The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	機器提供型サービスにおけるリスクに基づく意思決定支援に関する研究
Author(s)	谷, 繁幸
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/34558
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

機器提供型サービスにおける
リスクに基づく意思決定支援に関する研究

2014 年 1 月

谷　繁 幸

機器提供型サービスにおけるリスクに基づく意思決定支援に関する研究

2014年1月

谷　繁幸

機器提供型サービスにおける
リスクに基づく意思決定支援に関する研究

提出先　　大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月　　2014 年 1 月

谷　繁 幸

研究業績

A. 学術論文誌論文

[1] 谷繁幸, 中川忠輔, 薦田憲久: “機器提供型サービスにおけるリスクを考慮した導入先選定方法”, 電気学会論文誌 C, Vol.132, No.2, pp.319-324 (2012).

[2] S. Tani, T. Nakagawa, and N. Komoda: “The pricing method of the purchase option by the book value for equipment service”, *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, Vol. 5, Issue 6, pp.738-745 (2011).

[3] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴, 薦田憲久: “契約の柔軟性を考慮した電力サービス選択の分析手法”, 電気学会論文誌 C, Vol.127, No.12, pp.2159-2165 (2007).

[4] 中川忠輔, 谷繁幸, 赤津雅晴, 薦田憲久: “IT 投資戦略立案のための相乗効果を考慮したロードマップ構築手法”, 電気学会論文誌 C, Vol.126, No.7, pp.919-925 (2006).

[5] 高橋信輔, 谷繁幸, 石井俊夫, 加藤木工三: “動的基準モデルを活用した自動車エンジン燃料性情の判別法”, 電気学会論文誌 C, Vol.122, No.1, pp.116-123 (2002).

B. 国際会議

[1] S. Tani, T. Nakagawa, and N. Komoda: “Equipment Diversion Design Method in Equipment Service”, in *Proceeding of 3rd World Multi conference on Applied Economics, Business and Development (AEBD ’11)*, pp.26-29 (2011).

[2] S. Tani, T. Nakagawa, and N. Komoda: “Plants Selection Method for Equipment Service Considering Use Effect Risk” in *Proceeding of the 4th Japan-China Joint Symposium on Information Systems (JCIS 2011)*, pp.47-50 (2011).

[3] S. Tani, T. Nakagawa, and M. Akatsu: “Portfolio Management Method in IT Property” in *Proceeding of the 10th WSEAS International Conference on Mathematics and Computers in Business and Economics (MCBE'09)*, pp.217-220 (2009).

[4] S. Tani, M. Akatsu, and N. Komoda: “Electric Power Service Selection Considered Flexibility of Contract”, in *Proceeding of 12th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pp.599-603 (2007).

[5] S. Tani, S. Takahashi, and T. Sekozawa: "Identification Tool for Chemical Processes", in *Proceeding of The 1999 IEEE Conference on Control Applications (CCA), Symposium on Computer-Aided Control Systems Design (CACSD)*, WP1.4, pp.1561-1566 (1999).

C. 国内講演

[1] 谷繁幸, 中川忠輔, 薦田憲久: “サービス事業におけるリスク回避効果の評価”, 第 4 回横幹連合コンファレンス, 1F3-3(in CD-ROM) (2012).

[2] 谷繁幸, 中川忠輔, 薦田憲久: “機器提供型サービスにおける導入先選定方法の考察”, 電気学会平成 23 年全国大会, 4-211, p.362 (2011).

[3] 谷繁幸, 中川忠輔, 薦田憲久: “機器サービスにおける機器転用設計法”, 電気学会情報システム研究会, IS-10-73, pp.1-4 (2010).

[4] 谷繁幸, 藪谷隆, 薦田憲久: “サービス事業におけるリスク回避効果の経済性評価”, 電気学会情報システム研究会, IS-08-9, pp.43-46 (2008).

[5] 吉川裕, 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “情報化投資の管理手法の提案”, 情報処理学会第 70 回全国大会講演論文集, No4, pp.4-441-4-442 (2008).

[6] 栗栖宏充, 平井千秋, 小泉敦子, 福本恭, 谷繁幸: “体系的な事業創生を目指すビジネス構築技術確立へ向けた取り組み”, 第 2 回横幹連合コンファレンス, 30D05(in CD-ROM) (2007).

[7] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “情報ユーティリティサービスにおける価値評価方法”, 電気学会情報システム研究会, IS-07-21, pp.27-30 (2007).

[8] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “IT ポートフォリオ管理手法”, プロジェクトマネジメント学会研究発表大会予稿集 2007(秋季), pp.352-353 (2007).

[9] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “IT ポートフォリオ管理における IT 資産評価手法”, 電気学会情報システム研究会, IS-07-12, pp.7-12 (2006).

[10] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “ユーティリティサービスにおける柔軟性価値可視化の検討”, 電気学会 C 部門大会, p.300 (2006).

[11] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “IT ポートフォリオ管理手法”, 経営情報学会・オフィス・オートメーション学会合同・第 52 回春季全国研究大会全国研究発表大会要旨集, pp.314-317 (2006).

[12] 赤津雅晴, 谷繁幸, 吉川裕, 中川忠輔: “合意形成を促進する IT 投資マネジメント手法の提案”, 経営情報学会・オフィス・オートメーション学会合同・第 52 回春季全国研究大会全国研究発表大会要旨集, p.51 (2006).

[13] 吉川裕, 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “関係者間の合意形成を重視した IT 投資評価の一手法”, 経営情報学会・オフィス・オートメーション学会合同・第 52 回春季全国研究大会全国研究発表大会要旨集, p.20 (2006).

[14] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “IT 資産におけるポートフォリオ管理手法”, 電気学会情報システム研究会, IS-05-64, pp.45-50 (2005).

[15] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “リアル・オプション評価手法を用いた電力需給契約の評価手法”, 電気学会情報システム研究会, IS-05-11, pp.21-26 (2005).

