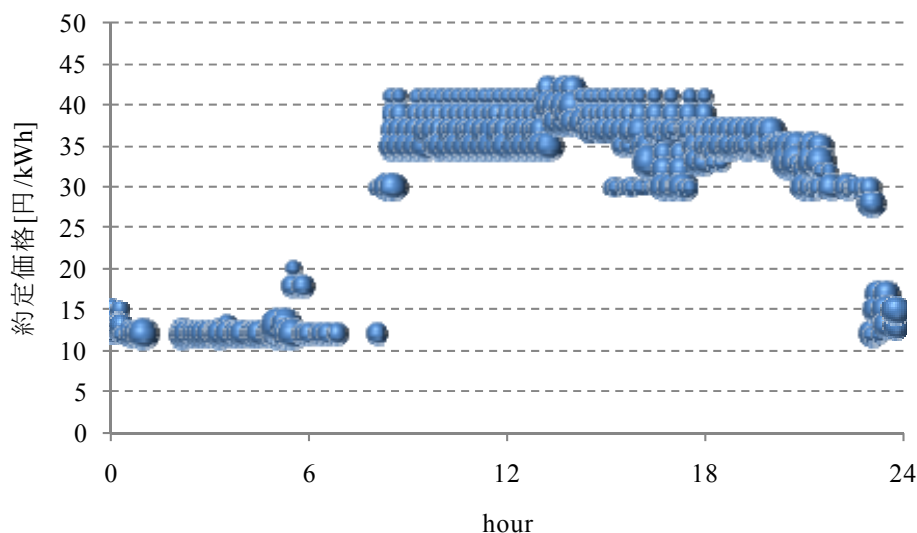


図 4-71 売電量制約があるときの約定価格

売電量制約がある場合、一般電気事業者は常に 30[円/kWh]で売り入札を行っているが、買う側が優先度の高い負荷の分の電力だけでも調達しようと高価格の買い入札を行うため、電力価格が上昇している。価格を動かすことで負荷をコントロールしようという考え方があるが、このように量を制限することで価格が形成されていくことが分かった。

スマートグリッドにおいては電力会社が外から優先度の低い家電機器の出力を下げるような指示を出し、負荷を制御するが、分散市場型電力流通システムにおいては市場に売り出す量を制限するだけで良い。そして市場に売り出した分だけ発電を行えば良いので、周波数制御という観点からは従来までと変わりはない。さらに、売電量を制限することで急激な負荷の増大も防ぐことができ、電力品質は高い水準を保持できると考えられる。

このようにして一般電気事業者が売電量を制限できるという考え方は、電力をパケットとして扱い取引を行い、パルス電圧によってやり取りを行うシステムだからこそ可能である考え方であり、常時電圧が印加されている従来の電力系統では実現が困難であると考えられる。

#### 4.6.2 逆潮流制御

同様の考え方で、今度は一般電気事業者が需要家から余剰電力を買い取るときについて考える。前節と同様に一般電気事業者が買い取る量の上限を定めることも考えられる。容量制約があってそれ以上逆潮流を受け入れることができない場合、太陽光発電に併設されるパワーコンディショナーの出力を、通信機能を利用して切ってしまうことなどが考えられるが、分散市場型電力流通システムにおいては一般電気事業者が買電制約をかけることで制御可能であると考えられる。

そこで図 4-72、表 4-6 に示すような条件でシミュレーションを行った。今度は一般電気事業者が接続している市場に 3 軒の PV 家庭が参加しているものとした。一般電気事業者の入札間隔は 15 分とし、15 分間に 500[Wh]しか買い取らないという制約をかけた。また、買電価格は 20[円/kWh]とした。

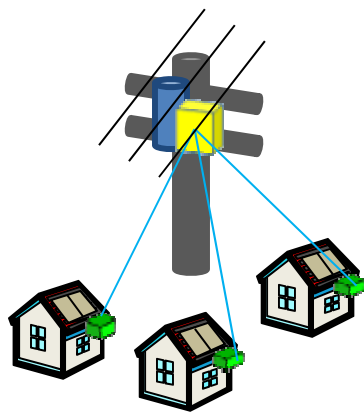
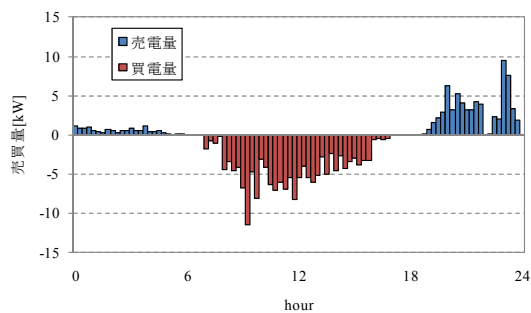


