

東京大学大学院工学系研究科

電気工学専攻

2006 年度修士論文

電力系統における電力貯蔵設備の費用便益評価

Cost Benefit Analysis of the Power Storage

Facilities in Power System

学籍番号 56397

氏名 都留 大和

指導教員 藤井 康正 助教授

(2007 年 2 月提出)

内容梗概

社会の情報化と快適さを求める人々のライフスタイルの変化は、冷房や動力の需要を高めており、それはまた夏場の電力のピーク負荷を先鋭にしている。一方で、情報化やロボットといった先端技術の進歩は、コンピュータの普及をうながし、停電が少なく電圧や周波数の変動が小さい高品質な電気の供給を要求している。先鋭化する負荷と高品質な電力供給への対応には、電気料金メニューによる方法、電気温水器など夜間電力利用、電気利用機器の効率向上、非常用電源の普及、そして電力貯蔵技術の導入などがある。この中で電力貯蔵技術による対策は平準化効果が最も大きく、かつ非常電源用としても活用できることから電力品質の向上にも役立つ方法として期待されている。

現在、日本の電力事業に関しても規制緩和が進んでおり、2005年4月からは50kW以上の需要家に対する卸電力市場が設置された。そのような自由化環境において、電力市場価格や停電発生の不確実性リスクが生じており、電力貯蔵設備の経済的価値を評価するためにはそれらの考慮が必須となっている。

そこで本研究では、電力市場価格の推移が確率微分方程式で表現できるという仮定の下、解析期間内における電力市場価格と停電発生の不確実性を考慮した上での、確率動的計画法による電力貯蔵設備の最適貯蔵戦略を導出するとともに、パラメータが電力貯蔵設備の経済的価値に及ぼす影響について分析をし、電力貯蔵設備導入の費用便益分析を行う。

第1章では研究背景として電力貯蔵設備の現状と電力自由化について述べた後、本研究の目的を定義する。

第2章では不確実性を模擬する際に使用する確率過程と、その確率過程を解くために必要となる伊藤公式による確率微分方程式について概説した。また、確率微分方程式の数値解析解を解くために必要とされる有限差分法の基本的な特徴や考え方について示す。

第3章では電力小売事業者についての設定を行い、電力調達コストについての定義を行った。また小売事業者にとってのリスクとなる不確実性（電力市場価格・停電発生の有無）の模擬方法について説明した。さらにそれら単位時間あたりの不確実性の変動と、状態変数を考慮した確率動的計画法を用いた総電力調達コストの導出方法と、本論文で提案する差分法による具体的な数値解析方法について説明する。

第4章では前述した手法を用いて電力小売事業者の最適電力貯蔵戦略を導出する。次に、日を跨いだ連続運転を可能とするアルゴリズムによる最適貯蔵戦略を導出する。

第5章では電力貯蔵設備の経済的価値について定義し、パラメータの変更を行うことで電力貯蔵設備の経済的価値がどのような影響を受けるかについて説明する。また、固定費を考慮することで電力貯蔵設備導入の費用便益分析を行い、続いてモンテカルロ法を用いて結果の妥当性の確認を行う。最後に与えられた初期投資額の中で、最適電力貯蔵設備容量の探索を行う。

第6章では本研究において得られた知見と今後の課題を述べる。

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	電力貯蔵技術の役割と展望	1
1.1.1.1	はじめに	1
1.1.1.2	電力貯蔵技術の役割	1
1.1.1.3	電力貯蔵技術の種類と特徴	2
1.1.1.4	電力貯蔵技術の展望	4
1.1.2	日本における電力自由化の流れ	6
1.1.2.1	電力自由化とは	6
1.1.2.2	電気事業法の改正	6
1.1.3	電力貯蔵システムの運用戦略	9
1.2	研究目的	10
第2章	確率過程と数値解析法	11
2.1	確率過程と確率微分方程式	11
2.1.1	標準ウィナー過程と一般ウィナー過程	11
2.1.2	平均回帰過程	12
2.1.3	伊藤の定理	13
2.2	有限差分法による数値解析手法	15
2.2.1	有限差分法による変微分方程式の数値解析	15
2.2.2	差分近似の方法	16
第3章	確率動的計画法を用いた総電力調達コストの導出	18
3.1	電力小売事業者の電力貯蔵コスト	18
3.1.1	電力小売事業者の設定	18
3.1.2	各時間帯における電力貯蔵コスト	19
3.2	不確実変数と確率過程	20
3.2.1	電力市場価格の特徴	20
3.2.2	電力市場価格変動モデル	21
3.3	確率動的計画法による総電力貯蔵コストの導出	24
第4章	最適電力貯蔵戦略の導出	30
4.1	前提条件	30
4.2	解析期間1日の場合の最適電力貯蔵戦略	31
4.3	連続運転を考慮した最適運用戦略	32
4.4	まとめ	35
第5章	電力貯蔵設備の費用便益評価	36
5.1	電力貯蔵設備の導入価値の定義	36
5.2	電力貯蔵設備の経済的価値の感度分析	38

5.2.1	貯蔵容量の影響.....	38
5.2.2	停電コストの影響.....	40
5.2.3	充放電効率の影響.....	42
5.2.4	平均事故発生間隔の影響.....	45
5.2.5	平均事故持続時間の影響.....	46
5.2.6	ボラティリティの影響.....	47
5.2.7	自己放電率の影響.....	48
5.3	電力貯蔵設備の費用便益分析.....	49
5.4	モンテカルロ法による妥当性の確認.....	51
5.4.1	モンテカルロ法とは.....	51
5.4.2	前提条件.....	51
5.4.3	結果.....	53
5.5	最適電力貯蔵設備容量の探索.....	55
5.5.1	前提条件.....	55
5.5.2	結果.....	56
5.6	まとめ.....	57
第6章	結論.....	58
6.1	本研究の成果.....	58
6.2	今後の課題.....	59
	付録.....	60
	謝辞.....	63
	発表文献.....	64
	参考文献.....	65

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 電力貯蔵技術の役割と展望

1.1.1.1 はじめに

社会の情報化と快適さを求める人々のライフスタイルの変化は、冷房や動力の需要を高めており、それはまた夏場の電力のピーク負荷を先鋭にしている。一方で、情報化やロボットといった先端技術の進歩は、コンピュータの普及をうながし、停電が少なく電圧や周波数の変動が小さい高品質な電気の供給を要求している。先鋭化する負荷と高品質な電力供給への対応には、電気料金メニューによる方法、電気温水器など夜間電力利用、電気利用機器の効率向上、非常用電源の普及、そして電力貯蔵技術の導入などがある。この中で電力貯蔵技術による対策は平準化効果が最も大きく、かつ非常電源用としても活用できることから電力品質の向上にも役立つ方法として期待されている。

1.1.1.2 電力貯蔵技術の役割

電力貯蔵とは、夜間など需要のオフピーク時にベース電源の電気でエネルギーを貯蔵し、昼間のピーク負荷時にそれを電気に変換する、いわゆる負荷の移行によって平準化を行うものである。それは燃料コストが安価な大型電源の夜間稼働率を高めることになり、連続運転による大型電源の信頼性が向上するだけでなく、昼間のピーク負荷用の火力電源の燃料、特に石油の消費量を節約することになる。将来、大型電源に原子力発電が利用できるようになれば、一定負荷での連続運転によって、原子力発電の安全性が向上するだけでなく、石油への依存度低下によって我が国のエネルギーセキュリティ向上とCO₂排出量の削減に貢献することにもなる。また最近話題の分散型電源の導入にあたり、系統の安定性を保つために電力貯蔵システムが期待されている。

電力貯蔵には優れた負荷応答特性のほかに、電源の計画と運用において将来の不確実性に対応できる利点もある。表 1-1 は電力貯蔵技術の導入によって得られる効果を示したものである。表に示すように電力系統の信頼性を高める効果として、電圧・周波数調整あるいは停電時の非常用電源、さらに予備力としての働きがある。また経済効果としては、負荷平準化や信頼性向上にかかる費用削減、起動停止時や負荷追従による効率低下に伴う燃料費の低減、それに電圧・周波数調整設備費といった設備費の削減がある¹。

表 1-1 電力貯蔵の導入効果

		設備面	運用面
発電	負荷平準化	<ul style="list-style-type: none"> ・ピーク電源の削減 ・ベース電源の設備増 ・予備力の低減 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料費の節約 ・利用率向上による熱効率の上昇 ・起動回数削減による起動損失の低減と補修点検作業の軽減
	計画	<ul style="list-style-type: none"> ・立地制約が小さい ・建設期間の短縮 ・不確実な将来の電源計画への柔軟性 ・一時的、ローカルな負荷増への対応 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料の貯蔵量、購入量に柔軟性
系統信頼性		<ul style="list-style-type: none"> ・調整設備(電圧・周波数)の削減 ・動揺設備の削減 ・停電時の非常用電源を削減 ・短絡時の補償設備の削減 	<ul style="list-style-type: none"> ・助燃費の削減 ・調整設備などの燃料費削減
送電 -その他		<ul style="list-style-type: none"> ・設備の削減 ・建設の繰り延べ 	<ul style="list-style-type: none"> ・環境保全効果

1.1.1.3 電力貯蔵技術の種類と特徴

社会のエネルギー需要は、時々刻々と変化しており、その変化する需要に合わせてエネルギーは供給されねばならない。エネルギーの中で、石油、天然ガス、熱のようにそのままのエネルギー形態で貯蔵できるものは、需要の変動に対して安定した供給ができる。それに対して、太陽光、風力、それに電気はそのままの状態では貯蔵できないエネルギーであるために、需要の変動に対しては貯蔵できる他のエネルギー形態に変換して供給することになる。

石油などの化学物質は体積あたりのエネルギー密度が最も大きいエネルギーで、貯蔵特性に優れている。エネルギー密度は、化学、高温熱、運動、磁気、重力の順に小さくなっていく傾向がある。図 1-1 は、各種エネルギーの貯蔵特性をエネルギー密度と貯蔵設備費とで比較したもので、図の右下にあるエネルギーほどエネルギー密度が高く安価に貯蔵できることを示している。図から石油と液体水素が最も優れ、次いで化学物質や熱貯蔵が続いており、それに対して左上の実線で囲った電力貯蔵用のエネルギー形態はあまり優れた特性のものでないことがわかる。

石油や LNG は、実際に大量に貯蔵されていることからわかるように、貯蔵特性に優れている。しかし、それを電力貯蔵用のエネルギー形態としてみると、必ずしも優れているとはいえない。電力貯蔵は、電気のあるエネルギー形態に変換して貯蔵し、それを再び電気に変換するといった 2 つの変換プロセスから成り立っている。電力貯蔵用のエネルギー媒体に石油、化学物質、熱を使うと、2 つの変換によって総合的な効率率は 20% 以下にまで低

下する。変換効率の低下は、貯蔵時の費用がたとえ安価であっても全体からみると電力貯蔵技術を経済的に劣ったものにしてしまう。それに対して、実用化している電力貯蔵技術は一般に、65%以上の高い変換効率を有し変換時のエネルギー損失が小さいために、貯蔵面での特性が劣っていても全体からみると経済的になる。

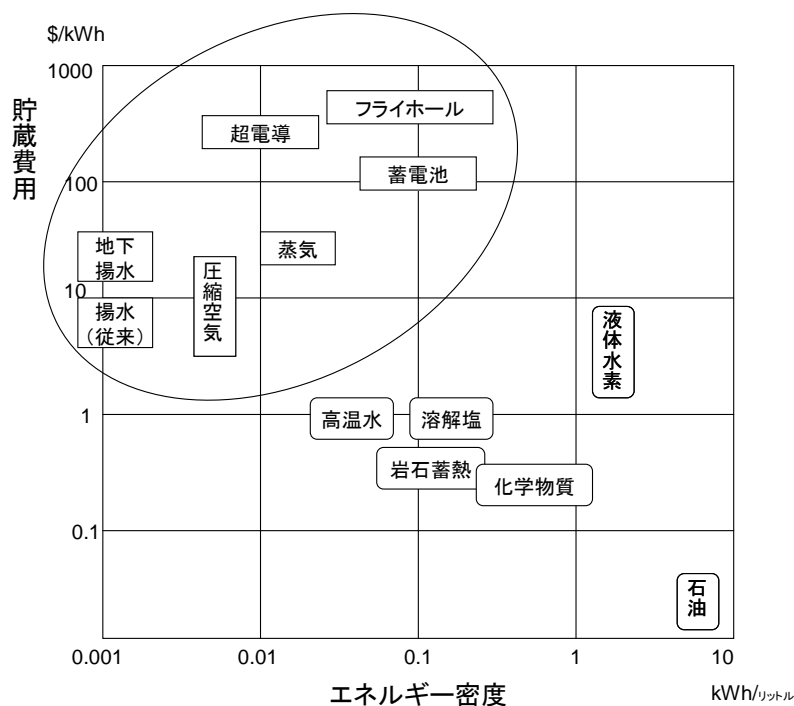


図 1-1 エネルギー貯蔵のエネルギー密度と貯蔵費用

電力貯蔵技術には、既に商用化している揚水発電の他に、圧縮空気、蓄電池、フライホイール、超電導などがある。図 1-1 の実線で囲った電力貯蔵技術の特性をみると、エネルギー密度が大きいものほど貯蔵費用は増大する傾向にある。それは貯蔵密度を高めるためには、経済的な負担が大きくなることを示している。すなわち超電導、蓄電池、フライホイールといった磁気、化学、あるいは機械的な貯蔵方法になるほど、設備はより精密になり製造費用も増大する。それに対し、圧力や位置エネルギーによってエネルギーを貯えている圧縮空気や揚水発電は、貯蔵設備の多くが土木工事により建設できるために、エネルギー貯蔵密度は小さくても費用は安くなる。

エネルギー密度と貯蔵効率が大きい電力貯蔵ほど、設備をコンパクトにすることができる。表 1-2 は、各種貯蔵技術を貯蔵、運転、経済性で比較したものである。蓄電池とフライホイールは、貯蔵密度が大きく装置が小型になるだけでなく、起動停止と負荷応答性といったシステムの運用にも優れている。しかし、問題は装置の寿命と経済性である。貯蔵密度と運用特性を高めるために装置を精密にしているため、その分は寿命が短くかつ単位エネルギーあたりの貯蔵設備費も高くなっている。

表 1-2 電力貯蔵技術の比較

		揚水	圧縮空気	蓄電池	超伝導	フライホイール
貯蔵特性	規模	中～大	中	小～中	小～中	小
	[万 kWh]	50～1000	50～250	～80	～10	～1
	密度[kWh/m ³]	～1	8	100	10	50
	貯蔵効率[%]	70	75～80	70～75	80～90	～70
運転特性	起動・停止	1分程度	20～30分	瞬時	瞬時	瞬時
	負荷追従性	大	中	大	大	大
	信頼性	有	有	有	確立中	確立中
	寿命	40年以上	20年以上	10年以上	30年以上	10年以上
建設費	発電部[万円/kW]	14	14	4*	4*	4*
	貯蔵部[万円/kWh]	1	0.5～1.5*	2～3*	2～3*	15以上*
建設期間[年]		8～12	2～6	1～3	2～5	1～2

*：技術進歩を見込んだ商用時のコスト

異なる電力貯蔵技術を運用性と経済性から比較すると、化学や運動エネルギーで貯える蓄電池とフライホイールは小型の貯蔵設備として優れており、圧力や位置エネルギーで貯える圧縮空気と揚水発電は大型に向いており、超伝導ではその中間に位置づけられることになる。

1.1.1.4 電力貯蔵技術の展望

揚水発電

揚水発電は、大規模電力貯蔵技術として実用化している技術である。わが国の揚水発電の設備容量は約 2000 万 kW で、総設備容量の約 10% を占めている。揚水発電所は、「上池」と「下池」の 2 つの貯水池を設け、夜間や休日のオフピーク時に大型火力や原子力の電気を利用して下池から上池に水を汲み上げておき、昼間の電力需要がピークのときにこの水を使って発電するシステムである。上池と下池との落差を大きくするほど発電出力も大きくなるため高落差、大容量化へ向けて技術開発が進んでいる。

圧縮空気貯蔵

新しい電力貯蔵技術に期待されていることは、揚水発電よりも立地制約が小さく、需要地近接の発電所、変電所、需要家など電力系統内のさまざまな場所に設置できることである。圧縮空気貯蔵は、揚水発電を代替する中型電力貯蔵技術である。オフピーク時の電気を利用して高圧空気を貯蔵し、それを昼間、ガスタービンを利用して発電する技術であり、欧米では岩塩層を利用して高圧空気を貯蔵した商用プラントが建設されている。わが国の

場合、地下の岩盤や海底の貯蔵タンクなどに貯蔵しなければならず貯蔵費用が高くなるという問題がある。経済的な導入を図るためには、地下軟岩に安価に設置できる貯気槽の開発や、圧縮機やガスタービンの排熱が暖房や冷房などに利用できる都市型のコージェネレーションシステムの開発が求められる。

超電導電力貯蔵

超電導電力貯蔵は、コイルに流れる電流でエネルギーを貯える技術である。貯蔵効率は90%以上と大きく、かつ蓄電池と同じように負荷の変動に瞬時に追従できる優れた特性を有している。高温超伝導の薄膜開発は着々と研究成果が上がってきている。超電導物質を実際に利用するには、材料を線材や薄膜に加工したとき、外部から磁界がかかった場合でも十分な電流密度と強度が保てるようにしなければならない。高温超電導線材の実現には、まだその開発に相当の期間と経済的リスクを伴うことになる。しかし超電導技術の発展は、電気事業だけでなくエレクトロニクス、医療、輸送といった広範囲の分野に影響を与えるため、その可能性に向けた着実な研究開発が望まれる。

蓄電池

蓄電池の利点は、設備のコンパクトさと負荷への応答の良さである。分散型の電力貯蔵技術として、電気事業の電力貯蔵以外に、家電製品、工場や事務所の非常用電源、電気自動車の動力源、それに自然エネルギーの貯蔵などさまざまな用途に利用されている。電池技術の流れとしては、高エネルギー密度、長寿命、経済性、環境性、安全性、リサイクル性など高性能を目指した技術開発が進んでいる。その中で高エネルギー密度は今後の蓄電池の用途の拡大と普及を考えたとき、最も重要な課題になる。

既存の蓄電池の代表格は、鉛蓄電池のニッケルカドミウム蓄電池である。鉛蓄電池は、小型シール型の導入で据え付け方の自由度が増し、それまでの産業用や自動車用を中心とする分野からポータブル機器用へとその用途を拡大している。ニッケルカドミウム蓄電池は正極製造方法の改良などの技術進歩により高容量化に成功し、理論的な限界に近いレベルにまで発展している。

現在開発中の民生用蓄電池の中で期待されているのが、ニッケル水素電池とリチウム蓄電池である。ニッケル水素蓄電池は、負極に水素吸蔵合金をしようしており、起電力の大きさがニッケルカドミウム電池とほぼ同じである。その特徴は、容量が比較的大きく、環境汚染物質であるカドミウムの代わりに水素吸蔵合金を使用している点である。ニッケル水素蓄電池に次ぐ新しい電池として新しい電池としてリチウム蓄電池が注目されている。中でも負極にリチウム金属に代わる炭素材料を採用したリチウムイオン蓄電池は、優れた性能から急速に市場を拡大しつつある。

電気事業の蓄電池は、揚水発電などの他の電力貯蔵技術に比べると、設備がコンパクトで立地制約が小さく、需要地近接の発電所、変電所、需要家など電力系統内の色々な場所に設置できるといった特徴がある。また蓄電池は負荷応答性と信頼性にも優れている。現在、非常用電源の他にピークカット電源や変・配電所などでの電圧・周波数調整用電源と

してこれまでの鉛蓄電池に代わって、NaS 電池，レドックスフロー電池が普及しつつある。本論文で評価対象としても，この蓄電池を想定している。

1.1.2 日本における電力自由化の流れ

1.1.2.1 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，

- 一 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。
- 二 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
- 三 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，”でき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疎かになってしまい，先進国では一番高い電気となってしまったのである。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，という議論に電力自由化は端を発している。

1.1.2.2 電気事業法の改正

以下，2003 年に制定された現行の改正電気事業法について説明する。改正案の重要項目は，

- 一 自由化範囲を 2004 年 3 月以前の約 30%を段階的に開放し，2005 年度には約 60%（高圧の 50kW 以上受電）に広げる。（図 1-2 参照）

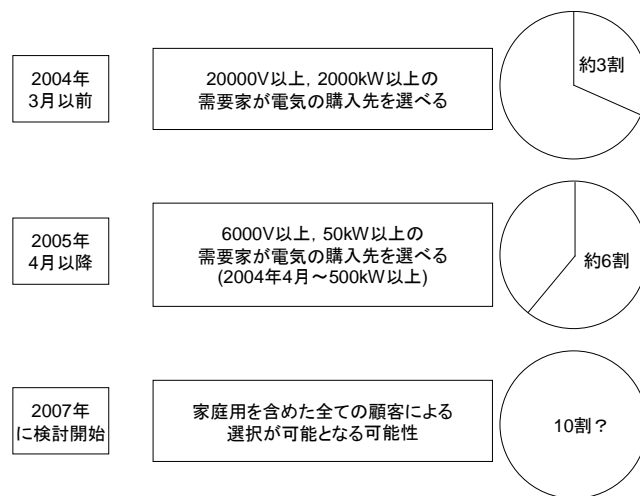


図 1-2 自由化範囲の拡大

二 パンケーキ（電力会社の供給地域をまたぐ毎に課金されるいわゆる振替料金）を廃止して、全国規模の電力融通をやりやすくし、競争の活性化を促進できる環境を整えた。（図 1-3 参照）