[16] 谷繁幸: “機器提供型サービス事業におけるリスク管理”, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp. II-161-166 (2003).

[17] 谷繁幸, 高橋信輔, 瀬古沢照治: “化学プロセスにおけるモデル予測制御パッケージの開発”, 計測自動制御学会制御シンポジウム, pp.423-426 (1999).

[18] 谷繁幸, 中村宗徳, 菅野道夫: “無人ヘリコプタの知的ナビゲーション”, ファジィシステムシンポジウム講演論文集 12, pp.589-592 (1996).

D. その他

[1] 高森寛, 井出正介, 新井富雄, 蟻川靖浩, 伊藤晴祥, 加藤敦, 呉瑛禄, 高橋文郎, 谷繁幸, 辻村元男, 長坂研, 安信千津子, 薮谷隆, 山口浩, 渡部亮: “金融・契約技術・エージェンシーと経営戦略”, 第 9 章 生産装備サービスにおけるリスク評価手法, 東洋経済新報社, pp.193-208 (2005).

[2] 谷繁幸, 鈴木勝幸, 赤松耕二, 橋本祐樹: “モデル予測制御パッケージの開発と空気分離プラントへの適用”, 計測と制御, Vol. 39, No. 5, pp.343-345 (2000).

内容梗概

本論文は、筆者が 2002 年から現在まで(株)日立製作所　システム開発研究所、横浜研究所において取り組み、2008 年から 2010 年まで大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻在学中に発展させた機器提供型サービスのリスクに基づく意思決定支援方式に関する研究成果をまとめたものである。

近年の企業経営環境では収益の不確実性が増加しているため、サービス提供者がサービス利用者に代わって機器を保有し、利用効果に応じた料金を受け取る機器提供型サービスが増加している。このようなサービス事業の例としては、アウトソーシング事業や ESCO (Energy Service Company)事業などが挙げられる。機器販売と比較した機器提供型サービスの特長は、サービス利用者から見ると操業度合いに応じて必要なだけ機器を利用できるため、初期投資が不要になり投資回収リスクを負わないこと、従量課金のため効果変動による運用リスクを負わないことである。

機器提供型サービスを利用・提供するにあたって、そのサービス利用によるリスク回避の効果がどの程度あるかを評価することは、サービス利用者にとってサービス選択の意思決定を行う重要な要素である。一方で、本来はサービス利用者が負っていたリスクの内、機器提供することによりサービス提供者が負うことになるリスクを評価し、そのリスクを低減するまたは最適化することは、サービス提供者にとって機器提供の意思決定を行う重要な要素である。

このような背景のもと、本論文では、(1)契約のリスク回避効果を考慮したサービス比較方式、(2) リスク結合を考慮した導入先選定方式、(3)機器買い取りオプションのプライシング方式、を提案する。本論文は全 5 章から構成される。

第 1 章の序論では、機器提供型サービスの概要とそのリスクを説明し、将来にわたってリスクがある状況で意思決定を支援する重要性を述べる。さらに本研究で取り上げる課題を述べ、関連研究を概観するとともに、本論文の目的と位置づけを明らかにする。

第 2 章では、電力供給サービスと分散電源を購入する場合とを比較する課題について説明し、リスク変動に応じた電力需給契約のリスク回避性を考慮したリスク評価方式を説明する。まず、電力供給サービスにおけるリスクモデルと、電力需要量変化に応じて契約変更、解約するオプションモデルを検討する。最後に、評価対象を平均的な高圧電力需要家

とした評価を実施し、提案方式によるサービス切り替えタイミング決定方式の有効性を確認する。

第 3 章では、機器の導入先の選定によるリスク低減・最適化方式について述べる。まず、利用効果変動リスクを考慮しない従来の導入先選定方式の課題について説明する。次に、利用効果リスクを考慮した導入先選定問題を定式化し、分枝限定法を用いて高速に導入先を選定する方式を説明する。次に、導入先選定問題における初期暫定解とノード上限値の求め方を検討する。最後に、評価対象を 100 台の高圧モータを保有する利用者とした評価を実施し、提案方式による収益変動リスクの改善効果と探索時間の改善効果を確認する。

第 4 章では、サービス提供者の分担リスクを低減するために、機器提供サービスの途中で提供機器を買い取る権利のプライシング方式について述べる。まず、機器買い取り発生メカニズムを説明し、従来の買い取りプライシング方法の課題について述べる。次に、サービス導入前のプライシング方式を説明する。最後に、評価対象を石油メーカーのボイラー通風設備でのサービス利用とした評価を実施し、提案方式による収益変動リスクの改善効果を確認する。

第 5 章では、結論として本研究で得られた成果を要約した後、今後に残された課題について述べる。

目次

第 1 章　序論 1
1.1　研究の背景 1
1.2　関連研究 3
1.2.1　サービス利用による利用者のリスク回避の評価研究 3
1.2.2　サービス提供者のリスク負担の低減・最適化研究 4
1.3　研究の方針 4
1.4　本論文の構成 6
第 2 章　契約のリスク回避効果を考慮したサービス比較方式 9
2.1　緒言 9
2.2　従来の経済性分析手法 10
2.2.1　電力サービス概要 10
2.2.2　平均需要量による経済性分析 11
2.2.3　キャッシュフローモデル 13
2.2.4　従来の問題点 15
2.3　リスク回避性に基づく経済性分析手法 16
2.3.1　分析アプローチ 16
2.3.2　リスクモデル 19
2.3.3　オプションモデル 19
2.4　提案手法による評価例 21
2.4.1　評価対象 21
2.4.2　契約変更オプションの評価例 22
2.4.3　乗り換えオプションの評価例 25
2.4.4　震災の影響評価例 28
2.5　まとめ 29
第 3 章　リスク結合を考慮した導入先選定方法 31
3.1　緒言 31