表4-6 各設定値

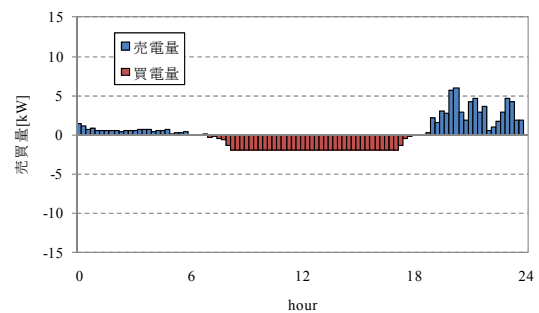
一般電気事業者の入札間隔	15[分]
買電量制約	500[Wh/15分]
買電価格	20[円/kWh]

図 4-72 シミュレーション条件

一般電気事業者に買電量制約あるときとないときの一般電気事業者の売買の様子を図 4-73 に、ある 1 日の約定価格の様子を図 4-74 に示す。



(a)買電量制約なし



(b)買電量制約あり

図 4-73 一般電気事業者の売買量の推移

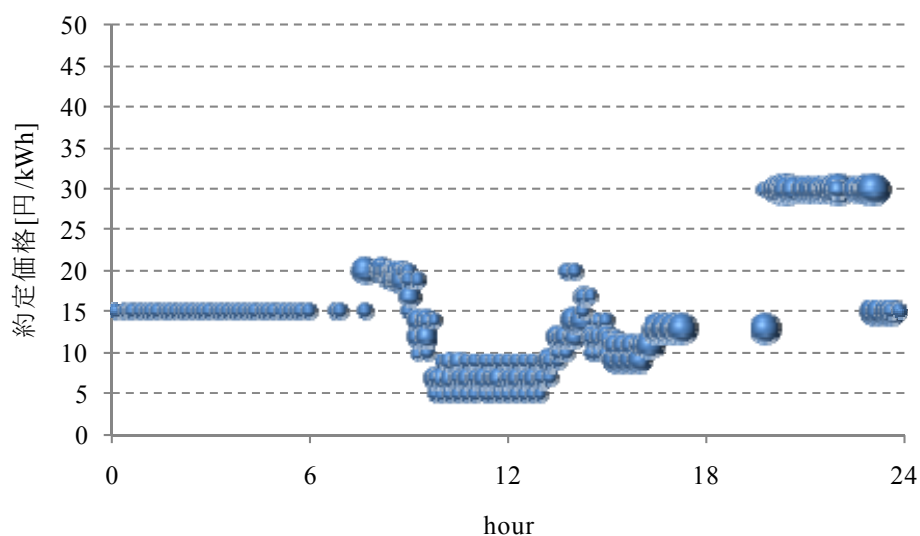


図 4-74 買電量制約があるときの約定価格

買電量制約がある場合、一般電気事業者が 20[円/kWh]で余剰電力を買い取るようになったとしても、市場参加者は競って売電しようとして買取価格は下がっていくという結果になった。

PV が広範に普及すると、集中的に導入された地域においては逆潮流するにあたって容量制約が発生してしまうと考えられる。分散市場型電力流通システムにおいては、需要家にまで立ち入った制御をしなくとも、市場に入札する量を制限するという手法によって逆潮流を制限することができる。その場合余剰電力を安くても良いから買い取って欲しいという市場参加者の行動の結果、電力価格は下がるという結果になった。分散市場型電力流通システムにおいては価格をもとに電力の流れが形成されていくので、一般電気事業者に買い取ってもらえなかった電力も他の市場に流れていくと考えられる。

以上のように一般電気事業者がピーク負荷を削減しなければならない、逆潮流を制御しなければならないといった状況下において、分散市場型電力流通システムでは需要側にまで立ち入って制御する必要はなく、市場に入札する量を制限することで制御できる。



## 第5章 結論

### 5.1 本研究の成果

本研究においては太陽光発電を始めとする分散型電源が広範に普及した際に、容量制約などの問題を解消し、望ましい取引を行うための市場制度・系統構成を設計し、提案した。ハードウェアの側面からはパルス電圧による電力流通を行うための設備を設計し、回路シミュレーションによって任意のパルス電圧を発生できることを示した。また、電力をパケットのように扱い取引を行う市場のモデル化を行い、シミュレーションによって様々な角度から検証を行った。その結果を以下に挙げる。

- 市場参加者が自身のコスト最小化を目的として電力の運用を行うと仮定すると、分散型市場には地域ごとの電力の過不足を反映する価格形成機能を持つことが示された。
- 市場ごとに電力価格に差があるとき、市場間送電事業者の働きによって、市場参加者が自身のコストを最小化する経路で調達することができ、その結果自律的に電力の流れが形成されていくことが示された。
- 分散型市場においては余剰電力を発生した地域内で効果的に運用でき、また地域間の融通も効率的に行うことが示された。すなわち、余剰電力が大量に発生した際にも配電網の制約を満たしながら効果的な電力流通を行えると考えられる。
- 一般電気事業者による負荷制御、逆潮流制御に関して、個々の需要家を制御することなく制御できることが示された。