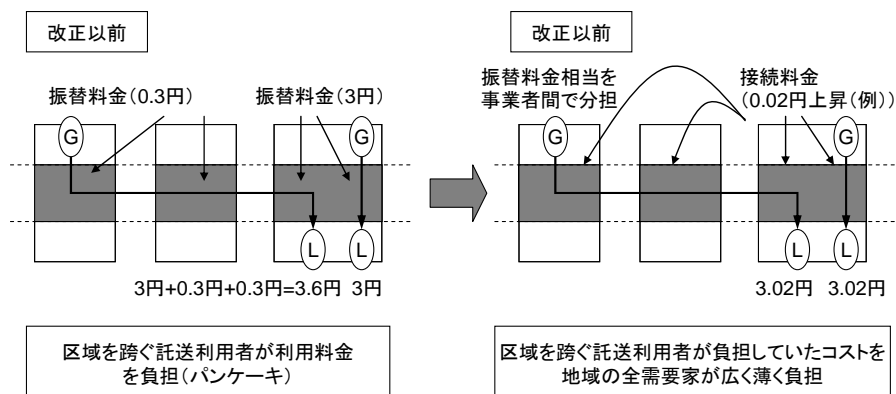


図 1-3 振替供給制度の見直し

- 三 全国一律，卸電力取引市場を設立，オークション方式によるスポット方式と，ザラ場方式による先渡し市場をつくり，電力の売り買いを活発化させることにした。
- 四 今回は発送電一貫体制堅持で構造規制とはならなかったため，電力会社も外部業者（PPS など）も同時に利用する送電システムの中立性を確保する必要がある。そのために行為規制を徹底させる目的で，中立期間（電力系統利用協議会）を設立し，系統運用に関するルール策定・監視及び紛争時の斡旋・調停を行うことで，公平性と透明性を確実にする。
- 五 小売事業者の活動範囲を広げるために同時同量を緩和して，これまでの 3%から 10%の範囲で自由に選べるようにする。

六 電源開発促進法を廃止して、電源開発（株）を民営化し、市場をより活性化する目玉とする。

七 分散電源からの自営線を認め、供給源の多様化を図る。

八 長期固定電源の投資環境の整備を行う。例えば、原子力発電等は自由化に馴染まないが、国家的見地よりどう持続的安定運転を確保していくかという対応策を講じる。

以上の通りだが、前面規制時代から今日までの流れをもう一度、図解しわかりやすくしたのが図 1-4 から図 1-7 である。

図 1-4 は 1994 年以前の体制で、戦後の復興と日本の高度成長に多大な貢献をした。

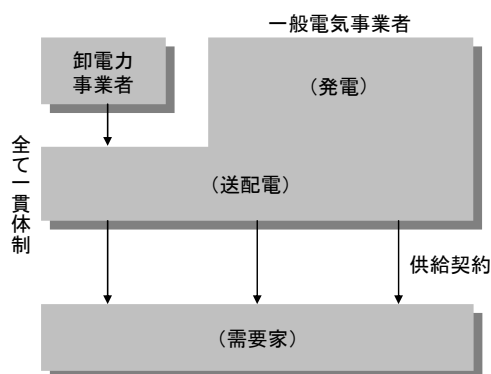


図 1-4 一貫体制 (1994 年まで)

図 1-5 は独立系発電事業者（IPP：Independent Power Producer）が導入された改正の第一弾である。IPP は当時は画期的であったが、IPP で作った電気は全て規制産業である電力会社が買い上げてしまい、消費者からすると具体的な値下げが見えるものではなかった。

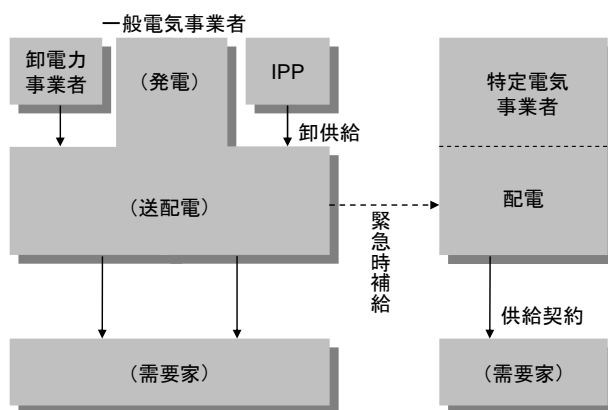


図 1-5 1995 年電気事業制度改革

続く 2000 年の電気事業法改正により、図 1-6 のように送電線が開放され、特定規模電気事業（特定地域内に限った電力事業）が認められた。

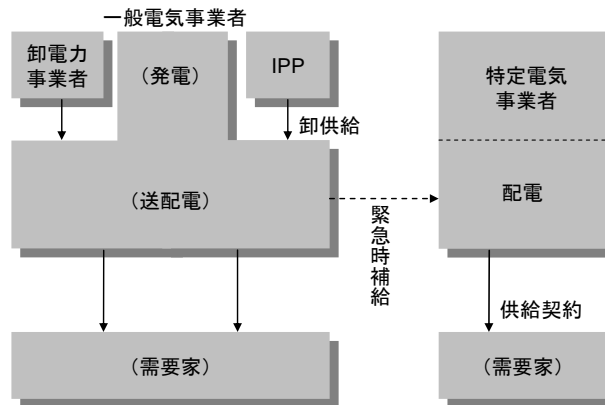


図 1-6 2000 年電気事業改正

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、「発送電一貫体制の堅持」の道を選んでいる。従って図 1-6 からは大きく変化せず、図 1-7 のような現体制となっている。^{2 3 4 5}

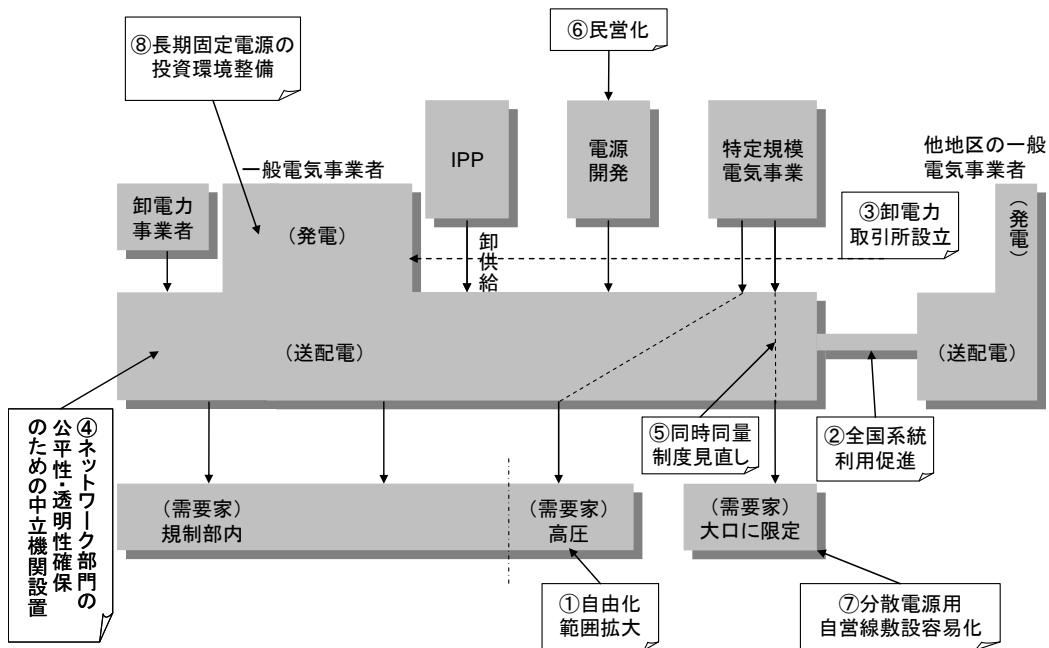


図 1-7 現体制

1.1.3 電力貯蔵システムの運用戦略

自由化環境における貯蔵設備を保持する小売事業者は、電力価格変動リスクと停電発生による相対契約先へのペナルティー料金支払いリスクの両方を考慮しつつ、貯蔵設備を運用せねばならない。つまり、設備容量をできる限り有効に活かしてオフピーク時である夜間の電力の安い時間に電力を買い、ピーク時の電力の高い時間に電力を買うといった行動

をとりつつ、停電時の非常電源用として、一定の電力を保持し続けるという 2 点を考慮しながら最適運用を行う必要がある。

1.2 研究目的

前述したように、ライフスタイルの変化や電力自由化により、電力貯蔵設備の導入が有効であるのは認識されているが、それを定量的に分析した研究は少ない。自由化された電力市場での短期または長期における電力価格の変動や停電発生による損失は電力貯蔵設備を運用する際にも大きなリスクとなる。そういったリスクを考慮した上で電力貯蔵設備の最適貯蔵戦略を導出し、さらにはその最適運用を行った場合に電力貯蔵設備導入によって得られる費用便益を定量的に分析することは、今後の貯蔵設備促進のために必要と考えられる。

近年、このような電力市場価格や停電発生の不確実性のリスクを回避するために金融工学を応用し、相対契約や発電設備の価値を求めるといった研究が盛んに行われている。⁶⁷⁸⁹ しかしながら、電力貯蔵設備の貯蔵戦略に対して電力市場価格と停電発生の不確実性を考慮した研究は少ない。¹⁰

そこで本論文では、金融工学にも適応される確率微分方程式と動的計画法を応用し、自由化された電力市場において、電力価格と停電コストの不確実性を考慮した上で、電力貯蔵設備内の貯蔵量を状態量と考え、それらの価値を数量化する数学的モデルを提案する。そしてその結果を検証すると共に、電力貯蔵設備の最適貯蔵戦略について不確実性の及ぼす影響について検討を行う。

次に、導出された最適貯蔵戦略を行った場合、電力貯蔵設備を導入していない場合に比べてどの程度の費用便益が生じるのかを、様々なパラメータを変化させて定量的に分析する。

最後に、初期投資額を固定させた場合の最適貯蔵設備容量がどの程度になるかについての探索を行う。

第2章 確率過程と数値解析法

本章では、不確実な現象をモデル化する確率過程を概説し、本論文で用いる伊藤の定理と確率微分方程式について説明する。また確率微分方程式を数値解析する際に用いる、モンテカルロ法と有限差分法の基本的なアルゴリズムを示す。

2.1 確率過程と確率微分方程式

時間とともに変化する確率変数 $X(t)$ で表される確率的な現象を、「確率過程」という。金融工学では、資産または証券の価格などの価格は時間的な推移に伴って予想できない形でランダムに変動する。この資産価格の変動をどのような確率過程で記述するのが妥当であるかという問題は、長年にわたって研究されてきた。ここでは、本論文に深いかかわりを持つ数種類の確率過程について、またその微分方程式について説明する。

2.1.1 標準ウィナー過程と一般ウィナー過程

確率変数 $Z_t = Z(t)$ に対し、

$$dZ_t \equiv Z_{t+dt} - Z_t \quad (2-1)$$

もし dZ_t が平均 0、分散 dt の正規分布に従う時、 dZ_t をホワイトノイズと呼び、 Z_t を標準ウィナー過程と呼ぶ。標準ウィナー過程は次の性質を持つ。

性質 1 $E[dZ_t] = 0$

性質 2 $E[dZ_t \cdot dt] = dtE[dZ_t] = 0$

性質 3 $Var[dZ_t] = E[(dZ_t)^2] = dt$

つまり、 dZ_t の分散は dt となり消滅しないが、 $[(dZ_t)^\alpha]$, $\alpha > 1$, の分散は消滅する。確率変数 dZ_t の関数 $f(\cdot)$ について $Var[f(dZ_t)] = 0$ ならば、 $E[f(dZ_t)] = f(dZ_t)$ となる。従って、確率変数の計算ルールとして次の性質を得る。

ルール 1 $(dZ_t)^2 = dt$

ルール 2 $dZ_t \cdot dt = 0$

ここで、標準ウィナー過程 Z_t を与えられたとき、次のように拡張された確率過程 X_t ,

$$dX_t = \mu_{X_t,t} dt + \sigma_{X_t,t} dZ_t \quad (2-2)$$

を一般ウィナー過程と呼ぶ。

特に $\mu_{X_t,t} = \mu$, $\sigma_{X_t,t} = \sigma$ なる定数のパラメータのとき、代数ウィナー過程と呼び、 μ は期待値を表すドリフト、 σ は不確実性を表すボラティリティと呼ぶ。¹¹

2.1.2 平均回帰過程

原油や電力等のエネルギー価格や金利等については，長期的に一定価格に収斂する傾向(平均回帰性)があり，その傾向を取り入れた確率過程として平均回帰過程が用いられており，以下のような式で与えられる。

$$dX_t = \alpha(\mu - X_t)dt + \sigma X_t^\gamma dZ_t \quad (2-3)$$

ただし， α ：回帰速度(>0)
 μ ：長期均衡値(>0)
 σ ：ボラティリティ(>0)
 γ ：任意パラメータ
 dZ_t ：ウィナー過程

ここで， $E[dX_t] = \alpha(\mu - X_t)dt$ となるから，もし $X_t > \mu$ ならば， $E[dX_t] < 0$ となって将来の X_t を引き下げる傾向にある。逆に $X_t < \mu$ ならば X_t を引き上げる力が作用する。このように現在の価格が μ から離れすぎると μ に引き戻される性質を指して平均回帰過程と呼んでいるのである。

なお， $\text{Var}[dX_t] = \sigma^2 X_t^{2\gamma} dt$ となり， $\gamma > 1/2$ に対して，現在の価格 X_t が大きい時 dX_t の分散も大きい。この確率過程は次のような性質を持つ。

性質1 $X_0 > 0$ である限り，確率1で $X_t > 0$ である。

性質2 $X_t \rightarrow 0$ の時， $E[dX_t] \rightarrow \alpha \mu > 0$ となり， $\text{Var}[dX_t] \rightarrow 0$ となる。

2.1.3 伊藤の定理

伊藤の定理とは、 X_t が(2-2)式のような確率微分によって記述される時、 X_t の関数 f の確率微分がどのように表現されるかを示したものである。

(2-2)式で与えられる確率過程 X_t と t の関数 $f_{X_t,t} \equiv f(X_t,t)$ は、 t に関して連続微分可能で、

X_t の実現地 x に関して2回連続微分可能な関数と仮定すると、テーラー展開すれば、

$$\begin{aligned} df_{X_t,t} &= f_{X_t+dX_t,t+dt} - f_{X_t,t} \\ &= \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{\partial^2 f}{\partial t \partial X} dt dX + \frac{\partial f}{\partial X} dX + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} dX^2 \\ &= \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{\partial^2 f}{\partial t \partial X} dt [\mu_{X_t,t} dt + \sigma_{X_t,t} dZ] + \frac{\partial f}{\partial X} [\mu_{X_t,t} dt + \sigma_{X_t,t} dZ] \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} [\mu_{X_t,t}^2 (dt)^2 + \sigma_{X_t,t}^2 (dZ)^2 + 2\mu_{X_t,t} \sigma_{X_t,t} dt dZ] \end{aligned}$$

ここで、 $(dt)^2 = 0$, $dt \cdot dZ = 0$, $(dZ)^2 = dt$ の3つのルールを適用すると、

$$df_{X_t,t} = \left[\frac{\partial f}{\partial t} + \mu_{X_t,t} \frac{\partial f}{\partial X} + \frac{1}{2} \sigma_{X_t,t}^2 \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \right] dt + \sigma_{X_t,t} \frac{\partial f}{\partial X} dZ_t$$

(2-4)

$$a_f \equiv \left[\frac{\partial f}{\partial t} + \mu_{X_t,t} \frac{\partial f}{\partial X} + \frac{1}{2} \sigma_{X_t,t}^2 \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} \right], \quad b_f \equiv \sigma_{X_t,t} \frac{\partial f}{\partial X}$$

と置く。式は

$$df_{X_t,t} = a_f dt + b_f dZ_t$$

(2-5)

従って、確率変数 X_t の関数 $f_{X_t,t}$ もまた(2-2)式と同じ形の確率微分方程式で表現できるので

ある。このことから、この定理を伊藤の交換公式とも呼ぶ。

次に、 n 次元のウィナー過程 $\{Z_i(t), i=1,2,\dots,n\}$ に対する伊藤の定理の一般型を述べる。

$$dX_i(t) = a_i(X(t),t)dt + b_i(X(t),t)dZ_i(t) \quad i=1,2,\dots,n$$

(2-6)

で記述される n 個の確率過程のベクトル $X(t) = \{X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)\}$ が与えられたとき、関数 $f = f(t, X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t))$ は t に関して連続微分可能、各 X_i に関して2回連続微分可能であるとすると、テーラー展開により、

$$df = \frac{\partial f}{\partial t} dt + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial X_i} dX_i(t) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial X_i \partial X_j} dX_i(t) dX_j(t) \quad (2-7)$$

ここで、ウィナー過程 dZ_i と dZ_j の相関係数を $\rho_{ij} \cdot dt = E[dZ_i \cdot dZ_j]$ とし、(2-6)式を(2-7)式に代入し、上記で述べたウィナー過程の計算ルールを適用すれば、次の式が得られる。

$$df = \left[\frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^n a_i \frac{\partial f}{\partial X_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} b_i b_j \frac{\partial^2 f}{\partial X_i \partial X_j} \right] dt + \sum_{i=1}^n b_i \frac{\partial f}{\partial X_i} dZ_i(t) \quad (2-8)$$

2.2 有限差分法による数値解析手法

差分法とは、微分方程式を差分方程式で近似して解く方法のことである。派生商品の評価にあたり差分法を用いることは、解が一意に求まることや、初期値の値を固定する必要がない等の利点があるが、数式を解析的に解かなければならないことや、計算時間や必要記憶容量の制約により、変数の数やその刻み幅の数をあまり大きくすることができない等の問題点がある。以下に偏微分方程式の差分法による数値解法について述べる。^{1 2}

2.2.1 有限差分法による変微分方程式の数値解析

以下では、(2-9)式に示す 2 階線形偏微分方程式について、有限差分法を用いた偏微分方程式の数値解法のプロセスを説明する。

$$0 = a_0 + a_1 F(x,t) + a_2 \frac{\partial F(x,t)}{\partial x} + a_3 \frac{\partial^2 F(x,t)}{\partial x^2} + a_4 \frac{\partial F(x,t)}{\partial t} \quad (2-9)$$

ステップ 1 : グリッドの設定

x に関して十分小さな X_{min} と十分大きな X_{max} をとり、適当な N 個の区間に区切る。次に時間 t に関しても、現在の時点 t_0 、満期 T として M 個の適当な区間に区切る。

このようにして、時間 t と変数 x 平面を長方形グリッドに分割する。

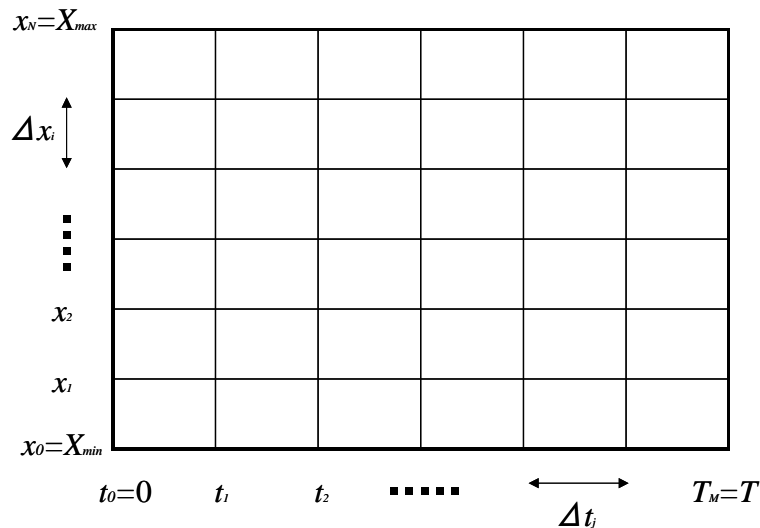


図 2-1 グリッドの設定

ステップ 2 : 偏微分方程式の差分近似

偏微分方程式の偏微分を差分で置き換える。この置き換え方にはいくつか方法があり、

それによって近似誤差やアルゴリズムが異なってくる。

ステップ 3 : 満期時点の $F(x, T)$ の計算

満期時点の $F(x, T)$ の値を $F(x_b, t_M)$ の境界条件として与える。

ステップ 4 : 1 時点前の関数 $F(x_b, t_{j-1})$ を計算する

偏微分を差分で置き換えることによって、 $F(x_b, t_j)$ と $F(x_b, t_{j-1})$ の関係が明らかにされるので、これと境界条件の $F(x_b, t_M)$ から $F(x_b, t_{M-1})$ の値を計算する。

以下、ステップ 4 を繰り返し適用することによって、現在時点における $F(x_b, t_0)$ の値が計算できる。

2.2.2 差分近似の方法

関数 $F(x, T)$ に関する偏微分を差分近似する。1 階の偏微分 $\partial F / \partial x$ の差分近似には、前進差分、後退差分、そして中心差分がある。このうち、前進差分近似と後退差分近似は時間に関する偏微分の差分近似と同様に定義される。以下、それぞれの差分近似は次のようになる。

● 前進差分近似

$$\frac{\partial F}{\partial x} \approx \frac{F_{i+1,j} - F_{i,j}}{\Delta x} \quad (2-10)$$