3.2　省エネルギー機器提供サービス 32
3.3　導入先選定問題 38
3.3.1　利用効果リスクを考慮した導入先選定 38
3.3.2　導入先選定問題の定式化 39
3.4　分枝限定法を用いた導入先選定方法 41
3.4.1　初期暫定解 42
3.4.2　ノードの上限値 42
3.5　導入先選定方法の効果評価 46
3.5.1　評価データ 46
3.5.2　リスク考慮効果の評価 46
3.5.3　モータ間相関の影響評価 47
3.5.4　探索時間の評価 48
3.6　結言 49
第 4 章　機器買い取りオプションのプライシング方式 51
4.1　緒言 51
4.2　従来のプライシング方式 52
4.2.1　買い取り時点での時価評価 52
4.2.2　時価評価の問題点 53
4.3　買い取りオプションの価格付け方法 55
4.3.1　買い取りオプションの価値評価部 56
4.3.2　サービスポートフォリオ評価部 58
4.3.3　買い取りオプション価格算定 59
4.4　オプション購入による期待利益評価 60
4.4.1　評価対象 60
4.4.2　評価結果 61
4.5　結言 63
第 5 章　結論 65
5.1　本研究のまとめ 65
5.2　今後の課題 66
謝辞 69
参考文献 71

第1章

序論

1.1　研究の背景

近年の企業経営環境では収益の不確実性が増加しているため、企業は投資回収にリスクが見込まれる機器への投資を敬遠している。そこで、サービス提供者がサービス利用者に代わって機器を保有し、利用効果に応じた料金を受け取る機器提供型サービスが増加している。このようなサービス事業としては、ESCO (Energy Service Company)事業やアウトソーシング事業などが挙げられる。

機器提供型サービの歴史は浅く、ESCO 事業については資源エネルギー庁が委員会の「我が国の ESCO 事業の動向」[1]にあるように 1990 年代が始まりである。ESCO 事業は、サービス提供者が省エネルギー工事を行い、その光熱費の削減分で全ての経費を賄うということが特徴である[2]。1997 年に京都議定書が採択され、議定書の目標達成に即効性の高い ESCO 事業導入が促進された。ESCO サービスととしては「ドライブソリューションによるプラント設備の省エネルギー技術」[3]に見られるように、イニシャルコスト(初期投資費用)不要で省エネルギー設備であるインバータを設置し、毎月実現する省エネルギー量(額)の中から利用料を支払い、残額をサービス利用者の利益とする機器提供型サービス等が提案されている。アウトソーシング事業については 1990 年代後半から情報システム分野で発展した。計算機システムの管理や運用を代行するサービスは行われていたが、2000 年代に入ると、ハウジングサービスと呼ばれるサービス利用者の計算機システムを設置するデータセンタ設備およびスペースを提供するサービスが始まった。さらには、データセンタ事業者が用意した計算機を貸し出すホスティングサービスが提供されるようになり、現在ではデータセンタ事業者が用意したアプリケーションソフトウェアを提供する“Software as a Service”(SaaS)の提供にまで至っている[4][5][6]。

図 1.1 に、機器提供型サービスでのサービス提供者とサービス利用者との関係を示す。省エネルギー機器などの機器をサービス利用者に無償で提供し、モータなどのサービス利用者設備に接続するとともに、省エネルギー機器の導入メリット測定ツールを設置し、月々の導入効果額を算出し、サービス契約に基づいて、提供機器の運用による導入メリットの

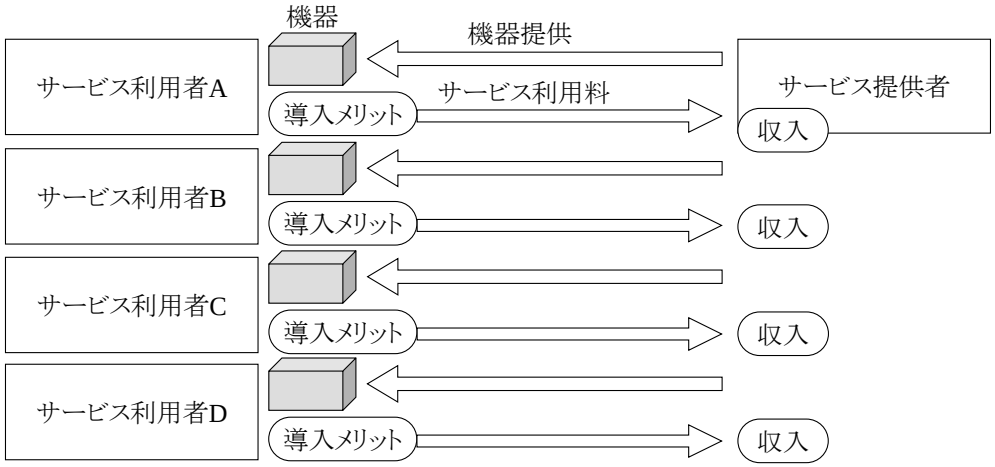

図 1.1　機器提供型サービスでのサービス提供者とサービス利用者

うちから一定の割合でサービス料金を提供機器の利用料として徴収するサービスである。

機器提供型サービスでは、導入後に発生した機器導入メリットの大きさに応じた額が、サービス利用料としてサービス利用者からサービス提供者に支払われる。機器導入メリットは機器の操業度合いによって増加・減少するため、サービス提供者の収入もサービス利用者の機器操業度合いにより増加・減少するというリスクをはらんでいる。機器導入メリットが大きい場合にはサービス提供者の収入は増加し、機器導入メリットが小さい場合にはサービス提供者の収入は減少する。従来の機器販売ではサービス利用者が負担していた機器操業度合いの変動による機器導入メリットの増加・減少を、サービス利用者と伴にサービス提供者が収入の変動という形で負担する。図 1.2 左上のグラフに示すように、機器提供を受けたサービス利用者の操業度合いは一定ではなく、市場の動向などによってある確率で分布する。そのため図 1.2 右上のグラフに示すように、この操業度合いに応じて収入を得るサービス提供者の収入も、操業度合いの発生確率に基づいて分布する。この確率に基づいて分布し変動する収入をリスクと考える。機器提供型サービスの利用・提供においては、このリスク負担をサービス利用者とサービス提供者の各々の立場から低減することが問題である。