さらに、電力システムに対して情報通信分野の階層化のような概念を適用できる可能性を示し、システム的な複雑さを減少させ、技術革新を促進できるのではないかという考えを示したことも本研究の成果と言える。

## 5.2 今後の課題

本研究では従来にはない電力流通システムの在り方を提案したが、実際に運用する際には課題がある。

- 配電回路について示し、回路シミュレーションを行ったが、電力のやり取りを行う際に実際にはどの程度の損失が発生するか、実験によって検証する必要がある。
- 取引が成立したら実際に送電を行うことになるが、その指令の受け渡しを行う中間層のプロトコルについても整理する必要がある。
- 入札を行う間隔を短くし、また取り扱う価格も連続的に扱うようにした上でシミュレーションを行う必要がある。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、数多くの方々からのご指導、ご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。本当にありがとうございました。

ご多忙の中、指導していただいた藤井康正教授には心より御礼申し上げます。研究の進め方には何度も悩むことがありましたが、その都度適切なアドバイスを頂き進めていくことができました。論文を書き上げる事が出来たのは先生の懇切丁寧なご指導のおかげです。また、研究室生活面でも細かくご配慮していただき、研究面以外でも大変勉強になった大学院生活でした。本当にありがとうございました。

博士課程の山岸良雄さんには電力会社にお勤めしている方ならではの意見を頂くことができ、大変参考になりました。打ち合わせに参加されていない時もメールで丁寧にアドバイスをしてくださってありがとうございました。

また、既に卒業された諸先輩方を始め、修士一年の細谷佳文君、宮澤直幹君、学部四年の中村洋祐君、柴田紗英子さんには学生生活をサポートしていただき、非常に楽しい研究生活を送らせていただきました。ありがとうございました。

最後に、これまでの学生生活を経済面、精神面で支えてくれた家族に心より感謝し、謝辞といたします。

2010年2月

井上淳

## 参考文献

- [1] 環境省ホームページ  
<http://www.env.go.jp/>
- [2] 太陽光発電の新たな買取制度ポータルサイト  
<http://www.enecho.meti.go.jp/kaitori/>
- [3] Deploying renewables 2008  
<http://www.ica.org/Textbase/npsum/DeployRenew2008SUM.pdf>
- [4] 電気事業の経営 電気事業講座編集委員会 2007 年エネルギーフォーラム
- [5] 経済産業省ホームページ  
<http://www.meti.go.jp/index.html/>
- [6] Richard E.Brown : “Impact of Smart Grid on Distribution System Design” , IEEE Power and Energy Society General Meeting(2008)
- [7] SmartGrids : European Technology Platform  
<http://www.smartgrids.eu/>
- [8] 野村證券ホームページ  
<http://www.nomura.co.jp/>
- [9] 斎藤浩海, 豊田淳一: 「分散型電源群の微小発生電力を効果的に輸送する将来の新しいネットワーク」, 電気学会論文誌 B, Vol.115, No.6, pp568-575(1995)
- [10] 東京穀物商品取引所「ザラバシステム売買の付合わせについて」  
<http://www.tge.or.jp/japanese/whats/news/pdf/matchingrule20081021.pdf>
- [11] 三菱半導体ホームページ  
<http://www.mitsubishichips.com/Japan/index.html>
- [12] 日本ケミコン株式会社ホームページ  
<http://www.chemi-con.co.jp/>
- [13] ニチコン株式会社ホームページ  
<http://www.nichicon.co.jp/top.html>
- [14] 株式会社日立産機システムホームページ  
<http://www.hitachi-ies.co.jp/>
- [15] 東芝セミコンダクター社ホームページ  
<http://www.semicon.toshiba.co.jp/>
- [16] 東京大学出版会「経済学のための最適化理論入門」 西村清彦 (1990)
- [17] 細川智弘: 「自律分散型市場によって構成される革新的電力流通システムの提案」東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻修士論文(2009)
- [18] 朝倉書店「計算統計学の方法」 小西貞則、越智義道、大森裕浩(2008)
- [19] 社団法人日本建築学会「住宅におけるエネルギー消費量データベース」  
<http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/database/index.htm>

- [20] 原, 湯沢他:「非住宅建築物の環境関連データベース構築に関する研究 その 11 関東地区における非住宅建築物の時刻別エネルギー消費量調査」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2008)
- [21] 米津武則:「全国気象データに基づく家庭用太陽光発電のポテンシャル評価」、東京大学工学部電気工学科卒業論文(2002)

## 発表実績

井上淳， 藤井康正,“分散型電源普及時の電力流通システムに関する研究”， 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会， 2009 年 9 月

井上淳， 藤井康正,“分散型市場によって余剰電力を運用する革新的電力流通システムの提案”， 第 26 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス， 2010 年 1 月

井上淳， 藤井康正,“分散市場における小規模取引に基づく電力流通システムに関する研究”， 電気学会全国大会， 2010 年 3 月予定