● 後退差分近似

$$\frac{\partial F}{\partial x} \approx \frac{F_{i,j} - F_{i-1,j}}{\Delta x} \quad (2-11)$$

● 中心差分近似

$$\frac{\partial F}{\partial x} \approx \frac{F_{i+1,j} - F_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (2-12)$$

図 2-2 は、関数 $F(x, T)$ における、 $\partial F / \partial x$ に関する 3 つの差分近似を表したものである。

関数 $F(x, T)$ に関する 2 階の偏微分 $\partial^2 F / \partial x^2$ の差分近似は次のように与えられる。

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) \approx \left(\frac{F_{i+1,j} - F_{i,j}}{\Delta x} - \frac{F_{i,j} - F_{i-1,j}}{\Delta x} \right) / \Delta x = \frac{F_{i+1,j} - 2F_{i,j} + F_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \quad (2-13)$$

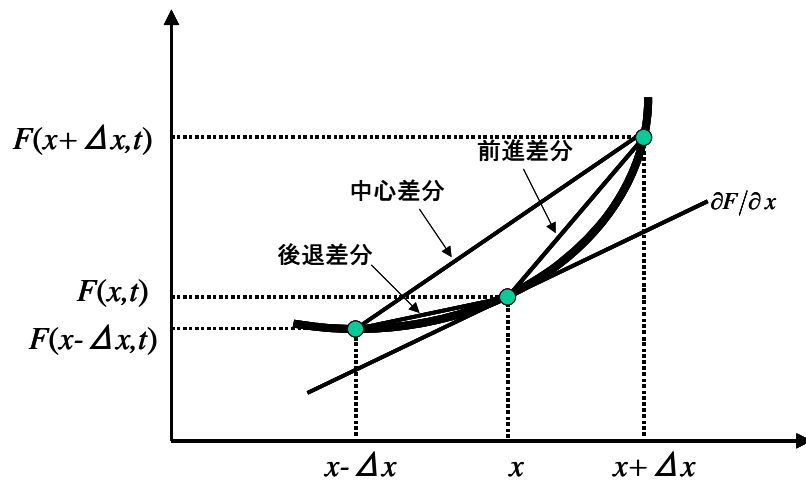


圖 2-2 差分近似

第3章 確率動的計画法を用いた総電力貯蔵コストの導出

本章では、電力小売事業者の電力貯蔵コストについて定義し、小売事業者にとってのリスクである不確実性（電力市場価格、停電発生の有無）の模擬方法について説明する。またそれらの不確実性と、状態変数を考慮した確率動的計画法を用いた総電力貯蔵コストの導出方法を述べ、差分法による具体的な解放を説明する。

3.1 電力小売事業者の電力貯蔵コスト

本節では本論文で想定する電力小売事業者のモデルについて説明し、その電力貯蔵コストを定義する。電力貯蔵設備を保持する小売事業者は、刻々と変化する電力市場価格といつ発生するか分からない停電コストの両方を考慮して、貯蔵戦略を導出しなければならない。

3.1.1 電力小売事業者の設定

本論文における電力小売事業者は電力貯蔵設備を保持しており、特定の需要家と相対契約を結んでいる。事故の発生していない正常時は卸電力市場を通じて需要家に電力を調達していると同時に、保持している電力貯蔵設備を用いて、卸電力市場で安い時間帯に電力を買い、高い時間帯に電力を売ることによって利益を得ている。送電線での事故発生により卸電力市場から需要家への供給が不可能となった場合には、保持している電力貯蔵設備から需要家へ電力を供給するが、不足した供給量分はペナルティーを支払う。正常状態と故障状態は一定の確率で遷移し、事故発生時には卸電力市場からの電力の調達は不可能となるものとする。(図 3-1)

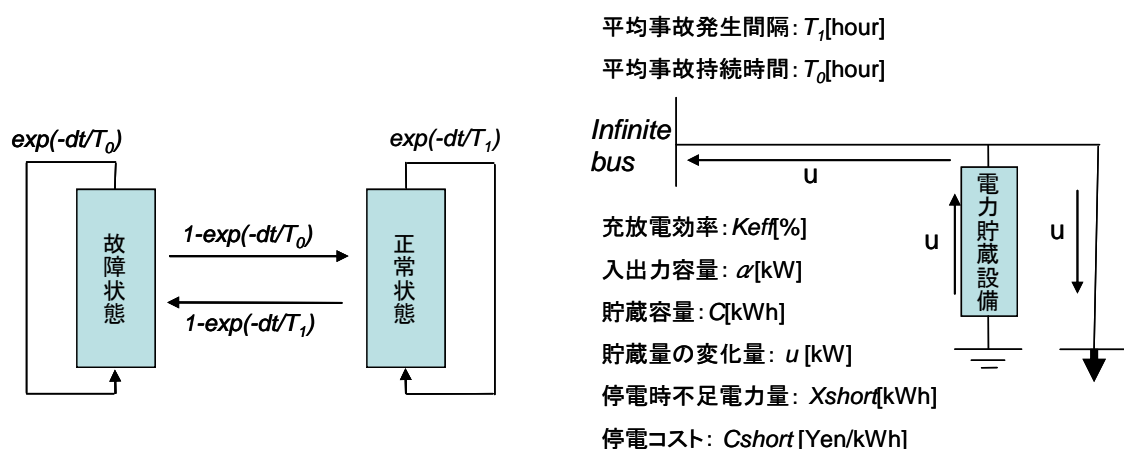


図 3-1 電力小売事業者モデル概要

3.1.2 各時間帯における電力貯蔵コスト

電力貯蔵設備の状態 s を、その電力貯蔵設備が貯蔵している電力貯蔵量とすると、各時間帯における単位時間当たりの電力貯蔵コスト $\pi_{s,t}$ は、 FC を固定費、 $VC_{s,t}$ を可変費として、以下のように定義される。

$$\pi_{s,t} = FC + VC_{s,t} \quad (3-1)$$

固定費 FC は、

$$FC = PF_{re} \cdot Cap_{re} \quad (3-2)$$

ただし、 PF_{re} : 電力貯蔵設備の単位時間あたりの固定料金[yen/kWh /hour]

Cap_{re} : 最大電力貯蔵量[kWh]

可変費 $VC_{s,t}$ は、 u を単位時間における、電力貯蔵設備内の電力貯蔵量の変化量[kW]とすると、

正常時

$$VC_{s,t} = Q_{re}(s, u, t) \cdot P_m \quad (3-3)$$

なお市場売買電力量 $Q_{re}(s, u, t)$ は、

$$\begin{cases} Q_{re}(s, u, t) = u(s, t) \cdot K_{eff} & (if, u(s) < 0) \\ Q_{re}(s, u, t) = u(s, t) / K_{eff} & (if, u(s) > 0) \end{cases} \quad (3-4)$$

また電力売買価格 $P_m(t)$ は、

$$P_m(t) = P(t) \quad (3-5)$$

ただし、 $P_m(t)$: t 時点における電力売買価格[yen/kWh]

$P(t)$: t 時点における電力市場価格[yen/kWh]

事故発生時

$$VC_{s,t} = Cshort_t \cdot \max(Xshort_t + u(s, t) \cdot K_{eff}, 0) \quad (3-6)$$

3.2 不確実変数と確率過程

ここでの電力小売事業者にとってのリスクは、自由化による電力市場価格の不確実性と停電による停電コストの発生（ペナルティー料金の発生）である。停電発生の不確実性に関しては、図 3-1 のような遷移確率に従った状態方程式を 2 本用いることによって模擬をするが、電力市場価格の不確実性については確率過程を用いて模擬する方法が多く用いられている。しかしながら、これらは 1 日のピーク価格や平均価格についてのものが多く、1 時間単位での電力市場価格を確率過程で模擬した研究は少ない。本節では、単位時間あたりの電力市場価格の変動の模擬方法について述べる。

3.2.1 電力市場価格の特徴

電力市場価格には 2 つの大きな特徴がある。まず、電力価格には原油価格等と同様に平均回帰傾向があるということである。これは、①電力需要に見合うように供給の調整が行われること、②電力価格の水準に応じて、需要側が工場の操業度を変えて需要量を変動させるからである。もうひとつの特徴としては価格変動が激しいことである。特に電力の場合、その貯蔵できないという性質上、価格が突然高騰する事例(Spike:スパイク)が目立つ。これは原油等の他の商品価格にはみられない特徴である。参考として、図 3-2 はアメリカ中西部におけるオンピーク時の電力価格を示したものであるが、平常時には 30 ドル程度で推移している電力価格が、時折大幅に上昇していることがわかる。¹³

また短期的な変動に目を向けるため、図 3-3 に 1999 年 8 月、平日の一日前市場価格の変動を示す。価格の安い夜間と高い昼間が交互に繰り返している。このように、市場価格は変動が激しいだけでなく、一日の中でも、昼間は価格が高く夜間は安いといったような一定のパターンに沿って変動していることがわかる。¹⁴

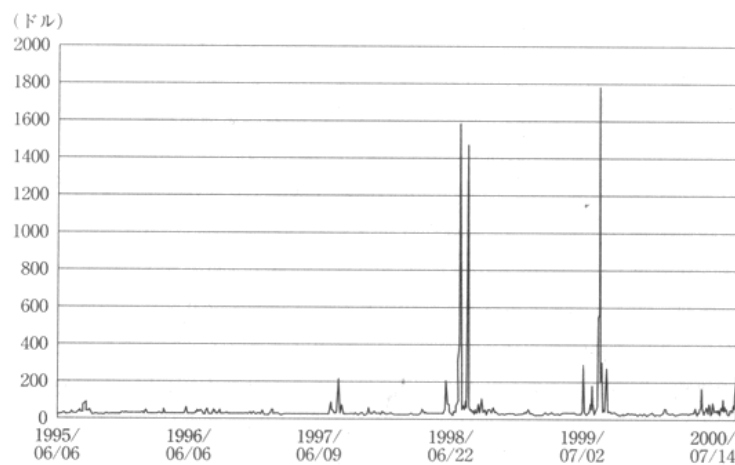


図 3-2 米国中西部オンピーク価格

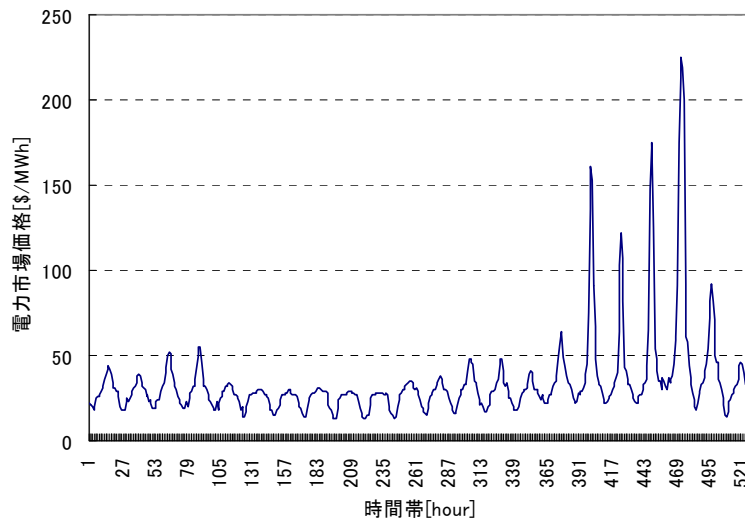


図 3-3 カリフォルニアにおける一日前電力市場価格(1999年8月平日)

3.2.2 電力市場価格変動モデル

前述されたような 1 日の中で一定のパターンを有しながら変動するといった特徴を捉えるために、本モデルでは電力市場価格変動について、価格そのものを確率変数として捉えるのではなく、それぞれの一日の平均変動パターンからの偏差を確率変数として模擬する。また確率過程については、長期的にはその平均値に回帰する傾向があるため、平均回帰モデルを使用する。また電力市場価格の特徴であるジャンプについては、[4]において平均回帰モデルのボラティリティを増加させることと同等の結果となったこと、またパラメータ推定の容易さ等から考慮しないものとしたが、今後の解析に当たって、ここで示した平均回帰モデルにジャンプ過程を加えればそれも可能である。

電力価格の確率過程は次のように表される。

$$dX(t) = a(t)(b(t) - X(t))dt + \sigma(t)dZ(t) \tag{3-7}$$

ただし、 $X(t) : \log(Pe(t))$

$Pe(t)$: 平均価格からの偏差 ($P(t) - AveP(t)$)

$AveP(t)$: 各時間帯の平均価格

$a(t)$: 回帰速度

$b(t)$: 均衡値(=0)

$\sigma(t)$: ボラティリティ

$dZ(t)$: ウィナー過程

※ なお $Pe(t)$ が負の値をとることを可能とするため、モデル中においては任意の定数 β を用いて $X(t)=\log(Pe(t)+\beta)$ と補正を加えて計算を行う。

実際の価格変動の様子

ここで、上記の模擬モデルを使用した際の1日の電力価格変動の様子を以下に示す。

図 3-4 は、 $\sigma=0$ 場合の市場価格の推移である。この場合、不確実性がないために、平均価格と全く同じ動きをしていることが分かる。

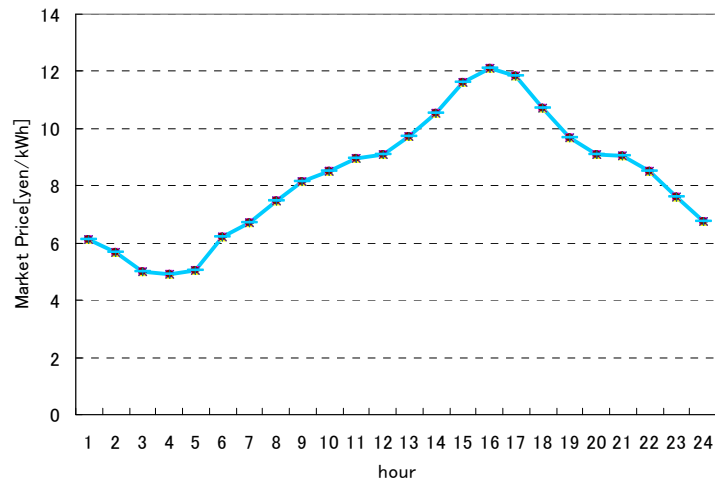
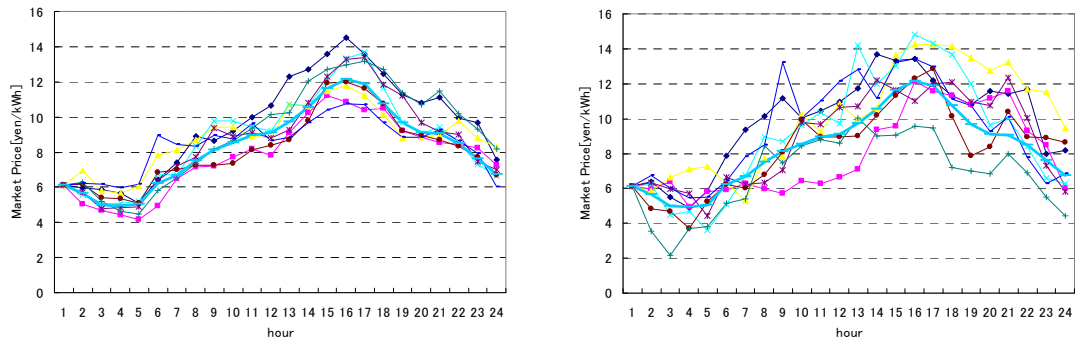


図 3-4 電力市場価格の推移($\sigma=0, a=1000$)

続いて、市場価格の不確実性の影響がどのようにグラフとして表現されるかについて、(a) $\sigma=5, a=1000$ の場合、(b) $\sigma=10, a=1000$ の場合の市場価格の推移を表したのが図 3-5 である。先程の図 3-4 に比べて、不確実性が生じたことにより、平均価格（太い水色線）を中心としたばらつきをみせている。ボラティリティが大きくなればばらつきも大きくなることも分かる。



(a) $\sigma=5, a=1000$

(b) $\sigma=10, a=1000$

図 3-5 不確実性が生じた際の電力市場価格の推移

最後に、回帰速度の影響について説明する。以下図 3-6 は、(a) $\sigma=5, a=100$ の場合、(b) $\sigma=5, a=2000$ の場合の市場価格の推移を示したものである。(a)の場合、回帰速度が小さいために電力市場価格が一度平均値から離れた値をとってしまうと、なかなか平均値にはもどらない。逆に(b)の場合、回帰速度が大きいため、電力市場価格は平均値から離れた値をとったとしても、すぐに平均値に近い値まで回帰している。

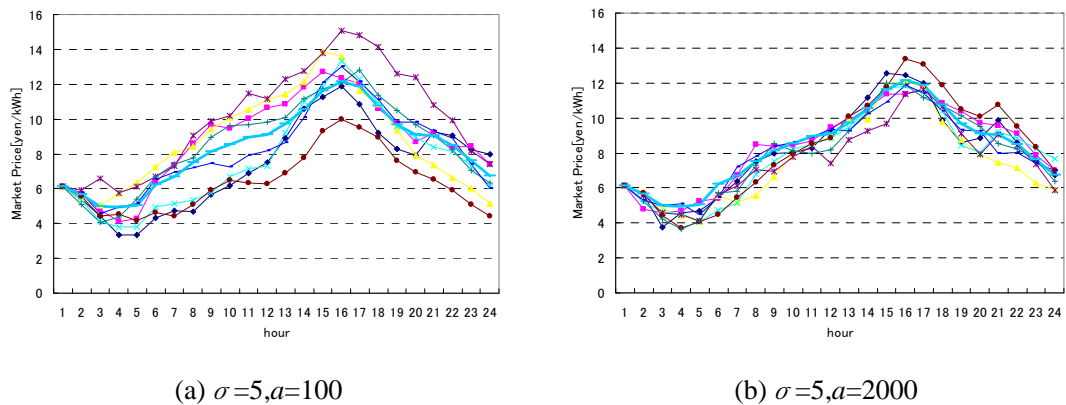


図 3-6 電力市場価格推移の回帰速度による影響

以上のように、ボラティリティと回帰速度の値を適宜変更することによって、実際の電力市場価格を模擬することとする。

3.3 確率動的計画法による総電力貯蔵コストの導出

本モデルでは確率動的計画法を用いて、解析期間中の電力貯蔵設備保持者の総電力貯蔵コストを導出する。ここで、総電力貯蔵コスト V_t とは、 t 時点から満期時点までに必要とする総コスト（利潤が生じる場合は負値となり、電力貯蔵設備の導入が経済的な意義を持つことになる）を示す。総電力貯蔵コスト導出に当たり、変数として時間・不確実変数に加え、状態（電力貯蔵量）変数を導入することで、電力貯蔵設備内の電力貯蔵量を考慮することを可能とした。さらに、正常状態と故障状態それぞれにおける総電力貯蔵コスト V_1 , V_0 を導出することで、停電コストを考慮した最適戦略の導出が可能となる。以下その方法を説明する。

総電力貯蔵コスト導出に当たり、変数として時間・不確実変数に加え、電力貯蔵運転特性を考慮するために、電力貯蔵量 $s[\text{kWh}]$ を導入する。 $\pi(\mathbf{X}, s, u, t)$ を t 時点において、電力貯蔵設備が起動している場合にかかる電力貯蔵コスト[yen]とする。 t 時点において、正常状態における電力貯蔵設備での総電力貯蔵コストを $V_1(\mathbf{X}, s, t)$ 、故障状態における総電力貯蔵コストを $V_0(\mathbf{X}, s, t)$ とすると、確率動的計画法を用いて以下のように定式化できる。

$$V_1(\mathbf{X}, s, t) = \min_u \{ \pi_1(\mathbf{X}, s, u, t) dt + e^{-dt/T_1} E[V_1(\mathbf{X} + d\mathbf{X}, s + ds, t + dt)] \\ + (1 - e^{-dt/T_1}) E[V_0(\mathbf{X} + d\mathbf{X}, s + ds, t + dt)] \} \quad (3-8)$$

$$V_0(\mathbf{X}, s, t) = \min_u \{ \pi_0(\mathbf{X}, s, u, t) dt + (1 - e^{-dt/T_0}) E[V_1(\mathbf{X} + d\mathbf{X}, s + ds, t + dt)] \\ + e^{-dt/T_0} E[V_0(\mathbf{X} + d\mathbf{X}, s + ds, t + dt)] \} \quad (3-9)$$

ただし、
 \mathbf{X} : 不確実性変数ベクトル
 T_1 : 平均事故発生間隔[hour]
 T_0 : 平均事故持続時間[hour]
 s : 電力貯蔵量[kWh]
 u : 電力貯蔵量の単位時間変化量[kW]
 $\pi_1(\mathbf{X}, s, u, t)$: 正常状態における t 時点において、電力貯蔵設備が $s[\text{kWh}]$ 貯蔵しており、 $u[\text{kW}]$ 充放電している場合にかかる電力貯蔵コスト[yen]
 $\pi_0(\mathbf{X}, s, u, t)$: 故障状態における t 時点において、電力貯蔵設備が $s[\text{kWh}]$ 貯蔵しており、 $u[\text{kW}]$ 充放電している場合にかかる電力貯蔵コスト[yen]（ペナルティー料金支払いによる停電コストも含む）