本論文では、機器提供型サービスを安全に利用・提供するため、このリスク負担の観点から、図 1.2 に示される以下の 2 つの課題を設定する。

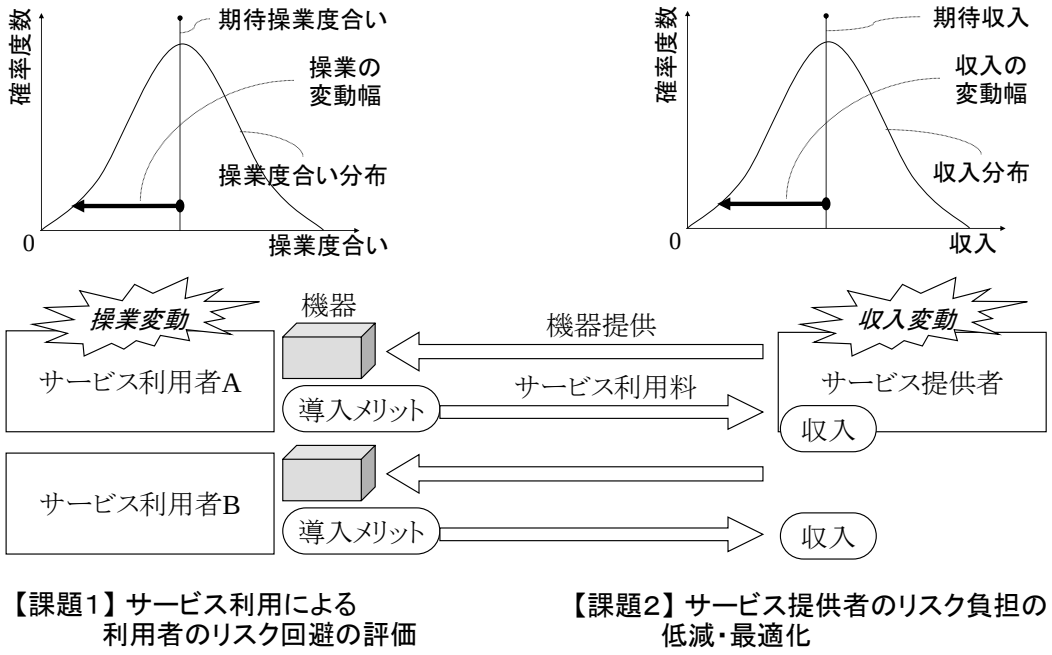

図 1.2　機器提供型サービスの課題

(1) サービス利用者が、他サービスと比較してサービス選択の意思決定を行うために、自らの操業変動特性に応じて、サービス利用によるリスク回避の効果がどの程度あるかを評価する方法

(2) サービス提供者が、サービス利用者の操業変動特性を評価し、そのリスク負担を低減するまたは最適化する方法

1.2　関連研究

1.2.1　サービス利用による利用者のリスク回避の評価研究

機器提供サービスにおけるサービス比較のため、多くのサービス提供者は、対象機器の導入効果特性モデルを作成し、これを用い、サービスを導入しない場合とサービスを導入した場合との差から導入効果を定量化している[7]。また機器導入効果による利益は、対象機器の稼働率モデルとコストモデルを作成し、一定期間を対象として累積の導入効果を算出している[8]。また稼働率モデルやコストモデルに関して、機器操業度合いを確率変数と考えて、モンテカルロシュミレーションによりサービス期間中の収益範囲を予測することが研究されている[9]。

1.2.2 サービス提供者のリスク負担の低減・最適化研究

サービス提供者のリスク負担を低減・最適化するには、まずサービス導入先の選定により調整する方法が考えられる。導入先選定方式の研究としては、家屋の賃貸サービスや車両のレンタルサービス、近年ではＤＶＤのレンタルサービスなどの機器提供型サービスに類似したサービスにて、導入先選定に関する意思決定支援方法の研究が行われている[10]～[12]。

ＤＶＤのレンタルサービスを対象に、収益性の高いサービス利用者と低いサービス利用者とを峻別し、収益性の高いサービス利用者に対して施策を打つといった意思決定支援方式が提案されている[11]。また、家屋の賃貸サービスを題材に、借り主からの賃借リクエストがあった場合に、大家が提供するか否かを判定する意思決定支援方式として、賃借期間の長短から導入先を評価する方式が提案されている[12]。しかし、何れの研究においても導入メリット平均値の最大化を目的関数としている。

他方で、サービス提供者のリスク負担を低減・最適化するには、提供サービスの価格付け（プライシング）により調整する方法が考えられる。機器提供型サービスでのプライシング方式としては、サービス利用者の操業状況に応じて機器導入効果を算出し、この機器導入効果から算出される総利益に対して、機器導入のリース料やサービスオペレーション料を指し引いたサービス利用者利益がプラスとなるようにプライシングする方法が提案されている[8][13]。また小坂らは、リスク要因として「エネルギー価格の変動」「機器購入資金の金利変動」「CO2 取引価格の変動」「操業度の変動」の４つを取り上げ、各々をサービス利用者に負担させるのか、サービス提供者に負担させるのかによるリスクシェア設計方法を提案している[14]。しかしこれらは、発生する導入効果の範囲が、サービス導入時の想定の範囲に収まっていることを前提[15][16]にしている。

1.3 研究の方針

図 1.3 に示すように、課題 1 に対しては、機器提供型サービスを導入した場合のリスク回避効果の経済性を定量的に評価するモデルを構築することでサービス比較を実現する方式を研究し、利用者のリスク回避の評価を行う。課題 2 に対しては、まず、機器導入先の組み合わせによるリスク低減効果に着目し、収入の変動幅の観点から定式化し分枝限定法による最適な導入先選定の方式を研究する。さらには、機器導入効果が予想と大きく異なった場合にも、サービス提供者とサービス利用者との間でリスクを分担するプライシング方式を提案し、サービス提供者のリスク負担の低減・最適化を行う。

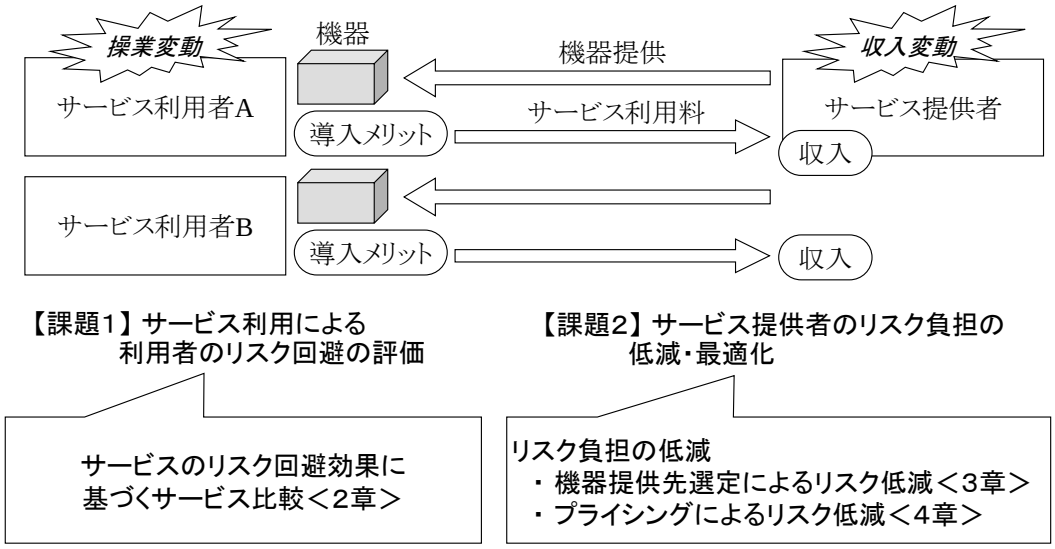

図 1.3　研究の方針

(1)　リスク回避効果に基づくサービス比較方式

従来の機器提供型サービス提供に関するサービス比較方式の研究は、機器操業度合いを確率変数とし収益範囲を予測し比較する方法に留まっている。しかし、操業変動リスクをサービス提供者が負担することで、機器提供型サービスを導入したサービス利用者は、従来負担していたリスクを回避する効果も得ている。本論文では、機器提供型サービスを導入した場合のリスク回避効果の経済性を定量的に評価するモデルを検討し、機器導入自体の経済性に加算することで、リスク回避効果の有無および大小を加味したサービス比較方式を検討する。サービス利用者としての電力需要家に対して、機器提供型サービスとしての系統電源と、機器販売型サービスとしての分散電源が提供されているケースに適用し、系統電源が「分散電源価格の変化に応じて分散電源に切り替えられる選択権」や「電力需要量変化に応じて定格電力を切り替えられる選択権」を電力需要家に提供していることに着目し、これらの選択権によるリスク回避効果を考慮したサービス比較方式ならびに、切り替えタイミングの決定方式を評価する。

(2)　リスク負担を低減する導入先選定方式

従来の機器提供型サービスに関する導入先選定方式の研究は、平均収入の最大化を目的としている。しかし、サービス利用者工場内の複数設備に機器を複数提供すると、導入メリット変動に相関の高い機器が多数含まれるため、機器導入先の組み合わせにサービス全体収入の分布幅が大きく影響される。サービス提供者の事業リスクを考えた場合、平均収入と最低収入の両方を大きくすることが重要である。そこで、本論文では、機器導入先の

組み合わせ選定を収入の変動幅の観点から定式化し、最適な導入先を選定する方式を検討する。さらに、省エネルギー機器提供型サービスにおいてサービス利用者工場内の複数設備（モータ）に省エネルギー機器を複数提供する場合の定式化を行い最適な導入先選定方式ならびに選定時間を評価する。

(3) リスク負担を低減するプライシング方式の研究

従来の機器提供型サービスに関するリスク負担を低減するプライシング方式の研究は、発生する導入効果の範囲が、サービス導入時の想定の範囲に収まっていることを前提にしている。しかし実際には、導入後の導入効果が予想よりも大きかった場合や小さかった場合が発生する。機器提供型サービスは長期間サービスであり、導入効果が予想と異なった場合、サービス利用者に不満が残る。そこで、本論文では、導入効果が予想と異なった場合にもリスクを分担できるプライシング方式を検討する。導入効果が予想より大きくなった場合にサービス利用者が機器を簿価で買い取る権利を購入し、サービス利用者がリスクを分担することで､サービス提供者のリスク負担を低減する買い取りオプションに関して、導入効果変動に応じた買い取り発生の増減とそれに基く売上増減に着目し、サービス提供者のリスク負担を低減する買い取りオプションのプライシング方式を検討するとともに、導入効果変動による買い取りオプション価格への影響を評価する。

1.4 本論文の構成

本論文の第 2 章以降は以下のように構成される。

第 2 章では、図 1.3 の課題 1「サービス利用による利用者のリスク回避の評価」に対応して、文献[17]～[22]に基づき、電力需要家が電力供給サービスを選択する際に、電力需要家の将来のリスクに対して、系統電源が提供する電力需給契約のリスク回避性に焦点を絞り、その契約変更のリスク回避性により需要家が享受するリスク回避効果を評価するとともに、分散電源への切り替えタイミングを決定する方式について述べる。最後に高圧電力需要家を想定し提案方式を評価する。

第 3 章では、図 1.3 の課題 2「サービス提供者のリスク負担の 低減・最適化」に対応して、文献[23]～[27]に基づき、導入先の利用効果変動の相関を考慮したうえで導入先を選定するとともに、短期間に最適な導入先設備候補組み合わせを構築する方式について述べる。最後に高圧インバータを導入できるサービス利用者の工場を想定し、提案手法の有効性を確認する。