また、電力貯蔵量の変化に関しては単位時間当たりにおける電力貯蔵量の変化量を $u[\text{kW}]$ として以下のように定式化する。

$$ds(t) = udt \cdots (|u| \leq \alpha) \quad (3-10)$$

ただし、 α : 貯蔵設備の実効出力の上限

つづいて差分法を用いて不確実変数に対する式を解く方法について説明する。

偏微分方程式の導出

(3-8), (3-9)式を偏微分方程式と差分法を用いて、 t 時点における総電力貯蔵コスト $V(\mathbf{X}, s, t)$ と、 $t+dt$ 時点における総電力貯蔵コスト $V(\mathbf{X}+d\mathbf{X}, s+ds, t+dt)$ の関係式を導出。境界条件に基づいて、総電力貯蔵コストの方程式を得る。不確実性変数ベクトル \mathbf{X} は一般ウィナー過程によって記述することができる。

$$dX_i(t) = a_i(X_i(t), t)dt + b_i(X_i(t), t)dZ_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$V_{s, X, t} \equiv V_s(\mathbf{X}, t)$ とおき、伊藤公式より、

$$dV_{X, s, t} = V_{X+dX, s+ds, t+dt} - V_{X, s, t} = \left[\frac{\partial V_{X, s+ds, t}}{\partial t} + \sum_{i=1}^n a_i \frac{\partial V_{X, s+ds, t}}{\partial X_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} b_i b_j \frac{\partial^2 V_{X, s+ds, t}}{\partial X_i \partial X_j} \right] dt + \sum_{i=1}^n b_i \frac{\partial V_{X, s+ds, t}}{\partial X_i} dZ_i \quad (3-11)$$

ただし、 i と j の相関係数 $\rho_{ij} = E[dZ_i \cdot dZ_j]$ として与え、(3-8), (3-9)式に(3-11)式を導入し、 $T_1 \gg dt$ であることから $e^{-dt/T_1} \approx (1 - dt/T_1)$ と近似すると、

$$V_{1, X, s, t} = \min_u \left\{ \begin{aligned} & \left[\pi_{1, X, s, t} \cdot dt + (1 - dt/T_1) \left\{ V_{1, X, s+ds, t} + dt \left(\frac{\partial V_{1, X, s+ds, t}}{\partial t} + a \frac{\partial V_{1, X, s+ds, t}}{\partial X} + \frac{1}{2} b^2 \frac{\partial^2 V_{1, X, s+ds, t}}{\partial X^2} \right) \right\} \right] \\ & + dt/T_1 \left\{ V_{0, X, s+ds, t} + dt \left(\frac{\partial V_{0, X, s+ds, t}}{\partial t} + a \frac{\partial V_{0, X, s+ds, t}}{\partial X} + \frac{1}{2} b^2 \frac{\partial^2 V_{0, X, s+ds, t}}{\partial X^2} \right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3-12)$$

$$V_{0,X,s,t} = \min_u \left\{ \begin{array}{l} \pi_{0,X,s,t} \cdot dt \\ + (1 - e^{-dt/T_0}) \left\{ V_{1,X,s+ds,t} + dt \left(\frac{\partial V_{1,X,s+ds,t}}{\partial t} + a \frac{\partial V_{1,X,s+ds,t}}{\partial X} + \frac{1}{2} b^2 \frac{\partial^2 V_{1,X,s+ds,t}}{\partial X^2} \right) \right\} \\ + e^{-dt/T_0} \left\{ V_{0,X,s+ds,t} + dt \left(\frac{\partial V_{0,X,s+ds,t}}{\partial t} + a \frac{\partial V_{0,X,s+ds,t}}{\partial X} + \frac{1}{2} b^2 \frac{\partial^2 V_{0,X,s+ds,t}}{\partial X^2} \right) \right\} \end{array} \right\} \quad (3-13)$$

となる。

$dt \cdot dt = 0, E[dZ] = 0$ より, (3-12)式は

$$V_{1,X,s,t} = \min_u \left\{ \begin{array}{l} \pi_{1,X,s,t} \cdot dt + V_{1,X,s+ds,t} - (dt/T_1) \cdot V_{1,X,s+ds,t} \\ + dt \left(\frac{\partial V_{1,X,s+ds,t}}{\partial t} + a \frac{\partial V_{1,X,s+ds,t}}{\partial X} + \frac{1}{2} b^2 \frac{\partial^2 V_{1,X,s+ds,t}}{\partial X^2} \right) + (dt/T_1) \cdot V_{0,X,s+ds,t} \end{array} \right\} \quad (3-14)$$

と変形できる。(3-13)式は T_0 が dt に対して充分大きい訳ではないため, 近似できない

差分近似

差分法を用いるために以下のような離散化を行う。

表 3-1 偏微分方程式の離散化

	連続系	離散系
総電力貯蔵コスト	$V_{X,s,t}$	$V_{P,s,k}$
t に関する 1 階偏微分	$\partial V_{X,s,t} / \partial t$	$(V_{P,s,k+1} - V_{P,s,k}) / \Delta t$
x_i に対する 1 階偏微分	$\partial V_{X,s,t} / \partial x_i$	$\Delta V_{P,s,k} / \Delta x_i$
x_i と x_j に対する 2 階偏微分	$\partial^2 V_{X,s,t} / \partial x_i \partial x_j$	$\Delta^2 V_{P,s,k} / \Delta x_i \Delta x_j$

(P : 区切った変数ベクトル X に対する添え字ベクトル)

表 3-1 を用いて式(3-13), (3-14)を差分すると,

$$V_{1,P,s,k} = \min_u \left\{ \begin{aligned} & \pi_{1,P,s,k} \cdot \Delta t + (V_{1,P,s+u\Delta t,k+1} - V_{1,P,s+u\Delta t,k}) + V_{1,P,s+u\Delta t,k} - (\Delta t / T_1) \cdot V_{1,P,s+u\Delta t,k} \\ & + \Delta t a \frac{V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P} + \frac{1}{2} \Delta t b^2 \frac{\Delta^2 V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P^2} + (\Delta t / T_1) \cdot V_{0,P,s+u\Delta t,k} \end{aligned} \right\} \quad (3-15)$$

$$V_{0,P,s,k} = \min_u \left\{ \begin{aligned} & \pi_{0,P,s,k} \cdot \Delta t + (1 - e^{-\Delta t / T_0}) V_{1,P,s+u\Delta t,k} \\ & + (1 - e^{-\Delta t / T_0}) \left\{ (V_{1,P,s+u\Delta t,k+1} - V_{1,P,s+u\Delta t,k}) + \Delta t a \frac{V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P} + \frac{1}{2} \Delta t b^2 \frac{\Delta^2 V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P^2} \right\} \\ & + e^{-\Delta t / T_0} V_{0,P,s+u\Delta t,k} \\ & + e^{-\Delta t / T_0} \left\{ (V_{0,P,s+u\Delta t,k+1} - V_{0,P,s+u\Delta t,k}) + \Delta t a \frac{V_{0,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P} + \frac{1}{2} \Delta t b^2 \frac{\Delta^2 V_{0,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P^2} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3-16)$$

ここで左辺が最小値になるような u を求める必要がある。しかしながら、式(3-15)、(3-16)より式変形して求めることは難しいため、右辺の k を $k+1$ とし、式(3-17)、(3-18)のように変形して、陽解法を用いて左辺が最小になるような u をまず求める。

$$V_{1,P,s,k} = \min_u \left\{ \begin{aligned} & \pi_{1,P,s,k} \cdot \Delta t + (V_{1,P,s+u\Delta t,k+1} - V_{1,P,s+u\Delta t,k+1}) + V_{1,P,s+u\Delta t,k+1} - (\Delta t / T_1) \cdot V_{1,P,s+u\Delta t,k+1} \\ & + \Delta t a \frac{V_{1,P,s+u\Delta t,k+1}}{\Delta P} + \frac{1}{2} \Delta t b^2 \frac{\Delta^2 V_{1,P,s+u\Delta t,k+1}}{\Delta P^2} + (\Delta t / T_1) \cdot V_{0,P,s+u\Delta t,k} \end{aligned} \right\} \quad (3-17)$$

$$V_{0,P,s,k} = \min_u \left\{ \begin{aligned} & \pi_{0,P,s,k} \cdot \Delta t + (1 - e^{-\Delta t / T_0}) V_{1,P,s+u\Delta t,k+1} \\ & + (1 - e^{-\Delta t / T_0}) \left\{ (V_{1,P,s+u\Delta t,k+1} - V_{1,P,s+u\Delta t,k+1}) + \Delta t a \frac{V_{1,P,s+u\Delta t,k+1}}{\Delta P} + \frac{1}{2} \Delta t b^2 \frac{\Delta^2 V_{1,P,s+u\Delta t,k+1}}{\Delta P^2} \right\} \\ & + e^{-\Delta t / T_0} V_{0,P,s+u\Delta t,k+1} \\ & + e^{-\Delta t / T_0} \left\{ (V_{0,P,s+u\Delta t,k+1} - V_{0,P,s+u\Delta t,k+1}) + \Delta t a \frac{V_{0,P,s+u\Delta t,k+1}}{\Delta P} + \frac{1}{2} \Delta t b^2 \frac{\Delta^2 V_{0,P,s+u\Delta t,k+1}}{\Delta P^2} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3-18)$$

式(3-17)、(3-18)で求めた u 値を式(3-15)、(3-16)に代入すると以下の式(3-19)、(3-20)のようになる。

$$\begin{aligned}
V_{1,P,s,k} - V_{1,P,s+u\Delta t,k} + (dt/T_1) \cdot V_{1,P,s+u\Delta t,k} &= \pi_{1,P,s,k} \cdot \Delta t + (V_{1,P,s+u\Delta t,k+1} - V_{1,P,s+u\Delta t,k}) \\
&+ \Delta ta \frac{V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P} + \frac{1}{2} \Delta tb^2 \frac{\Delta^2 V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P^2} + (dt/T_1) V_{0,P,s+u\Delta t,k}
\end{aligned} \tag{3-19}$$

$$\begin{aligned}
V_{0,P,s,k} &= \pi_{0,P,s,k} \cdot \Delta t \\
&+ (1 - e^{-\Delta t/T_0}) \left\{ V_{1,P,s+u\Delta t,k+1} + \Delta ta \frac{V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P} + \frac{1}{2} \Delta tb^2 \frac{\Delta^2 V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P^2} \right\} \\
&+ e^{-\Delta t/T_0} \left\{ V_{0,P,s+u\Delta t,k+1} + \Delta ta \frac{V_{0,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P} + \frac{1}{2} \Delta tb^2 \frac{\Delta^2 V_{0,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P^2} \right\}
\end{aligned} \tag{3-20}$$

式(3-19), (3-20)を变形すると,

$$\begin{aligned}
&V_{1,P,s+u\Delta t,k+1} + \pi_{1,P,s,k} \cdot \Delta t \\
&= (\Delta t/T_1) \cdot V_{1,P,s+u\Delta t,k} + V_{1,P,s,k} - \Delta ta \frac{V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P} - \frac{1}{2} \Delta tb^2 \frac{\Delta^2 V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P^2} - (\Delta t/T_1) \cdot V_{0,P,s+u\Delta t,k}
\end{aligned} \tag{3-21}$$

$$\begin{aligned}
&(1 - e^{-\Delta t/T_0}) V_{1,P,s+u\Delta t,k+1} + e^{-\Delta t/T_0} \cdot V_{0,P,s+u\Delta t,k+1} + \pi_{0,P,s,k} \cdot \Delta t \\
&= V_{0,P,s,k} - e^{-\Delta t/T_0} \left(\Delta ta \frac{V_{0,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P} + \frac{1}{2} \Delta tb^2 \frac{\Delta^2 V_{0,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P^2} \right) \\
&- (1 - e^{-\Delta t/T_0}) \left(\Delta ta \frac{V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P} + \frac{1}{2} \Delta tb^2 \frac{\Delta^2 V_{1,P,s+u\Delta t,k}}{\Delta P^2} \right)
\end{aligned} \tag{3-22}$$

ここで, N_i を差分近似における i 番目の不確定変数の刻み数とし, \mathbf{S}_j を電力貯蔵量の j 番目の貯蔵量の刻み数とする。

式(3-21), (3-22)を $\mathbf{P}=[1,1,\dots,1] \sim \mathbf{P}=[N_1, N_2, \dots, N_n]$, $\mathbf{S}=[1] \sim [S_m]$ に並べることでベクトル表示をすると次のような連立方程式を得られる。

$$\mathbf{V}_{1,k+1} + \boldsymbol{\pi}_{1,k} = \mathbf{A}_{1,k} \cdot \mathbf{V}_{1,k} - (\Delta t/T_1) \cdot \mathbf{V}_{0,k} \tag{3-23}$$

$$(1 - e^{-\Delta t/T_0}) \mathbf{V}_{1,k+1} + e^{-\Delta t/T_0} \mathbf{V}_{0,k+1} + \boldsymbol{\pi}_{0,k} = \mathbf{A}_{0,k} \cdot \mathbf{V}_{0,k} - (1 - e^{-\Delta t/T_0}) \mathbf{A}'_{1,k} \cdot \mathbf{V}_{1,k} \tag{3-24}$$

係数行列 $\mathbf{A}_{\mathbf{P},\mathbf{P}}$, $\mathbf{A}'_{\mathbf{P},\mathbf{P}}$ の導出は, 付録参照。

例として, 変数の次元は一つ, 刻み数 $\mathbf{N}=[3], \mathbf{S}=[3]$ の場合については次のようになる。

$$\begin{bmatrix} V_{1,1,1,k+1} + \pi_{1,1,1,k+1} \cdot \Delta t \\ V_{1,1,2,k+1} + \pi_{1,1,2,k+1} \cdot \Delta t \\ V_{1,1,3,k+1} + \pi_{1,1,3,k+1} \cdot \Delta t \\ V_{1,2,1,k+1} + \pi_{1,2,1,k+1} \cdot \Delta t \\ V_{1,2,2,k+1} + \pi_{1,2,2,k+1} \cdot \Delta t \\ V_{1,2,3,k+1} + \pi_{1,2,3,k+1} \cdot \Delta t \\ V_{1,3,1,k+1} + \pi_{1,3,1,k+1} \cdot \Delta t \\ V_{1,3,2,k+1} + \pi_{1,3,2,k+1} \cdot \Delta t \\ V_{1,3,3,k+1} + \pi_{1,3,3,k+1} \cdot \Delta t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1,1,1,1} & A_{1,1,1,1,2} & A_{1,1,1,1,3} & A_{1,1,1,2,1} & \cdots \\ A_{1,1,2,1,1} & A_{1,1,2,1,2} & \cdots & & \\ A_{1,1,3,1,1} & \vdots & \ddots & & \\ A_{1,2,1,1,1} & & & & \\ \vdots & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ A_{1,3,3,1,1} & A_{1,3,3,1,2} & \cdots & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{1,1,1,3,3} \\ V_{1,1,1,k} \\ V_{1,1,2,k} \\ V_{1,1,3,k} \\ V_{1,2,1,k} \\ V_{1,2,2,k} \\ V_{1,2,3,k} \\ V_{1,3,1,k} \\ V_{1,3,2,k} \\ V_{1,3,3,k} \end{bmatrix} - (\Delta t / T_1) \begin{bmatrix} V_{0,1,1,k} \\ V_{0,1,2,k} \\ V_{0,1,3,k} \\ V_{0,2,1,k} \\ V_{0,2,2,k} \\ V_{0,2,3,k} \\ V_{0,3,1,k} \\ V_{0,3,2,k} \\ V_{0,3,3,k} \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

となる。従って、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1,k} & (-\Delta t / T_1) \cdot \mathbf{E} \\ (1 - e^{-\Delta t / T_0}) \mathbf{A}'_{1,k} & \mathbf{A}_{0,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{1,k} \\ \mathbf{V}_{0,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{1,k+1} + \boldsymbol{\pi}_{1,k} \\ (1 - e^{-\Delta t / T_0}) \mathbf{V}_{1,k+1} + e^{-\Delta t / T_0} \cdot \mathbf{V}_{0,k+1} + \boldsymbol{\pi}_{0,k} \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

となり、これを後進的アルゴリズムを用いて解くことで $\mathbf{V}_{1,k}$, $\mathbf{V}_{0,k}$ を導出することができる。(簡単のために \mathbf{P} は 1 次元、変数の刻み数は N としているが、多次元にすることも、もちろん可能である。また本研究においては不確実変数は 1 次であるが、2 次とすることももちろん可能である。)

計算のアルゴリズム

k 時点の総電力貯蔵コストベクトルと $k+1$ 時点の総電力貯蔵コストベクトルの関係式 (3-26) の解析に当たっては、満期時点の境界条件 $V_{l,P,s,T}=0, V_{0,P,s,T}=0$ を与え、後進的アルゴリズムを用いて、初期時点における総電力貯蔵コストを導出する。

- 1) 満期時点 ($t=T$) の境界条件として、 $V_{l,P,s,T}=0, V_{0,P,s,T}$ とする。
- 2) $k=T-1$ とし、それぞれの電力貯蔵コスト $\pi_{l,P,s,T-1}$, $\pi_{0,P,s,T-1}$ を導出し、 A_l , A'_l , A_0 の計算を行うことから $V_{l,P,s,T-1}, V_{0,P,s,T-1}$ を求める。
- 3) $k=k-1$ とし、 $k=0$ となるまで、2) を繰り返し、初期時点の値・状態に基づき総電力貯蔵コストを導出する。

第4章 最適電力貯蔵戦略の導出

本章では前述したモデルを用いて、電力貯蔵設備保持者の総電力貯蔵コストを求め、総電力貯蔵コストを最小とするような最適電力貯蔵戦略を導出し、対象期間を1日ではなく、日を跨いだ連続運転できるようにアルゴリズムを変更させた場合の結果を示す。

4.1 前提条件

以下図 4-1 のモデルにおいて、シミュレーションに際してのパラメータは以下の通り。対象期間は0時から24時までの24時間である。また、充放電効率とは、貯蔵・放電それぞれに対する効率のことであり、貯蔵・放電の一連のサイクルに対する効率はこれを二乗することで求められる。

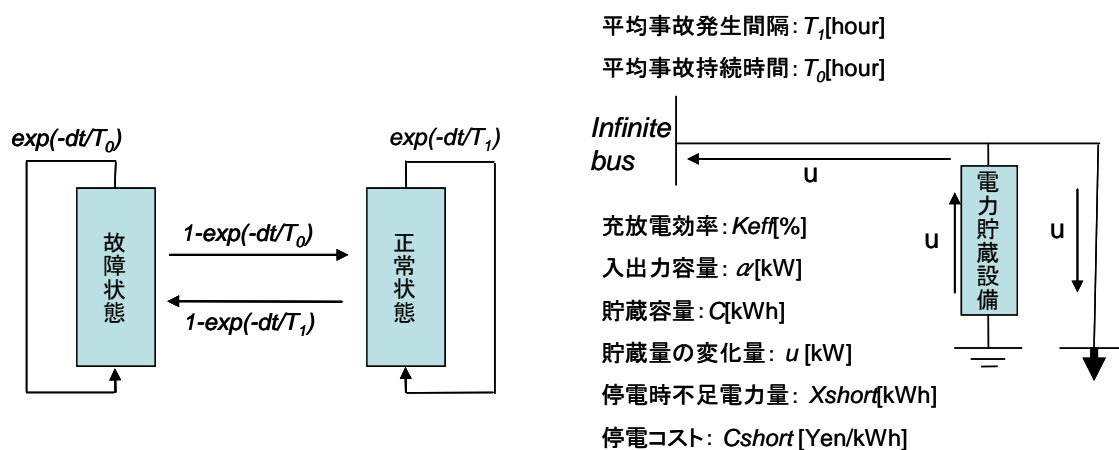


図 4-1 モデル概要

表 4-1 パラメータ設定

充放電効率: K_{eff}	85[%]
貯蔵容量:	4[kWh]
入出力容量: α	3[kW]
停電コスト: C_{short}	500[yen/kWh]
平均事故発生間隔: T_1	500[hour]
平均事故持続時間: T_0	0.5[hour]
停電時不足電力量: X_{short}	5[kW]
自己放電率	0.7[%/hour]
電力価格均衡値	0
電力価格回帰速度: a	1000
電力価格ボラティリティ: σ	10
初期価格偏差	0

4.2 解析期間 1 日の場合の最適電力貯蔵戦略

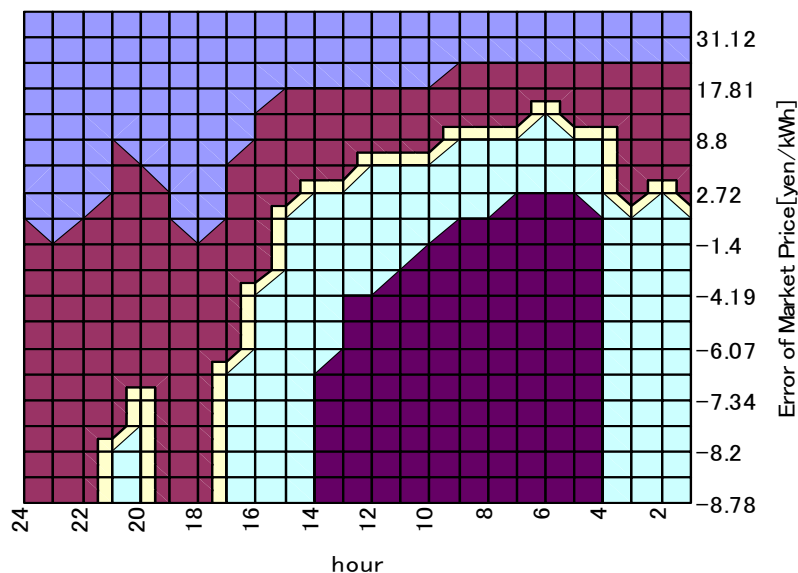
解析期間を 1 日とし、電力市場価格が平均値で推移した場合の貯蔵設備の最適運用戦略を示したものが図 4-2 である。停電コスト対策としてとりあえず電力を買うことから始め、その後は市場売買による利益を目的に電力価格が安い時間帯に電力を買い、高い時間帯に電力を売るという行動をとっており、これは感覚的にも正しいといえる。常に 3kWh の電力を貯蔵しているのは停電が生じた際に需要家への供給を可能とするためである。また、単位時間あたりの入出力容量 a が 3kW であるから、たとえ停電時の不足電力量が 5kWh であっても、それ以上の貯蔵は無意味であるためことも示している。今回は解析期間を 1 日としているため、1 日で電力を売りつくすのが最適となる。