第 4 章では、図 1.3 の課題 2「サービス提供者のリスク負担の 低減・最適化」に対応して、文献[28]～[30]に基づき、提案方式であるサービス利用開始時に機器を買い取る価値

を評価する方式を説明し、評価方法に関する検討の詳細を述べる。最後に、評価対象を石油メーカーのボイラー通風設備でのサービス利用とした評価を実施し、提案方式による収益変動リスクの改善効果を確認する。

第 5 章では、結論として本研究で得られた成果を要約し、今後の課題を述べる。

第2章

契約のリスク回避効果を考慮したサービス比較方式

2.1　緒言

機器提供型サービスのリスク変化に応じた契約のリスク回避性を考慮し、このリスク回避効果を定量評価してサービス比較する方式について述べる。ここでは特に自由化でサービス比較が激化している電力サービス分野において、電力需要家が、系統電源サービスと分散電源の購入とを比較する場合を題材に取り上げて説明する。

日本の電気事業（旧来から電力会社が実施してきた系統電源による電力事業）をとりまく環境では、電気事業法の改正に伴い電力の小売り分野の部分自由化が進められている。今後も小売り分野の自由化範囲の拡大により、小規模な需要家を対象とした全面自由化まで拡大する可能性がある。小規模発電の技術革新や石油・石炭・ガスなど燃料価格の低水準化による自家発やコジェネレーションといった新電源（分散電源）の進展により、大きく変貌し始めている。需要家にとって系統電源はもはや唯一の電力供給源ではなく、価格次第では他電源との間で選択できる時代となってきた。現在では企業による業務用自家発電所有や自家発電の代行事業などが注目を集めており、従来の遠隔地発電・大容量発電・長大な送電線などによる規模のメリットを追求した電力事業にとって大きな脅威となっている[31]。電力会社の目から分散電源を見た場合、電力需要のピーク削減に利用できるというメリットもあるが、ベース電源としての利用が進んでしまった場合には、電力会社の電力販売量が減少するという問題と、さらには、需要家離脱による需要家当たりの固定費負担の増加という問題がある。固定費負担の増加は、電力料金の値上げに繋がり、さらなる離脱を促進させる恐れがある。

需要家にはサービス選択の判断方法が求められる。異なるサービス間の比較方法としては、想定したエネルギー需要量に基づいて各々の電力単価・エネルギー単価を算出し、その値を比較する方法が一般的である[32][33]。ここで自家発電やコジェネレーションを導入する需要家の主目的は電力料金の節約と考えられるが、現行の系統電源が提供している

電気料金の水準は、サービス供給に掛かった費用をベースに算定される「原価主義」と呼ばれる料金決定法であり、電気事業法第１９条に定められた料金規制の基本原則である。料金の決め方には他に、需要家がサービスを利用して享受する価値をベースとした「価値主義」や、消費者の経済的な負担能力をベースとした「負担力主義」も考えられるが、価値や負担力主義よりも算定根拠が明確で客観的であるということから、電気料金の水準決定においては原価主義の原則（総括原価方式）が採用されてきた。

しかし、需要家の将来のエネルギー需要量は不確実であり、実際には需要量が想定量を下回る可能性が存在している。例えば平均的にエネルギー単価の安い電源を需要家が購入した場合にも、その需要家は購入費用が未回収になるリスクを保有している。一方で系統電源の供給契約には、「容量変更できる」「解約できる」など、将来の需要量変動に応じた契約のリスク回避性があり、需要家は需要量変動起因するリスクを回避することができる。これにより、電力供給サービス選択においても、一般事業での投資判断と同様に、需要家はリスク回避の有無およびその大小を重要な判断基準とする必要があるが、従来の経済性試算方法では評価されていない[33][34]。

本章では、電力需要家が電力供給サービスを選択する際に、まずリスクモデルを定義し、電力需要家がリスクを回避するオプションモデルを定義することで、契約のリスク回避性を考慮した経済性の評価手法を提案する。特に、系統電源が提供する供給契約のリスク回避性に焦点を絞り、その契約変更のリスク回避性により需要家が享受する効果の評価を行えるようにする。2.2 節では、従来の経済性分析手法として、平均需要量により経済性を分析する手法を説明し課題を述べる。2.3 節では、その課題にて対してリスク回避性に基づいて経済性を分析する手法を提案し、リスクモデルおよびオプションモデルを提案する。2.4 節では、提案手法による評価例を示し、評価対象と契約変更オプションによる評価例と乗り換えオプションによる評価例について説明する。

2.2　従来の経済性分析手法

2.2.1　電力サービス概要

電力サービスには大きく系統電源サービスと分散電源サービスの２つが存在する。系統電源サービスとは、図 2.1 に示すように大きな発電所を建設し、発電所で一括して発電した電力を、多数の需要家に電力供給するサービスである。一括して発電を行うため発電効率がよくなる一方で、地域に広がった複数の需要家に電力を届ける必要があるため、変電・送電・配電といった電力を送る送電網ネットワーク（電力系統）を保有する必要がある[35]。一方で需要家の側に発電設備を置いて電力を共有するサービスが分散電源サービスである。