図 4-2 最適電力貯蔵戦略

図 4-2 は電力市場価格が平均値で推移した場合の結果であるが、実際には電力市場価格は時々刻々と変動する。その変動に対して、各時間毎に、電力市場価格の平均値からの偏差毎に電力貯蔵設備の最適運用戦略を等高線図で表したのが以下図 4-3 の最適電力貯蔵動作表である。図 4-3 は電力貯蔵量が 1kWh の際の結果である。先ほどの図でも示したように、基本的には停電コスト対策として 3kWh の電力を貯蔵しておきたいため、放電が最適戦略となる場合は少ないことがわかる。夕方以降の電力価格の高い、もしくはこれからさらに安くなる見込みのある時間帯は現状維持、深夜から昼間にかけての電力価格の安い、も

しくはこれからさらに高くなる見込みの時間帯は充電が基本戦略となる。ただし、平均値よりも電力価格が高くなった場合には、放電することで売却益を得るのが最適戦略である。また 20 時付近に充電動作があるのは、21 時の電力価格が 20 時のものよりもわずかに高いことが原因である。



青：1kWh 放電 赤：現状維持 黄 1kWh 充電 緑：2kWh 充電 紫：3kWh 充電

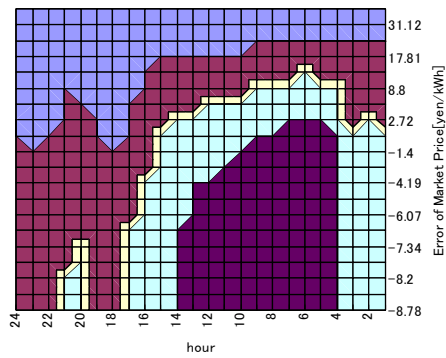
図 4-3 最適電力貯蔵戦略

4.3 連続運転を考慮した最適運用戦略

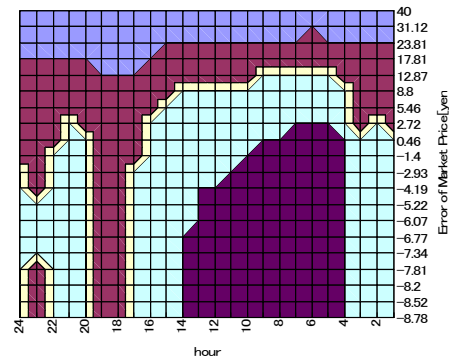
前節では解析期間を 1 日であるので、満期時点の境界条件 $V_{P,s,T}=0$ を与え、後進的アルゴリズムを用いて初期時点における総電力貯蔵コストを導出しているが、境界条件に変更を加え、

$$V_{M,s,24}=0 \rightarrow V_{M,s,24} \neq 0, \quad V_{M,s,24} = V_{M,s,0}$$

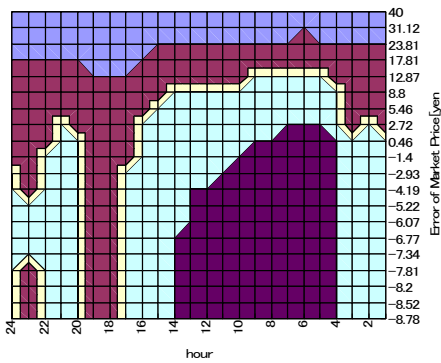
とアルゴリズムの変更を加える。これにより日を跨いだ連続運転を考慮できることとなり、日を跨ぐことによって最適貯蔵戦略がある一定値に収束していく様子を見ることが出来る。以下図 4-4 が、連続運転させた場合の最適電力貯蔵動作表を示したものである（貯蔵量は 1kWh）。2 日目と 10 日目の動作表は同一であり、解析期間を 3 日程度に設定すれば日を跨いだ連続運転を模擬できることとなる。また、1 日目と 2 日目の結果を比べると 2 日目の方がより充電戦略の割合が多くなっており、連続運転させた場合の方が停電コストへの対策をより重視していることがわかる。



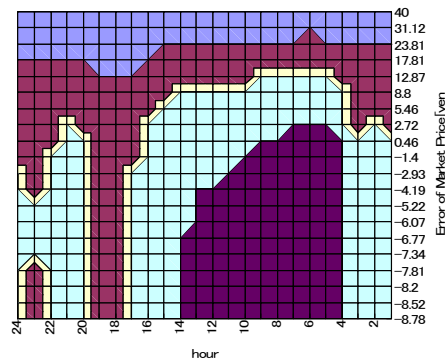
1 日目



2 日目



3 日目



10 日目

青：1kWh 放電 赤：現状維持 黄 1kWh 充電 緑：2kWh 充電 紫：3kWh 充電

図 4-4 連続運転した場合の最適電力貯蔵動作表の変化

また、以下図 4-5 は 3 日間連続運転させ、電力市場価格が平均値で推移した場合の最適電力貯蔵戦略を示したものである。図 4-2 と同様、停電コスト対策として 3kWh の電力を貯蔵しつつ、残った 1kWh の容量で市場との売買を行い、利益を得ていることがわかる。解析期間が 3 日間であるので、3 日目の最後には電力を全て売りつくすのが最適戦略である。図 4-4 の電力貯蔵表から、連続運転することで戦略が変更されるのは主に電力価格が平均値よりも高い値で推移した場合であるので、電力価格が平均値を推移した際には、前日に対する戦略の変更はないこともわかる。

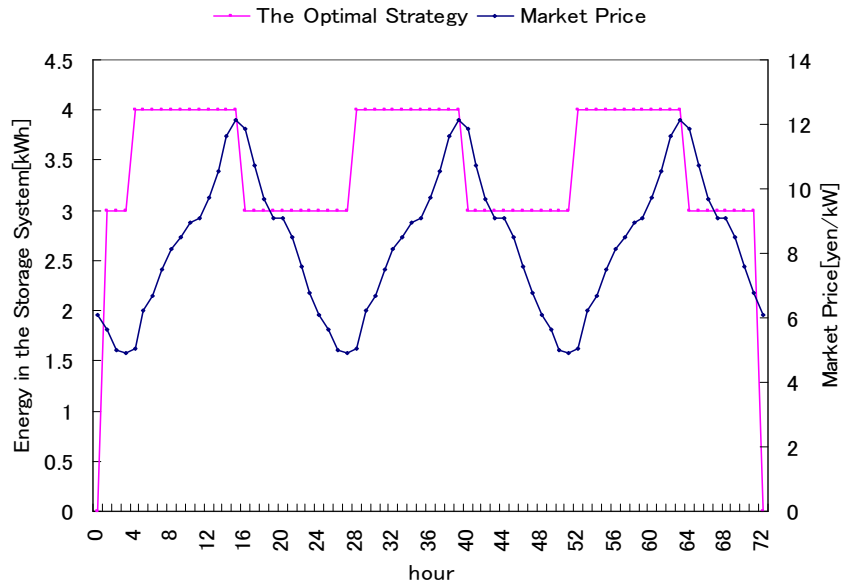
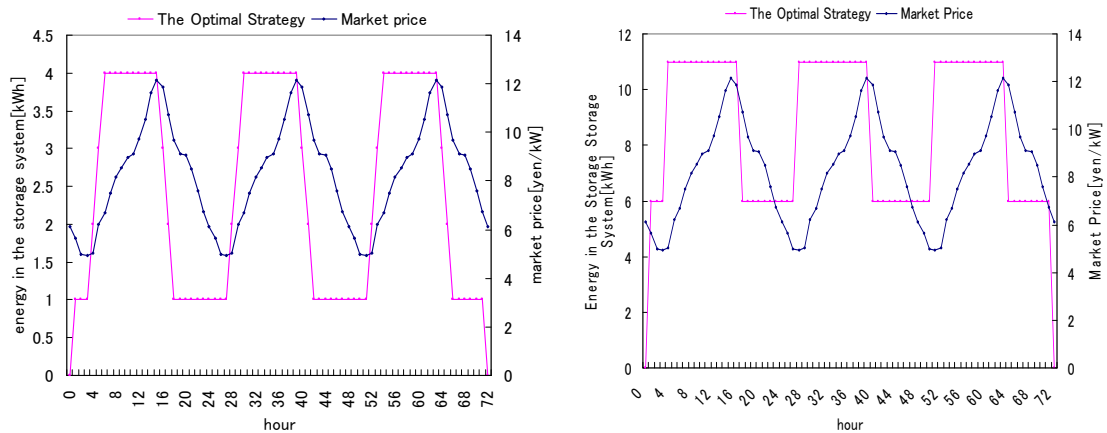


図 4-5 連続運転した場合の最適電力貯蔵戦略

参考として、図 4-6 は(a)入出力容量 α を 1kW とした場合、(b)貯蔵容量を 11kWh, 入出力容量 α を 11kW とした場合の最適電力貯蔵戦略を示したものである。(a)の場合、停電が生じても単位時間あたりに放電できるのは 1kW であるから、常時貯蔵しておく電力も 2kWh 以上は無意味となる。従って残りの 3kWh 分は市場売買を行うことによって利益を得ることが最適戦略となるのである。(b)の場合、6kWh の電力を停電コスト対策として貯蔵していることになるが、これは充放電効率 K_{eff} が 85% であるので、6kWh の貯蔵をしておらねば、停電時に不足電力量である 5kWh を供給できないためである。残りの 5kWh の容量を市場売買用の電力として扱っていることになる。



(a) $\alpha=1\text{kW}$ の場合

(b) 貯蔵容量 11kWh, $\alpha=11\text{kW}$ の場合

図 4-6 他ケースにおける最適電力貯蔵戦略

4.4 まとめ

本章では 3 章で説明したモデルを用いて導出した最適電力貯蔵戦略を示した。停電コスト対策として一定の電力を貯蔵しつづけながらも、入出力容量を超える貯蔵容量分に関しては、電力価格の安い時間帯に買い、高い時間帯に売るという売買差益を得ることを目的とした使い方をしており、感覚的にも理解できる結果が得られた。

また日を跨いだ連続運転をできるようにアルゴリズムを変更した場合、2 日目以降の電力貯蔵動作表に変化が見られた。1 日目に比べて、2 日目以降はより停電コスト対策に重点をおいた戦略へと変更されており、表 4-1 のパラメータにおいては、電力貯蔵設備は主として停電コストに対する非常電源用として用いることが最適であることが示された。

第5章 電力貯蔵設備の費用便益評価

本章では 4 章で導出した最適電力貯蔵戦略を実行した場合の、電力貯蔵設備導入による費用便益分析を行う。まず電力貯蔵設備導入による経済的価値の定義を行い、表 4-1 のパラメータを任意の値に変更することによって貯蔵設備の経済的価値（固定費は考慮しない）がどのように変化するか之感度解析を行う。また固定費を考慮することによって電力貯蔵設備導入の費用便益分析を行い、最後にモンテカルロシミュレーションによる結果との比較をすることで、結果の妥当性を確認する。

5.1 電力貯蔵設備の導入価値の定義

次節以降では表 4-1 の各パラメータに対する電力貯蔵設備の経済的価値の感度分析・費用便益分析を行っていく。ここでの電力貯蔵設備の経済的価値とは、仮に電力貯蔵設備を導入しなかった場合の停電コストを考慮した対象期間分の損益の期待値と、導入した場合の対象期間中の損益である総電力貯蔵コストとの差と定義する。表のパラメータで 5 日間連続運転させた場合の電力貯蔵設備の経済的価値の推移を図 5-1 に示す。尚、経済的価値に固定費は考慮されていない。

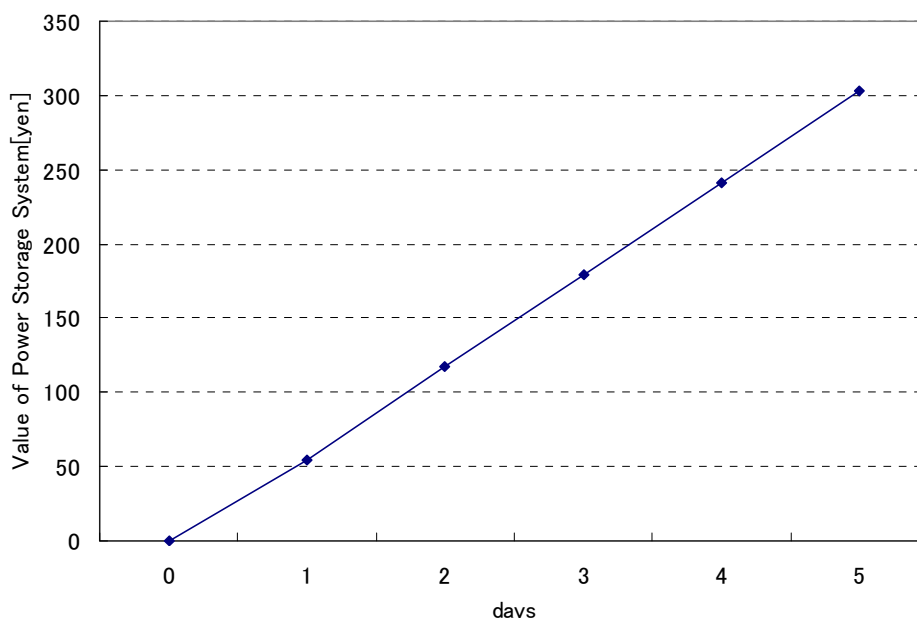


図 5-1 連続運転の際の電力貯蔵設備の経済的価値の推移

上図のとおり、解が収束する気配がない。これは

$$V_{M,s,24} \neq 0, \quad V_{M,s,24} = V_{M,s,0}$$

というアルゴリズムでは経済的価値が日々累計されていくからである。1 日分の経済的価値

を求めたいのであれば、その導出の際に用いる 1 日分の総電力貯蔵コストは、連続運転した場合の一定日数が経過した後の収束したものを用いなければならない。従って、まずは 1 日分の総電力貯蔵コストが定常状態に落ち着くために必要な連続運転の日数を導出しておく必要がある。以下図は 5 日間連続運転した場合の経済的価値の累計地ではなく、それぞれの 1 日分の経済的価値を導出したものである。表 4-1 のパラメータであれば 2 日目以降では収束していることが分かり、これは図 4-5 の最適電力貯蔵動作表の結果とも一致する。

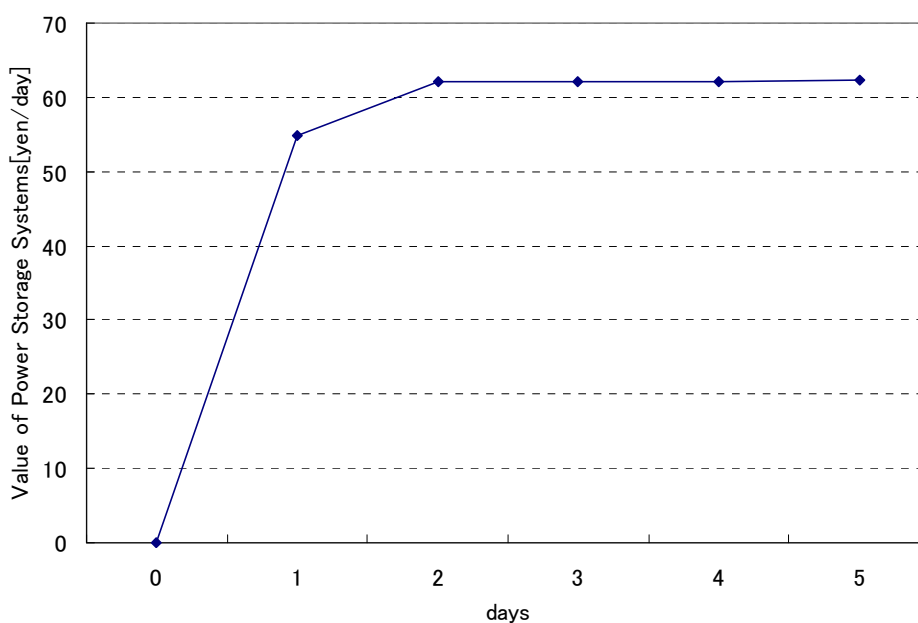


図 5-2 連続運転の際の電力貯蔵設備の経済的価値の推移 (1 日分)

以後全てのケースにおいて、電力貯蔵設備の経済的価値の導出には、1 日分の総電力貯蔵コストの内、連続運転させて解が定常状態落ち着いた日の値を用いることを前提とするが、これを式で表すと以下ようになる。

$$Value_T = ExpectationLoss - \frac{\partial V}{\partial T} \tag{5-1}$$

ただし、*ExpectationLoss* : 貯蔵設備を導入しなかった場合の 1 日の損益期待値
 $T=1[\text{day}]$

5.2 電力貯蔵設備の経済的価値の感度分析

本節では5.1節で定義した経済的価値について、表の各パラメータを変化させて経済的価値の感度分析を行う。

5.2.1 貯蔵容量の影響

まずは表 4-1 のパラメータにおいて貯蔵容量を任意の値に変更し、電力貯蔵設備の経済的価値の感度分析を行った結果を図 5-3 に示す。尚、入出力容量 α は貯蔵容量に対して100%に設定しており、つまり単位時間で全貯蔵量の放電、充電が可能である。

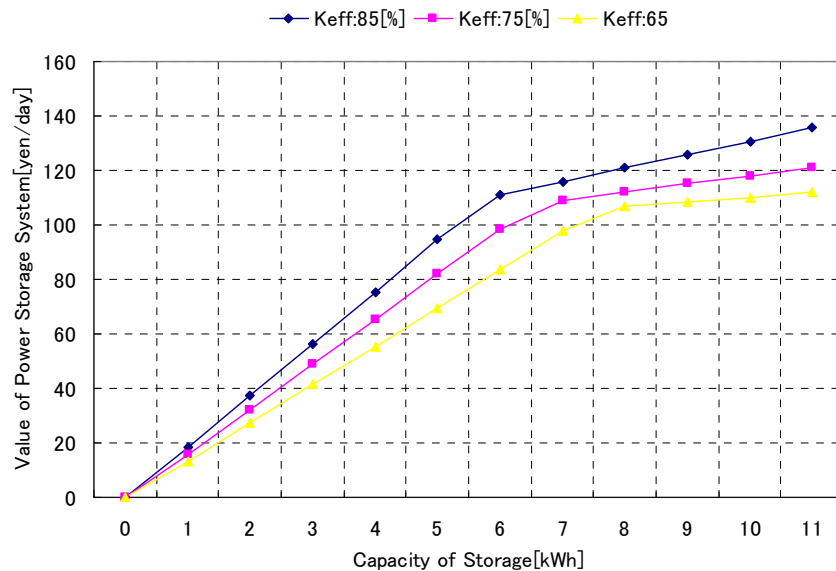
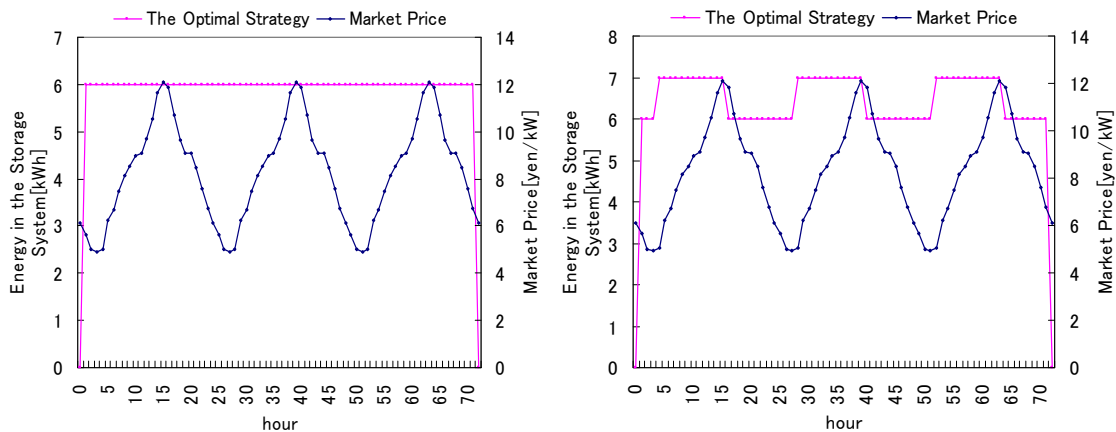


図 5-3 貯蔵容量と電力貯蔵設備の経済的価値

前章 4 の図 4-6(b)において、入出力容量が 100%、充放電効率 K_{eff} が 85% の場合、停電コスト対策として保持しておきたい電力は基本的に 6kWh であった(もちろん電力価格が高騰した場合は、たとえ貯蔵量が 6kWh に満たない場合であっても放電するのが最適戦略である)。従って、図 5-3 における貯蔵容量 6kWh までの価値の上昇は停電コスト軽減による価値の上昇であり、それ以降は電力の市場売買益による価値の向上であると予想される。

上記のことを確認するために図 5-4 を示す。図 5-4 は貯蔵容量が 6kWh と 7kWh の際の最適電力貯蔵戦略を示したものであるが、電力市場価格が平均値で推移した場合、貯蔵容量が 6kWh であれば停電コスト対策として貯蔵容量の全てを 3 日間貯蔵し続けており、市場売買益を目的とした売買は全く行っていないことがわかる。つまり、図 5-3 における電力貯蔵設備の経済的価値は、貯蔵容量 6kWh までは停電コストに対する価値と一致する。それに対し貯蔵容量 7kWh 以降は停電コスト対策に電力を貯蔵し続けつつ、残った容量で市場売

買益を目的とした売買も行っている。従って図 5-3 において貯蔵容量 7kWh 以降は停電コスト軽減による価値と市場売買益による価値の和が、電力貯蔵設備の経済的価値であるといえる。



(a)貯蔵容量 6kWh

(b)貯蔵容量 7kWh

図 5-4 最適電力貯蔵戦略

また、図 5-3 において市場売買益による価値が加わってくる貯蔵容量の値が充放電効率 K_{eff} の値によって異なる。これは、停電時不足電力量 X_{short} が 5kWh であるので、充放電効率が小さくなった場合、それだけ充電量を大きくしておかないと、停電時不足電力量をカバーできなくなるということに起因している。

5.2.2 停電コストの影響

続いて、表 4-1 のパラメータにおいて停電コストを任意の値に変更することによって、電力貯蔵設備の経済的価値の感度分析を行った結果が図 5-5 である。

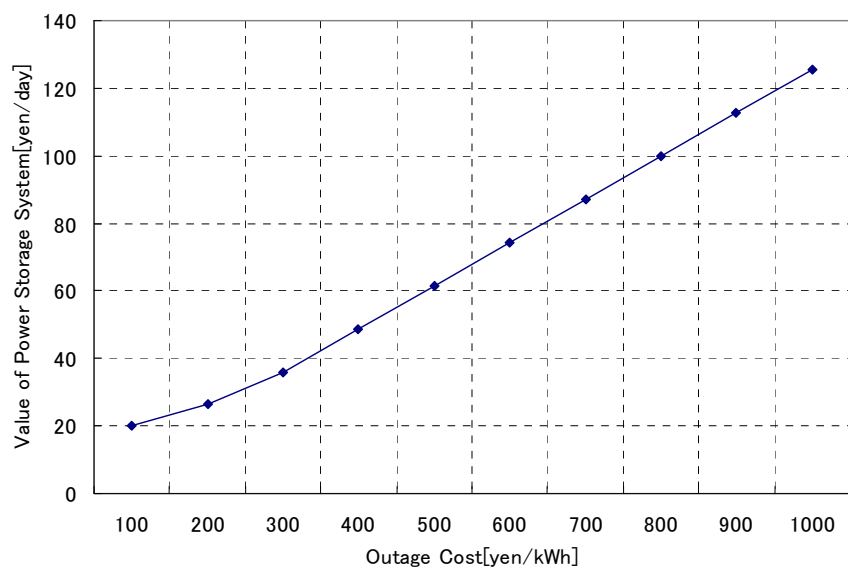
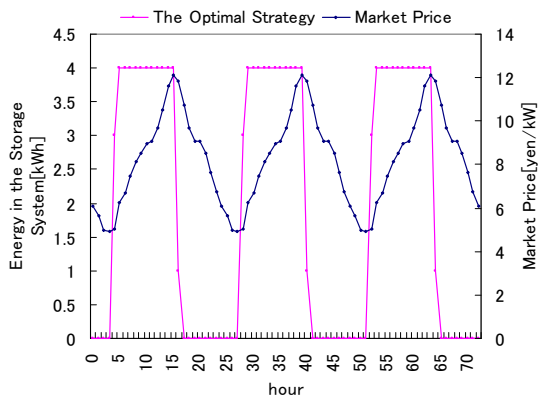


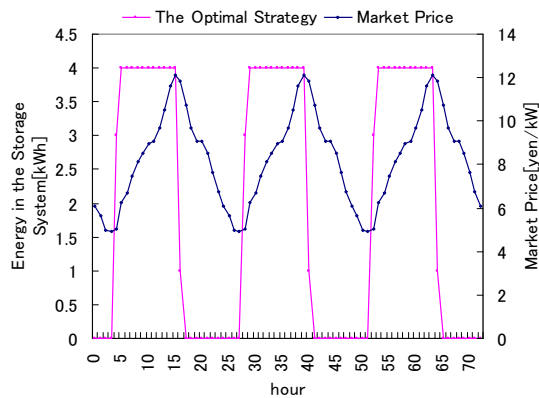
図 5-5 停電コストと電力貯蔵設備の経済的価値

停電コストが上昇すれば電力貯蔵設備の経済的価値が上昇するという傾向を示しているが、停電コストが 300yen/kWh を超える範囲であれば、電力貯蔵設備の経済的価値は停電コストにほぼ比例する形で影響を受けていることがわかる。

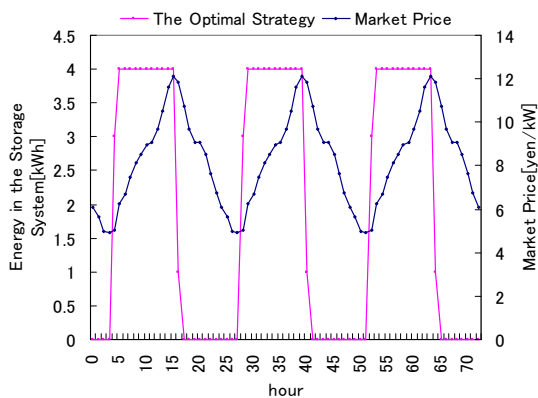
停電コストが 100yen/kWh から 300yen/kWh にかけて傾きが比較的小さくなっている原因を考える。以下図 5-6 は最適電力貯蔵戦略を示したもので、停電コストの値は(a)100yen/kWh, (b)200yen/kWh, (c)300yen/kWh, (d)400yen/kWh となっている。



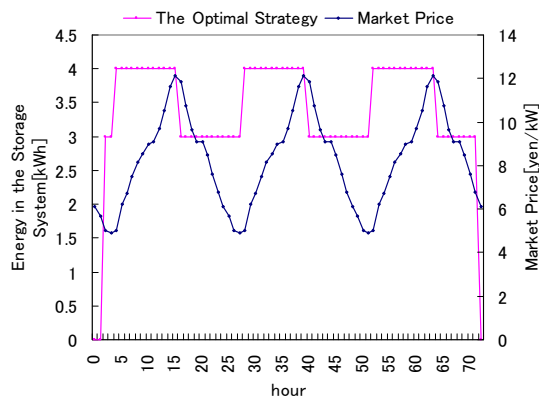
(a) 停電コスト 100yen/kWh



(b) 停電コスト 200yen/kWh



(c) 停電コスト 300yen/kWh



(d) 停電コスト 400yen/kWh

図 5-6 最適電力貯蔵戦略

(a)から(c)までは、停電コストの値が小さいために、貯蔵戦略は売買差益が最大化することを目的としたものとなっており、これは停電コストを考慮したものにはなっていない。しかしながら停電コストの値が 400yen/kWh になると、停電コストの値が大きいため停電コスト対策が最優先となり、売買差益目的の戦略ではなくなっていることがわかる。このように貯蔵戦略に変化が起こるために、図 5-5 において停電コストが 300yen/kWh 以上になると傾きが変わるのである。

5.2.3 充放電効率の影響

表 4-1 のパラメータにおいて、充放電効率の値をそれぞれ変化させた場合の電力貯蔵設備の経済的価値を以下図 5-7 に示す。参考として貯蔵容量が 8kWh, 10kWh の場合の結果も示すが、貯蔵容量が 8kWh の場合は入出力容量 6kW, 貯蔵容量が 10kWh の場合は入出力容量 8kW と設定している。

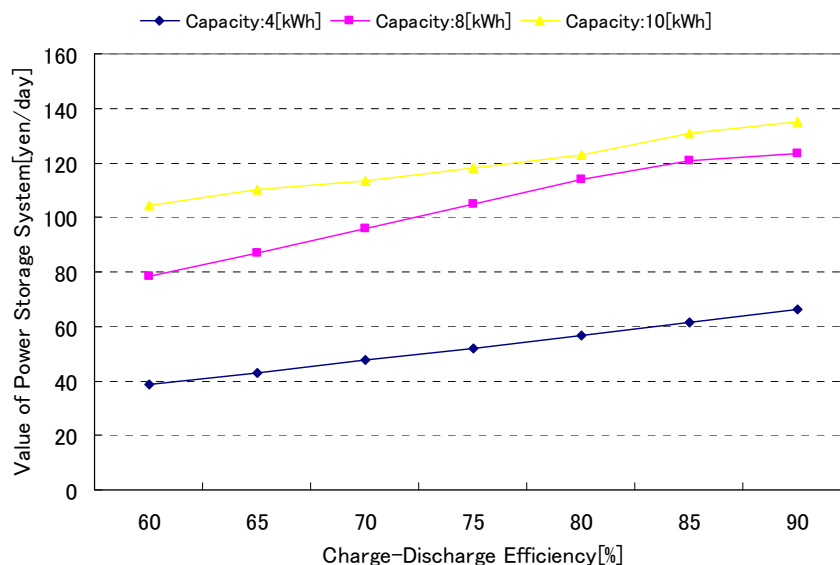


図 5-7 充放電効率と電力貯蔵設備の経済的価値

停電コストに比べて、充放電効率が貯蔵設備の経済的価値に与える影響はそれ程大きくないことがわかる。

貯蔵容量 8kWh の際、充放電効率が 85%から 90%の区間での傾きが小さくなっている理由として、停電コストの軽減の度合いが関係してくる。停電時の不足電力は 5kWh であるから、入出力容量が 6kW である場合、充放電効率が約 83.3%以上あれば停電発生時に単位時間あたりで不足電力量の全てを放電できることになる。従って、83.3%までは充放電効率が大きくなれば、市場売買の際のロスの軽減に加えて、停電コストの軽減に寄与することになるが、それ以上の増大は停電コストの軽減に寄与することはなくなり、単純に市場売買によるロスの軽減分しか経済的価値が向上しないのである。この考えに従うと、80%から 85%区間での傾きも、60%から 80%区間の傾きよりも小さくなるべきであり、グラフをよく見るとそのようなになっていることがわかる。

貯蔵容量 10kWh の際は、他の 2つのケースに比べて経済的価値上昇の傾きが小さくなるのも先ほどと同じ理由である。入出力容量が 8kW であれば、充放電効率 62.5%以上あれば、停電発生時に単位時間あたりで不足電力量の全てを放電できることになる。従って、62.5%までは充放電効率が大きくなれば、停電コストの軽減と市場売買の際のロスの軽減の両方

に寄与するが、それ以降は市場売買のロスの軽減分しか経済的価値の上昇がなくなってしまふのである。

貯蔵設備の経済的価値の内訳

電力貯蔵設備の経済的価値は、停電コスト軽減による価値、電力の昼夜間価格差を利用した市場売買差益による価値、電力市場価格のボラティリティに対する価値の3つの価値の合計値であると考えられる。それらの内訳を調べるために、以下図 5-8 では貯蔵容量 8kWh、入出力容量 6kW の場合に、充放電効率 75%から 90%それぞれにおける3つの経済的価値の内訳を示した。

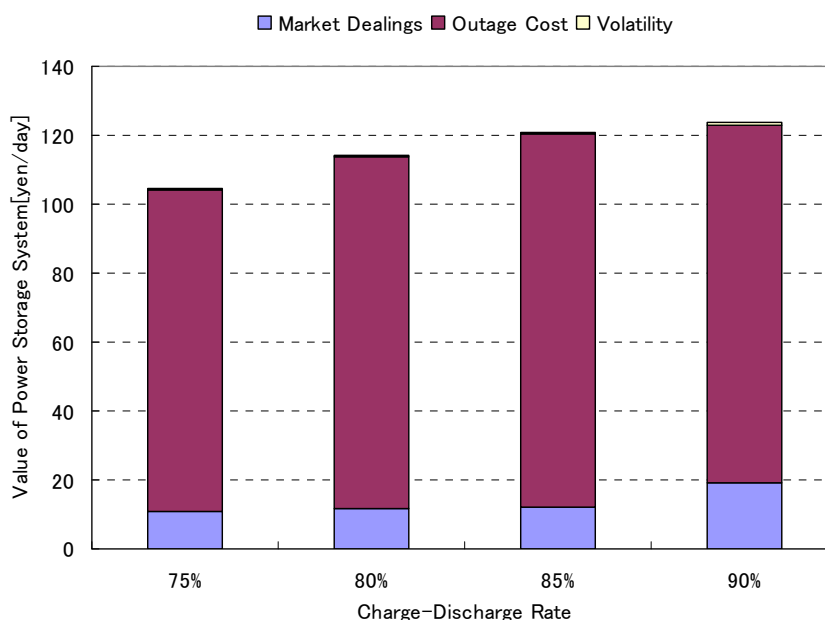


図 5-8 電力貯蔵設備の経済的価値の内訳

先ほど述べたが、83.3%までの充放電効率の増大は市場売買の際のロスの軽減だけでなく、停電コスト軽減にも加わることになるが、それ以上の増大は停電コストの軽減に寄与することはなくなり、市場売買でのロスの軽減にのみ寄与していることがわかる。

85%から90%にかけて停電コストによる利益が減少しているのは、充放電効率の増加により市場売買でのロスが小さくなったため、停電コスト対策として貯蔵しておく電力を 5kWh (放電時は 4.5kWh) に抑え、残りの 3kWh の貯蔵容量を市場売買用として用いたためである。つまり、これまでは停電コスト対策を最優先してきていたが、充放電効率が 90%になると、常時 6kWh (放電時は 5.4kWh) の電力を貯蔵しておいて停電発生時に 0.4kWh の余剰電力を生じさせるよりは、停電発生時に 0.5kWh 分のペナルティー料金を支払ってでも市場売買用の容量を確保しておいた方が効率がよいということがわかる。なお、今回は市場価

格変動のボラティリティに対する価値はほとんど存在していないが、これに関しては後述する。

参考として、充放電効率 90%での最適電力貯蔵戦略を以下図 5-9 に示すが、停電コスト対策としての貯蔵分は 5kWh に抑え、残りの貯蔵容量で市場売買を行うことで市場売買差益をより多く得ようとしていることがわかる。

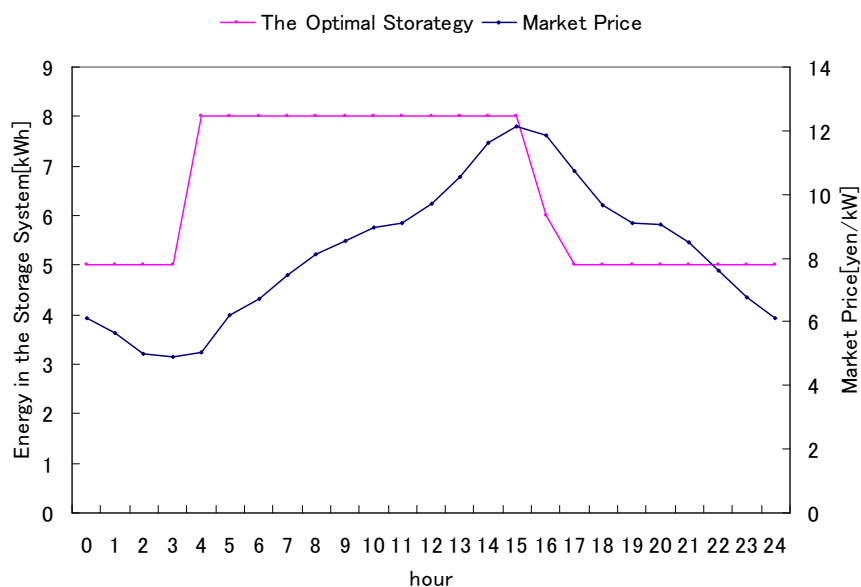


図 5-9 最適電力貯蔵戦略(充放電効率 90%)

5.2.4 平均事故発生間隔の影響

平均事故発生間隔と電力貯蔵設備の経済的価値の関係を示したのが図 5-10 である。電力貯蔵設備の経済的価値は、平均事故発生間隔にほぼ反比例する形で影響を受けていることがわかる。

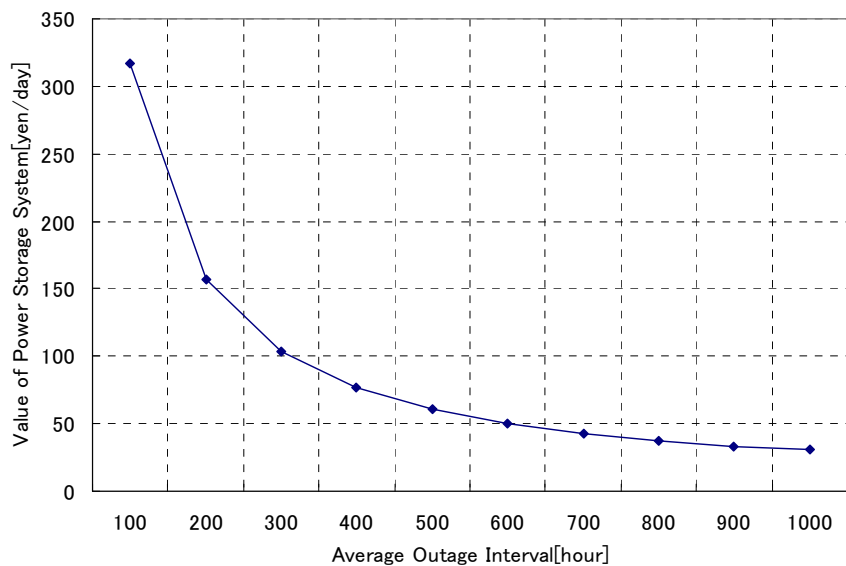


図 5-10 平均事故発生間隔と停電コスト

参考として、図 5-11 に(a) $T_I=100$ hour, (b) $T_I=1000$ 示す。初日の電力購入のタイミングに多少の差はあるものの、基本的に $T_I=1000$ までは T の値に関係なく、停電コスト対策を優先した戦略をとっていることがわかる。

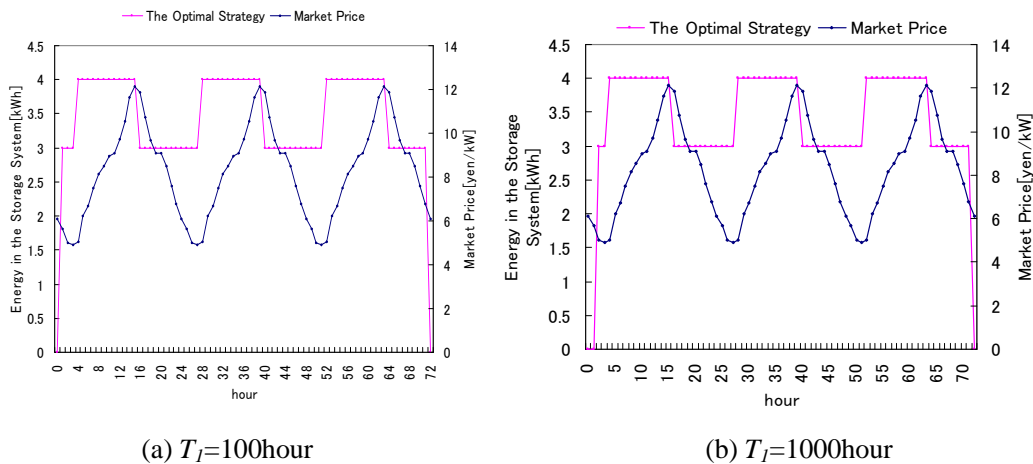


図 5-11 最適電力貯蔵戦略

5.2.5 平均事故持続時間の影響

図 5-12 には平均事故持続時間と電力貯蔵設備の関係を示した。電力貯蔵設備の経済的価値は、平均事故持続時間が長くなるにつれて増加する傾向にあるが、過度に大きくなると貯蔵容量が足りなくなるため、その経済的価値は飽和する。さらに平均事故持続時間が長くなると、市場売買による利益を得る時間も短縮されてしまうため、価値は低下していく傾向が見られた。

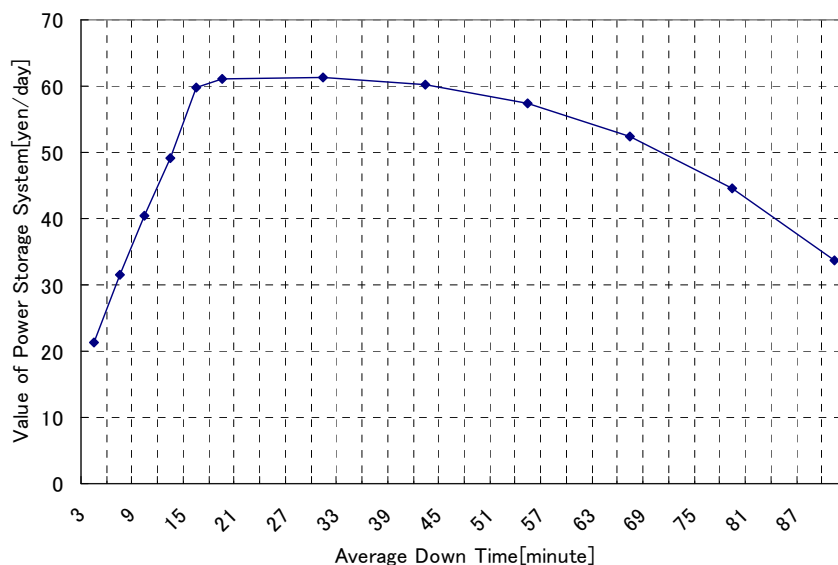


図 5-12 平均事故持続時間と電力貯蔵設備の経済的価値

平均事故持続時間が 90 分の際の最適電力貯蔵戦略を以下図 5-13 に示す。停電発生時に予想される損失がとても大きいため、市場売買は全く行わずに常に停電に備えていることがわかる。