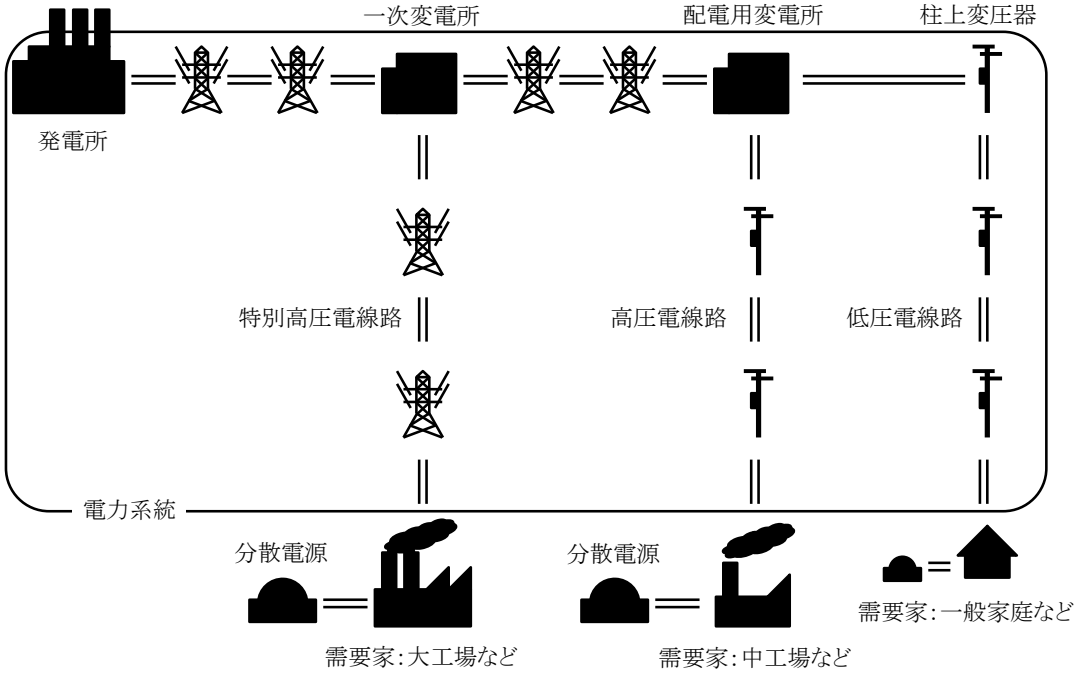

図 2.1　電力供給の仕組み

需要家個別に発電機（分散電源）を設置する必要があるため発電効率は良くないが、変電・送電･配電といった電力を送り届ける設備を最小限に留めることができる。分散電源には、ディージェルエンジン、ガスエンジン、ガスタービン、マイクロガスタービンといった燃料を利用して発電を行う発電機に加えて、近年では太陽光や風力といった自然エネルギーを利用して発電を行う発電機が普及し始めている。

日本では 10 の電力会社がそれぞれ電力系統を保有し系統電源サービスを提供しており日本の商用電力のほとんどはこの巨大な電力系統を通して提供されている。一方で、電気事業法の改正に伴い電力の小売り分野の部分自由化が進められたこと、ならびに、小規模発電の技術革新や石油・石炭・ガスなど燃料価格の低水準化による自家発やコジェネレーションといった分散電源の発電効率が向上したことにより、近年では分散電源サービスが徐々に拡大してきている。

2.2.2　平均需要量による経済性分析

従来の電力サービスの経済性分析手法[32][36]では、図 2.2 左の「電力単価の観点」に示すように、需要家の平均電力需要量が一定期間継続することを前提に、それと同等の電力設備の購入コストや運用コストを入力としてキャッシュフローを算出し、他サービスのキャッシュフローと比較することで経済性を分析する。将来のエネルギー需要量の不確実