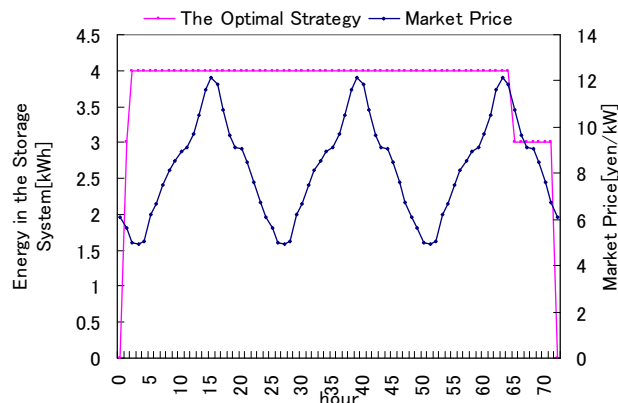


図 5-13 最適電力貯蔵戦略($T_0=1.5$ hour)

5.2.6 ボラティリティの影響

電力市場価格変動のボラティリティが電力貯蔵設備の経済的価値に与える影響を示したのが以下図 5-14 である。ボラティリティが 10 程度の値をとるまでは、ボラティリティの上昇による貯蔵設備の経済的価値の上昇はほとんど見られない。10 を超えるあたりから、急激に価値が上昇していくことがわかる。

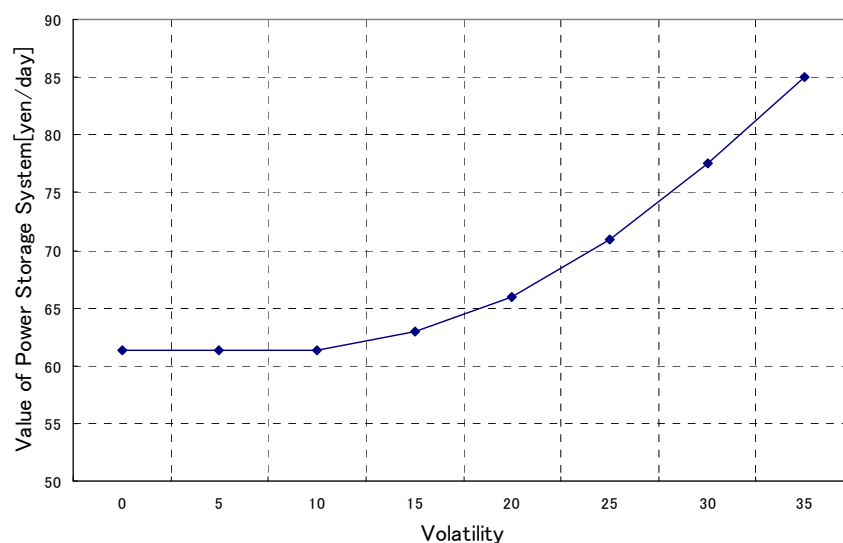


図 5-14 ボラティリティと電力貯蔵設備の経済的価値

この原因を、図 4-2 の電力貯蔵動作表を用いて説明する。基本的に停電コストによる損失の期待値が大きいため、電力市場価格の変動幅がかなり大きくならない限り、大きな戦略の変更は起こさないことがわかる。従って回帰速度の値が 1000 の場合、ボラティリティの値が 15 を超えてくる程の変動幅がない限り、ボラティリティによる価値の上昇はおこらないのである。

5.2.7 自己放電率の影響

図 5-15 は自己放電率が電力貯蔵設備の経済的価値に与える影響を示したものである自己放電率が高まると電力貯蔵設備の経済的価値は低下するが、これは単位時間毎(本論文においては 1hour)にトリクル充電を行っているため、それに必要な電力購入コストが増加するからである。

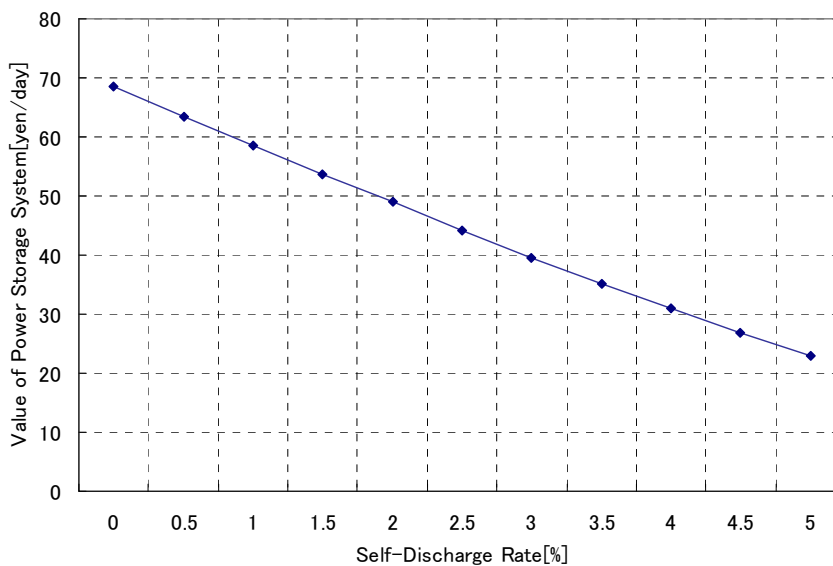


図 5-15 自己放電率と電力貯蔵設備の経済的価値

参考に自己放電率が 5% の際の最適電力貯蔵戦略を図 5-16 に示すが、自己放電率が高まっても最適電力貯蔵戦略には影響を与えないことがわかる。

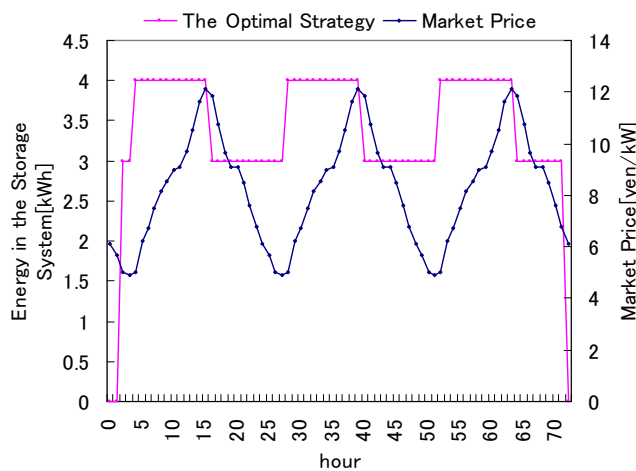


図 5-16 最適電力貯蔵戦略(自己放電率 10%)

5.3 電力貯蔵設備の費用便益分析

本節においては、表のパラメータに加えて固定費を考慮することによって、電力貯蔵設備の費用便益分析を行う。

ただし、貯蔵設備の固定費に関する設定として、

建設単価（発電部）：40000yen/kW

（貯蔵部）：20000yen/kWh

年経費率：0.077

としている。

以下図 5-17 は上記の固定費を考慮した上で、表 4-1 のパラメータの内、貯蔵容量を任意の値とし、入出力容量を 100%に変更した結果を示したものである。停電コストが 500yen/kWh の場合は、貯蔵容量が 9kWh までは利益を得られることがわかる。しかしながら、停電コストが 300yen/kWh, 100yen/kWh となると貯蔵容量をいかなる値に変更しても利益を得られないことがわかる。

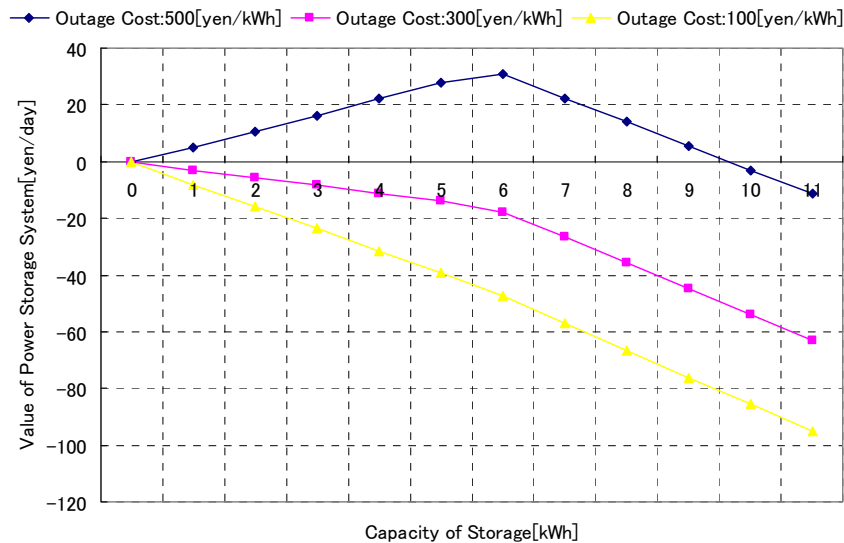


図 5-17 電力貯蔵設備の費用便益

以上の結果により、停電コストを始めとするパラメータの値に大きく依存はするものの、電力貯蔵設備は費用便益を有することがわかった。

停電コストと平均事故発生間隔の影響

これまでの結果から、電力貯蔵設備の費用便益に与える影響が大きい要素として、停電コストと平均事故発生間隔が挙げられる。表 4-1 において、

$$C_{short} / T_1 = 500 / 500 = 1$$

であるため、 $C_{short}/T_1=1$ を満たす中で C_{short} と T_1 を変化させた場合の電力貯蔵設備の費用便益を示したものが図 5-18 である。双方の値が大きくなるにつれて、電力貯蔵設備の費用便益も大きくなっていることから、停電コストの方が平均事故発生間隔よりも、費用便益に与える影響が大きいことがわかるが、それほど大きな差ではないことが見てとれる。

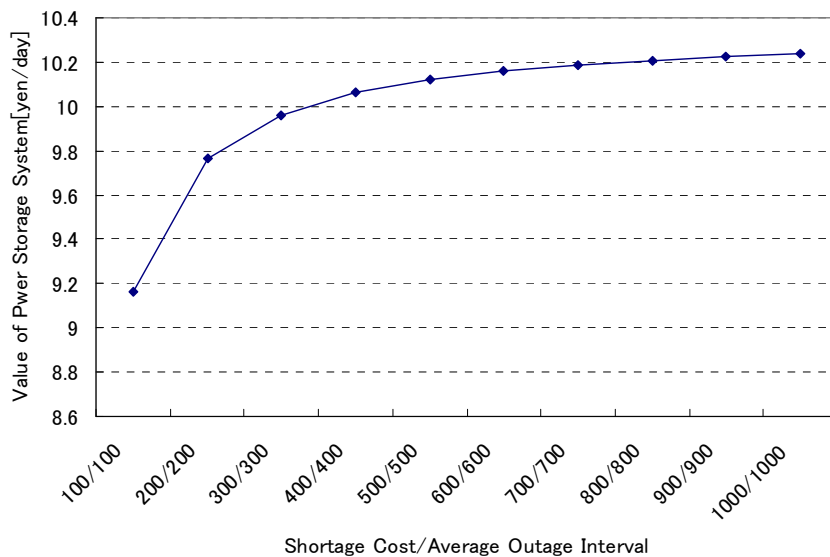


図 5-18 停電コスト・平均事故発生間隔の影響

5.4 モンテカルロ法による妥当性の確認

本節では、モンテカルロ法を用いて差分法を用いて導出した電力貯蔵設備の経済的価値の値の妥当性を確認する。

5.4.1 モンテカルロ法とは

モンテカルロ法とは、確率過程のような連続系の式を離散化し、大量の乱数を発生させてシミュレーションを繰り返し、数学の問題の処理を行う方法であり、幅広い分野で応用されている。

モンテカルロ法の利点として、数式を解析的に解く必要がなく、計算アルゴリズムが明快かつ簡潔であること、経路依存や時間依存などの柔軟なモデリングが可能であり様々な過程を必要としないこと、多資産の評価が可能であること等が挙げられる。

しかしながら、その精度がパスの発生回数に比例するため、精度を高めるためには多大の計算時間が必要となるといった問題点を抱えている。¹⁵¹⁶

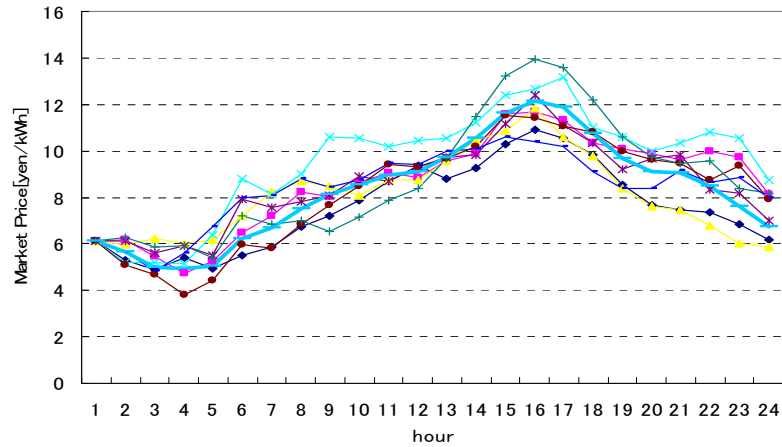
5.4.2 前提条件

電力貯蔵設備と事故発生のパラメータ設定は表 5-1 の通り。なお、今回は差分法で導出された結果の妥当性の確認が目的であるため、簡単のために自己放電率と固定費は考慮しない。

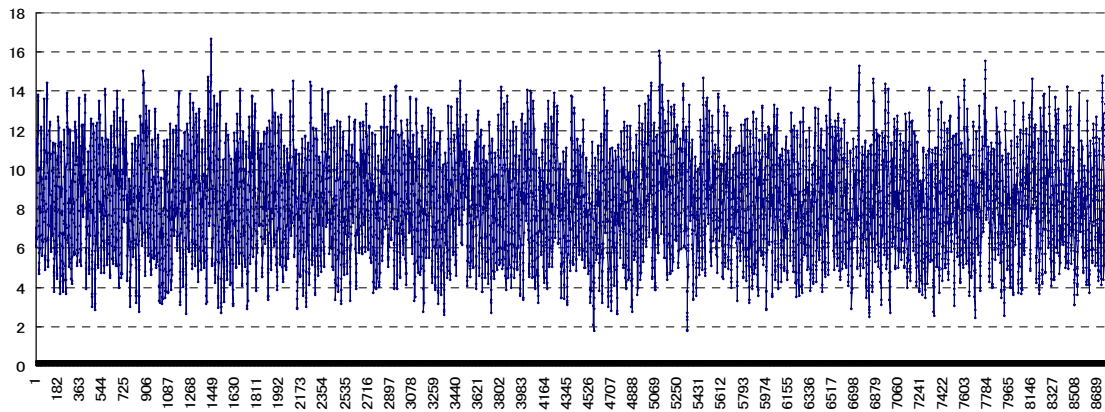
表 5-1 パラメータ設定

充放電効率： K_{eff}	85[%]
貯蔵容量：	4[kWh]
入出力容量： α	3[kW]
停電コスト： C_{short}	500[yen/kWh]
平均事故発生間隔： T_I	500[hour]
平均事故持続時間： T_0	0.5[hour]
停電時不足電力量： X_{short}	5[kW]
自己放電率	0[%/hour]
電力価格均衡値	0
電力価格回帰速度： a	1000
電力価格ボラティリティ： σ	5
初期価格偏差	0
考慮期間	1年間

表 5-1 のパラメータで乱数を発生させて電力市場価格の分布を示したのが以下図 5-19 である。(a)は一日分の推移を示したものであり、(b)は1年分の推移を示した。



(a)1 日スパン



(b)1 年スパン

図 5-19 電力市場価格の推移

以上のようにモンテカルロ法でランダムに市場価格，事故を発生させる中で，差分法を用いて確率動的計画法を解くことで得た最適電力貯蔵動作表の指示通りに貯蔵戦略を実行した場合の年間利益を導出し，それを日数で割ることで1日の平均利益を導出する。尚，差分法を用いて確立動的計画法を解いた場合，1日分の利益の期待値は約 68.45yen/day であった。

5.4.3 結果

まずは電力貯蔵設備導入による利益を1日ずつ記録したものを図 5-20 である。通常の利益は 10yen/day であるのが、停電が発生した日の利益は非常に大きくなっていることがわかる。

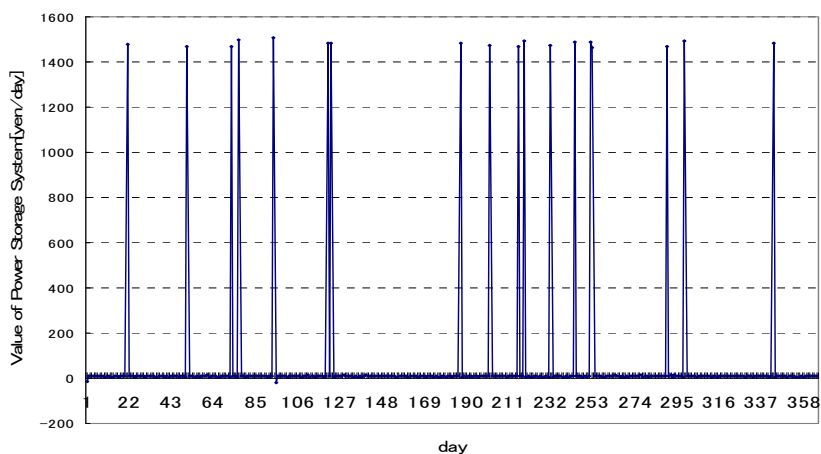


図 5-20 電力貯蔵設備導入による利益 (1日スパン)

続いて、考慮期間を1年とし、電力貯蔵設備導入による年間利益を日数で割ることで、1日の平均利益を導出したのが図 5-21 である。今回は 35 年分の結果を示した。差分法を用いて導出した期待値を中心にばらつきを見せているが、利益の大小はほぼ、ランダムに発生させている年間事故発生回数に依存している。

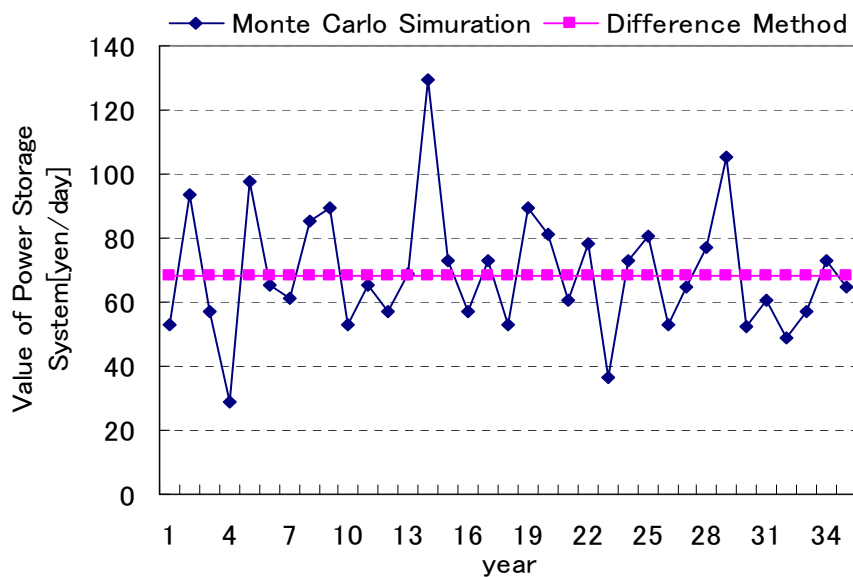


図 5-21 電力貯蔵設備導入による利益 (1日分の利益の平均値)

最後に、図 5-21 で示した値の平均値がどの値に収束していくかを示したものが図 5-22 である。時を経る毎に、平均利益が差分法を用いて導出した結果に近づいていっている。これにより、確率動的計画法を差分法で解いた結果である 68.45yen/day という結果が妥当な値であることが示された。

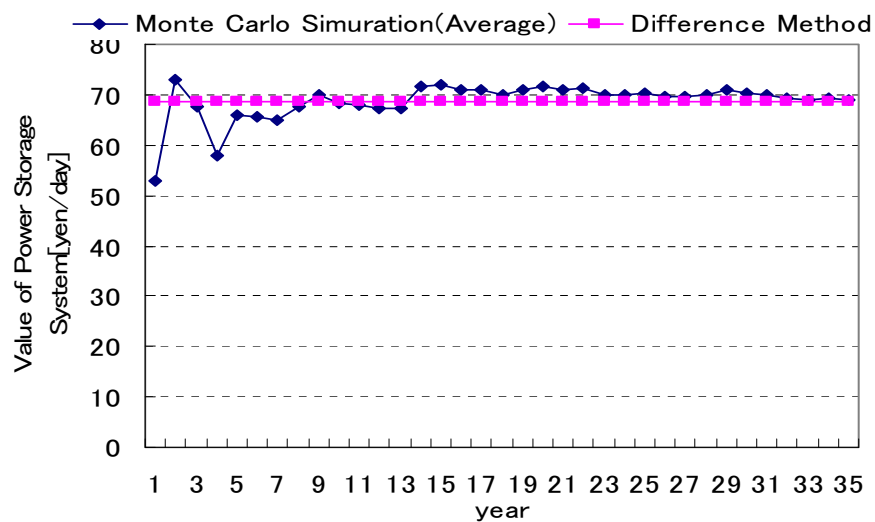


図 5-22 モンテカルロ法による結果の収束の様子

5.5 最適電力貯蔵設備容量の探索

本節では5.3節で導出した電力貯蔵設備の費用便益分析の手法を用いて、与えられた初期投資額の中で最も大きな利益が期待できる最適電力貯蔵設備容量を探索する。

5.5.1 前提条件

最適貯蔵容量の探索に際して、固定費としての建設単価は5.3節同様、

建設単価（発電部）：40000yen/kW

（貯蔵部）：20000yen/kWh

年経費率：0.077

としている。パラメータの条件は以下表 5-2 の通り。

表 5-2 パラメータ設定

充放電効率： K_{eff}	85[%]
停電コスト： C_{short}	500[yen/kWh]
平均事故発生間隔： T_I	500[hour]
平均事故持続時間： T_0	0.5[hour]
停電時不足電力量： X_{short}	5[kW]
自己放電率	0.7[%/hour]
電力価格均衡値	0
電力価格回帰速度： a	1000
電力価格ボラティリティ： σ	10
初期価格偏差	0
建設単価（発電部）： $CapG$	40000[yen/kW]
建設単価（貯蔵部）： $CapS$	20000[yen/kWh]
年経費率	0.077
初期投資額	300000[yen]

初期投資額を 300000yen とする場合、設備容量の組み合わせとしては

- 発電部 1kW に対して：貯蔵部が 1~13kWh
- 発電部 2kW に対して：貯蔵部が 2~11kWh
- 発電部 3kW に対して：貯蔵部が 3~9kWh
- 発電部 4kW に対して：貯蔵部が 4~7kWh
- 発電部 5kW に対して：貯蔵部が 5~6kWh

が考えられ、これを全探索することで最適電力貯蔵設備容量を導き出す。

尚, 今回はコスト関数として, 今回は最も単純なものである

$$\text{Fixed Cost} = 40000 \times \text{CapG} + 20000 \times \text{CapS}$$

(5-2)

という最も単純なコスト関係を想定しているが, これとは異なるコスト関数を用いて最適貯蔵容量探索を行うことももちろん可能である。

5.5.2 結果

以下図 5-23 が, 初期投資額 300000yen の際の最適電力貯蔵設備容量の結果である。設定パラメータの場合, 停電コストに備えた最適貯蔵量は 6kWh であったため, 発電部の値が大きくなればそれだけ費用便益が大きくなっている。しかしながら, 発電部が同じ値においては, 貯蔵部を大きくすれば利益が最大化される訳ではなく,

- 発電部 1kW に対して：貯蔵部が 2kWh
- 発電部 2kW に対して：貯蔵部が 4kWh
- 発電部 3kW に対して：貯蔵部が 6kWh
- 発電部 4kW に対して：貯蔵部が 7kWh
- 発電部 5kW に対して：貯蔵部が 6kWh

となっており, 単純に入出力容量が大きければ費用便益も大きくなるといった結果にはなっていない。発電部ありきで電力貯蔵設備容量設計を行う場合, 貯蔵部の容量決定には様々なパラメータを考慮した最適値の探索が必要となることがわかる。

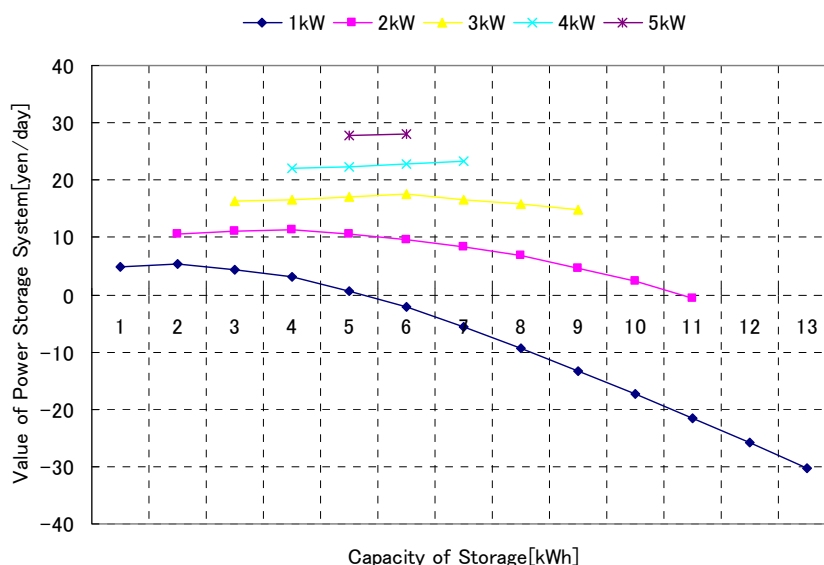


図 5-23 最適電力貯蔵容量の探索

5.6 まとめ

本章では単位時間あたりの電力市場価格と停電発生の不確実性を考慮した上で、電力貯蔵設備を保持する電力小売事業者が 4 章で導出した最適電力貯蔵戦略を行った場合についての電力貯蔵設備の経済的価値についての解析を行った。

本モデルで提案したモデルにより、不確実状況下で電力貯蔵設備の経済的価値を導出することが可能であることを示し、貯蔵容量や充放電効率、平均事故発生間隔や平均事故持続時間などが経済的価値に及ぼす影響についての感度分析を行った。結果、電力貯蔵設備の経済的価値は各パラメータの値に大きく依存しており、パラメータの値が重要な影響を及ぼすことを示した。

また、停電コストを考慮することによって電力貯蔵設備の費用便益分析を行った。電力貯蔵設備の費用便益も各パラメータの値に大きく依存するが、パラメータの値によっては十分に利益を見込めることを示し、今後の電力貯蔵設備導入の可能性を広げた。

続いて、モンテカルロ法を用いて考慮期間 1 年間の中で電力市場確率と停電をランダムに発生させ、それに対して 4 章で導出した最適電力貯蔵戦略を実行して電力貯蔵設備の経済的価値を導出することによって、差分法で得られた電力貯蔵設備の経済的価値との比較を行った。この結果、差分法とモンテカルロ法それぞれによって導出された経済的価値がほぼ同じ値を示しており、本論文の結果の妥当性が証明された。停電コストを考慮した最適電力貯蔵戦略を実行した場合、それによる利益は停電発生時に得られるものが大きな割合を占めており、市場売買によって得られる利益は小さいことも示した。

最後に、与えられた初期投資額の中で最適電力貯蔵設備容量の探索を行った。建設単価の発電部ありきで設計を行った場合、貯蔵部の最適容量は単純な結果になるのではなく、パラメータによって複雑に変化することを示した。尚、今回は最も単純なコスト関数を想定したが、異なるコスト関数を用いて最適電力貯蔵設備容量の探索ももちろん可能である。

第6章 結論

6.1 本研究の成果

本研究では、単位時間における不確実状況下における確率動的計画法を用いた電力貯蔵設備を保持する電力小売事業者の最適電力貯蔵戦略及び電力貯蔵設備導入の定量的な費用便益評価について、差分法による数値解析法を提案した。そして設定条件に基づいて解析を行い、それらの戦略、経済的価値に対して様々なパラメータが及ぼす影響について見当を行い、与えられたパラメータにおける最適電力貯蔵設備容量探索が可能であることを示した。以下に各章で得られた知見を要約する。

第1章では、本研究の背景としての電力貯蔵設備の役割と展望、電力自由化の動向について述べ、それによって生じるリスクとそれに対する電力貯蔵設備の有用性について概要した。そしてそれらの背景を踏まえた上で、本研究の目的を明確にした。

第2章では不確実性を模擬する際に使用する確率過程と、その確率過程を解くために必要となる伊藤公式による確率微分方程式について概説した。また、確率微分方程式の数値解析解を解くために必要とされる有限差分法の基本的な特徴や考え方について示した。

第3章では電力小売事業者についての設定を行い、電力調達コストについての定義を行った。また小売事業者にとってのリスクとなる不確実性（電力市場価格・停電発生の有無）の模擬方法について説明した。さらにそれら単位時間あたりの不確実性の変動と、状態変数を考慮した確率動的計画法を用いた総電力調達コストの導出方法と、本論文で提案する差分法による具体的な数値解析方法について説明した。

第4章では前述した手法を用いて電力小売事業者の最適電力貯蔵戦略を導出した。停電コストを考慮した場合、最適電力貯蔵戦略は停電コスト対策を最優先として構築されるケースが多いこと、残りの貯蔵容量を用いて市場売買を行って売買差益を得ることを示した。また、市場売買のタイミングとしては最も電力の安い時間帯に電力を購入し、最も電力の高い時間帯に電力を売却するという、直感的にも理解できる結果を示すことで、その妥当性を確認した。次に、日を跨いだ連続運転を可能とするアルゴリズムを提案することで、解析期間を1日から日を3日に変更し、最適貯蔵戦略を導出した。日を跨いだ連続運転をした場合、最適電力貯蔵戦略はより停電コストを考慮したものにシフトされることを示した。

第5章では第4章で導出した最適電力貯蔵戦略を実行した場合の電力貯蔵設備導入の経済的価値について定義し、パラメータの変更を行うことで電力貯蔵設備の経済的価値がどのような影響を受けるかについて説明した。電力貯蔵設備の経済的価値はパラメータによって大きな影響を受け、特に停電発生間隔と停電コストの値の重要性が高いことを示した。また、固定費を考慮することで電力貯蔵設備導入の費用便益分析を行い、パラメータの値によっては電力貯蔵設備導入の費用便益は十分に見込めることを証明した。続いてモンテ

カルロ法を用いて実際に電力市場価格と停電をランダムに発生させ、上述の最適電力貯蔵戦略を実行して、平均の 1 日の利益を導出した。この結果が差分法を用いた場合の結果と同じ値になるため、本研究の結果の妥当性を確認した。最後に与えられた初期投資額の中で、最適電力貯蔵設備容量の探索を行うことで、電力貯蔵設備設計の際には相対契約の需要電力量や停電コストなど、様々なパラメータを考慮した入念な設計が必要であることを示すと同時に、本研究のモデルで最適電力貯蔵設備容量の探索が可能であることを示した。

6.2 今後の課題

本研究の今後の課題として以下の事項を考慮した検討を続けることが考えられる。

時間刻みの細分化

本研究においては、計算時間の関係から単位時間を 1 時間として設定しているがこれをより細かい時間に変更できるようなアルゴリズムの構築が課題である。単位時間を小さくすることで離散化の際の誤差が小さくなり、より現実に近いシミュレーションが可能になる。

取引事業者の詳細化

本研究では、電力貯蔵設備保持者が発電設備を保持しているといった状況を想定していない。設備毎に単独決済を行うのならば本研究のモデルでも模擬できるが、実際は連結して決算を行う。また、電力貯蔵設備は発電設備の負荷平準化効果を有するため、それを考慮することによってまた別の経済的価値が生じてくることも予想される。そこで、今後は貯蔵設備保持者が発電設備も保持していたり、需要を持っていたりといった複合エージェントのモデル化を行う必要がある。

付録

係数行列導出法について（以下 s を $s+ds$ と入れ替えたものを本研究では用いている）

●1 階偏微分 $\frac{\Delta V_{M,s,k}}{\Delta x_i}$

1 階偏微分の差分近似について、以下のように表すことができる。

$$m_i = 1$$

$$\frac{\Delta V_{M,s,k}}{\Delta x_i} = \frac{(V_{M+e_i,s,k} - V_{M,s,k})}{\Delta x_i}$$

$$m_i = [2, N_i - 1]$$

$$\frac{\Delta V_{M,s,k}}{\Delta x_i} = \frac{(V_{M+e_i,s,k} - V_{M-e_i,s,k})}{2\Delta x_i}$$

$$m_i = N_i$$

$$\frac{\Delta V_{M,s,k}}{\Delta x_i} = \frac{(V_{M,s,k} - V_{M-e_i,s,k})}{\Delta x_i}$$

ただし、 e_i : 単位ベクトル

よって、偏微分方程式にある $\alpha \cdot \frac{\Delta V_{M,s,k}}{\Delta x_i}$ の項が含まれた場合、係数行列の要素に対して次

のように加える。

1'stPDtoCoefMatrix[M,i,α]

$$m_i = 1$$

$$A_{M,s,M+e_i,s} = A_{M,s,M+e_i,s} + \frac{\alpha}{\Delta x_i}, \quad A_{M,s,M,s} = A_{M,s,M,s} - \frac{\alpha}{\Delta x_i}$$

$$m_i = [2, N_i - 1]$$

$$A_{M,s,M+e_i,s} = A_{M,s,M+e_i,s} + \frac{\alpha}{2\Delta x_i}, \quad A_{M,s,M-e_i,s} = A_{M,s,M-e_i,s} - \frac{\alpha}{2\Delta x_i}$$

$$m_i = N_i$$

$$A_{M,s,M,s} = A_{M,s,M,s} + \frac{\alpha}{\Delta x_i}, \quad A_{M,s,M-e_i,s} = A_{M,s,M-e_i,s} - \frac{\alpha}{\Delta x_i}$$

●2 階の偏微分 $\frac{\Delta^2 V_{M,s,k}}{\Delta x_i \Delta x_j}$

2 階偏微分の差分近似については、 $i=j$ と $i \neq j$ のケースを分ける。以下のように表すことができる。

$i = j$

$m_i = 1$

$$\frac{\Delta^2 V_{M,s,k}}{\Delta x_i^2} = \frac{V_{M+2e_i,s,k} - 2V_{M+e_i,s,k} + V_{M,s,k}}{\Delta x_i^2}$$

$m_i = [2, N_i - 1]$

$$\frac{\Delta^2 V_{M,s,k}}{\Delta x_i^2} = \frac{V_{M+e_i,s,k} - 2V_{M,s,k} + V_{M-e_i,s,k}}{\Delta x_i^2}$$

$m_i = N_i$

$$\frac{\Delta^2 V_{M,s,k}}{\Delta x_i^2} = \frac{V_{M,s,k} - 2V_{M-e_i,s,k} + V_{M-2e_i,s,k}}{\Delta x_i^2}$$

$i \neq j$

$m_i = 1$

$$\frac{\Delta^2 V_{M,s,k}}{\Delta x_i \Delta x_j} = \left(\frac{\Delta V_{M+e_j,s,k}}{\Delta x_i} - \frac{\Delta V_{M,s,k}}{\Delta x_i} \right) / \Delta x_j$$

$m_i = [2, N_i - 1]$

$$\frac{\Delta^2 V_{M,s,k}}{\Delta x_i \Delta x_j} = \left(\frac{\Delta V_{M+e_j,s,k}}{\Delta x_i} - \frac{\Delta V_{M-e_j,s,k}}{\Delta x_i} \right) / 2\Delta x_j$$

$m_i = N_i$

$$\frac{\Delta^2 V_{M,s,k}}{\Delta x_i \Delta x_j} = \left(\frac{\Delta V_{M,s,k}}{\Delta x_i} - \frac{\Delta V_{M-e_j,s,k}}{\Delta x_i} \right) / \Delta x_j$$

よって、偏微分方程式にある $\alpha \cdot \frac{\Delta^2 V_{M,s,k}}{\Delta x_i \Delta x_j}$ の項が含まれた場合、係数行列の要素に対して次の

ように加える。

2'ndPDtoCoefMatrix[M, i, j, alpha]

$i = j$

$m_i = 1$

$$A_{M,s,M+2e_i,s} = A_{M,s,M+2e_i,s} + \frac{\alpha}{\Delta x_i^2}, \quad A_{M,s,M+e_i,s} = A_{M,s,M+e_i,s} - \frac{2\alpha}{\Delta x_i^2}, \quad A_{M,s,M,s} = A_{M,s,M,s} + \frac{\alpha}{\Delta x_i^2}$$

$m_i = [2, N_i - 1]$

$$A_{M,s,M+e_i,s} = A_{M,s,M+e_i,s} + \frac{\alpha}{\Delta x_i^2}, \quad A_{M,s,M,s} = A_{M,s,M,s} - \frac{2\alpha}{\Delta x_i^2}, \quad A_{M,s,M-e_i,s} = A_{M,s,M-e_i,s} + \frac{\alpha}{\Delta x_i^2}$$

$m_i = N_i$

$$A_{M,s,M,s} = A_{M,s,M,s} + \frac{\alpha}{\Delta x_i^2}, \quad A_{M,s,M-e_i,s} = A_{M,s,M-e_i,s} - \frac{2\alpha}{\Delta x_i^2}, \quad A_{M,s,M-2e_i,s} = A_{M,s,M-2e_i,s} + \frac{\alpha}{\Delta x_i^2}$$

```

i ≠ j

m_i = 1
      1'stPDtoCoefMatrix[M+e_i,i,α/Δx_j], 1'stPDtoCoefMatrix[M,i,-α/Δx_j]

m_i = [2, N_i - 1]
      1'stPDtoCoefMatrix[M+e_i,i,α/2Δx_j], 1'stPDtoCoefMatrix[M-e_i,i,-α/2Δx_j]

m_i = N_i
      1'stPDtoCoefMatrix[M,i,α/Δx_j] , 1'stPDtoCoefMatrix[M-e_i,i,-α/Δx_j]

```

●係数行列導出のアルゴリズム

```

A_I = 0 % 行列係数の全ての要素を 0 に初期化する
For M = [1,1,...,1] to [N_1,N_2,...,N_n]
  A_{I,M} = 1 + Δt/T_I % V_{I,M,k} による係数行列の要素
  % 1 階偏微分による係数行列の要素
  For i = 1 to n
    1'stPDtoCoefMatrix[M,i,-a_iΔt]
  Next I
  % 2 階偏微分による係数行列の要素
  For i = 1 to n
    For j = 1 to n
      2'ndPDtoCoefMatrix[M,i,j,-1/2ρ_{ij}b_i b_j Δt]
    Next j
  Next i
Next M

```

A₁, A₀についても同様。

謝辞

本研究の進行には数多くの方々が協力して下さいました。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、ミーティングで適切なアドバイスを下さり軌道修正して下さいった山地憲治教授に心より感謝致します。

また、研究が行き詰った際にも私を見捨てることなく常に細かい配慮をして下さり、具体的なアドバイスをして下さいった藤井康正助教授にも心より感謝しております。先生のお気遣いは本当に励みになりました。

山本博巳助教授には、ミーティング時の助言や日常の研究生活でのお心遣いなど、心より感謝致します。

竹下貴之助手には、研究室全体のとりまとめをして頂きありがとうございました。細かなお気遣いのお陰で、充実した研究環境で研究を進めることができました。

同輩の大平君、永富君、両澤君、横山君を始め、既に卒業された研究室の諸先輩方及び大学院生、卒論生の方々とは、非常に楽しい研究生活を送らせて頂きました。これだけ楽しいメンバーに囲まれた研究室は、それ程ないだろうと思う位楽しませて頂きました。ありがとうございました。

秘書の方々にも暖かく研究のサポートをして頂き、本当にありがとうございました。

最後に、これまでの18年間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、謝辞と致します。

2007年2月1日

都留 大和

発表文献

都留大和，松山知弘，藤井康正，山地憲治，“電力価格の不確実性と負荷追従性を考慮した発電設備の最適運用戦略”，電気学会全国大会，2006年3月

都留大和，松山知弘，藤井康正，山地憲治，“確率動的計画法に基づく負荷追従性を考慮した自由化環境における発電設備運用戦略”，電力・エネルギー部門大会，2006年9月

都留大和，藤井康正，“確率動的計画法を用いた電力貯蔵設備の費用便益分析”，電気学会全国大会，2007年3月

参考文献

- ¹ 内山洋司, “電力貯蔵技術の役割と展望”, エネルギー・資源学会情誌, VOL25, NO.6, 2004/11
- ² 井上雅晴, “電力自由化 2007 年の扉”, エネルギーフォーラム
- ³ 西村陽, “電力改革の展望”
- ⁴ 西村陽, “電力自由化完全ガイド”
- ⁵ 南部鶴彦, “電力自由化の制度設計”
- ⁶ Siripatanakulhajorn Sakchai, “市場価格の不確実性を考慮した確立的最適電力調達戦略に関する研究”, 東京大学修士論文, 2003 年
- ⁷ Shijie Deng, “Stochastic Models of Energy Commodity Prices and Their Applications: Mean-reversion with Jumps and Spikes”, University of California Energy Institute, 2001
- ⁸ Mustafa Oguztoreli, “Power Price Dynamics, Forward Curves and Exotic Options”, http://www.haskayne.ualgary.ca/fnce/fin_research_old.html, 2001
- ⁹ 最所祐一, “確率動的計画法に基づく電力調達及び発電設備運用戦略の評価”, 東京大学修士論文, 2003 年
- ¹⁰ 丹羽弘善, “電力市場における電力貯蔵システムの運用戦略”, 東京大学修士論文, 2005 年
- ¹¹ 沢木勝茂, “ファイナンスの数理”, 朝倉書店, 1994 年
- ¹² 森平爽一郎, 小島裕, “コンピュータシヨナル・ファイナンス”, 朝倉書店, 1997 年
- ¹³ 山田聡, “電力自由化の金融工学”, 東洋経済新報社, 2001 年
- ¹⁴ <http://www.ucei.berkeley.edu/ucei/datamine/datamine.html>
- ¹⁵ 湯前祥二, 鈴木輝好, “モンテカルロ法の金融工学への応用”, 朝倉書店, 2000 年
- ¹⁶ 保江邦夫, “Excel で学ぶ金融市場予測の化学”, 講談社, 2003 年