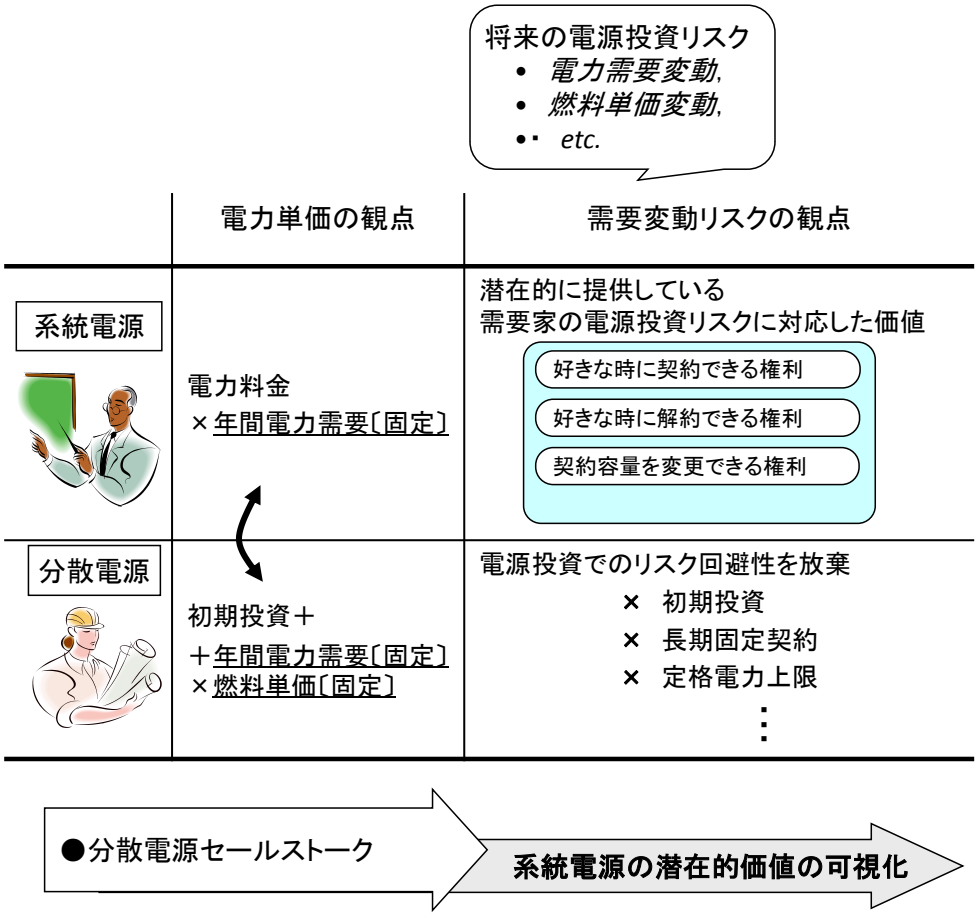

図 2.2　系統電源と分散電源での従来の経済性評価と新たな経済性評価

性は考慮されていない。例えば「分散型電源用高効率マイクロガスタービン発電システムに関する調査報告書」[32]では、月別の平均電力需要量からマイクロガスタービンの発電量を想定し、マイクロガスタービン導入前の系統電源利用単価と導入後のエネルギー単価と比較することで、マイクロガスタービンの経済性が試算されている。図 2.2 左の「電力単価の観点」に示すように、系統電源の場合には電力料金（固定値）×年間電力需要（固定値）が算出され、分散電源の場合には初期投資＋年間電力需要（固定値）×燃料単価（固定値）が算出される。従来の方法では、この 2 つの算出式から算出された電力単価が大きいか小さいかにより 2 つのサービスを比較することになる。しかし、サービス利用者が電源に投資をすることを考えると、将来において電力需要量が変動する、燃料単価が変動するというリスクが考えられる。図 2.2 右の「需要変動リスクの観点」に示すように、電源購入の場合、長期固定契約のため、需要量が減少しても初期投資は減額できない。期間中

の支払い額は減額されない。安価な電源に乗り換えることができない。一方で、系統電源の場合、「好きな時に契約できる」「好きな時に解約できる」「契約容量を変更できる」ことから、需要量が減少したら、別の契約に変更することで減額できる。契約容量を下げて安価な契約に乗り換えることができる。

2.2.3 キャッシュフローモデル

表 2.1 に系統電源と分散電源とのキャッシュフローの項目を示す。図 2.3 は現時点で需要家が系統電源を継続した場合のキャッシュフローモデルを示している。、キャッシュアウトは電力利用に伴い支払う系統電源費を考え、キャッシュインはない。系統電源費は、一般的な基本料金と従量料金とからなる料金メニューである[38]。ここで、該当年度の基本料金は一般的に、前年の 1 年間の最大電力に基づいて決定されることから、基本料金(k)=最大電力($k-1$)×電力基本料金単価としてモデル化を行った。また従量料金は一般的に、該当年度の電力使用量に比例して算出されることから、従量料金(k)=電力使用量(k)×電力従量料金単価としてモデル化を行った。ここで k は年度を示す。一方で、図 2.4 はマイクロガスタービン等の分散電源を導入した場合のキャッシュフローモデルを示している。キャッシュアウトは燃料費、メンテナンス費、リース費および電力不足時の系統電源からの補給電力費を考え、キャッシュインは蒸気利用による熱回収利益である。

表 2.1　キャッシュフロー項目

プレイヤ	キャッシュ種類	キャッシュ項目
系統電源	キャッシュアウト	基本料金
		従量料金
分散電源	キャッシュアウト	燃料費
		メンテナンス費
		リース費
		補給電力費
	キャッシュイン	熱回収利益

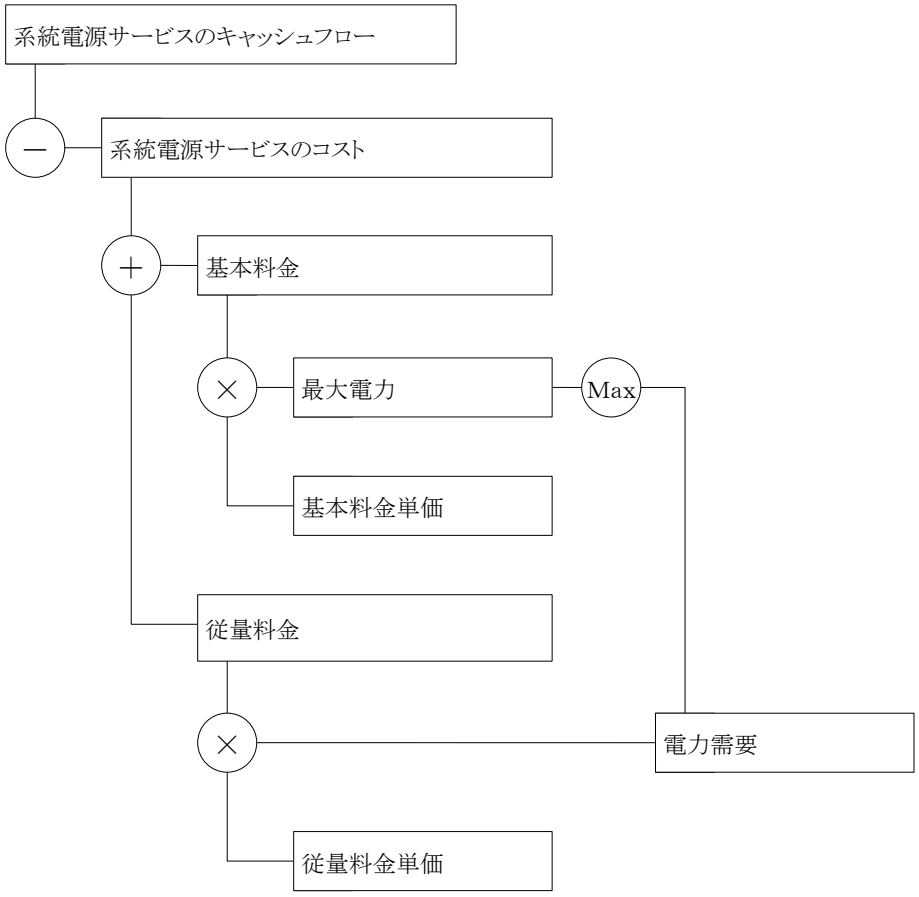

図 2.3　系統電源のキャッシュフローモデル

両モデルの「電力需要」に、評価対象となる需要家の年間の平均電力需要量を入力することで系統電源または分散電源を利用した場合の平均キャッシュフローが算出される。さらに、両モデルで算出される平均キャッシュフローを平均電力需要量で割ることで系統電源および分散電源の各電力単価が算出される。

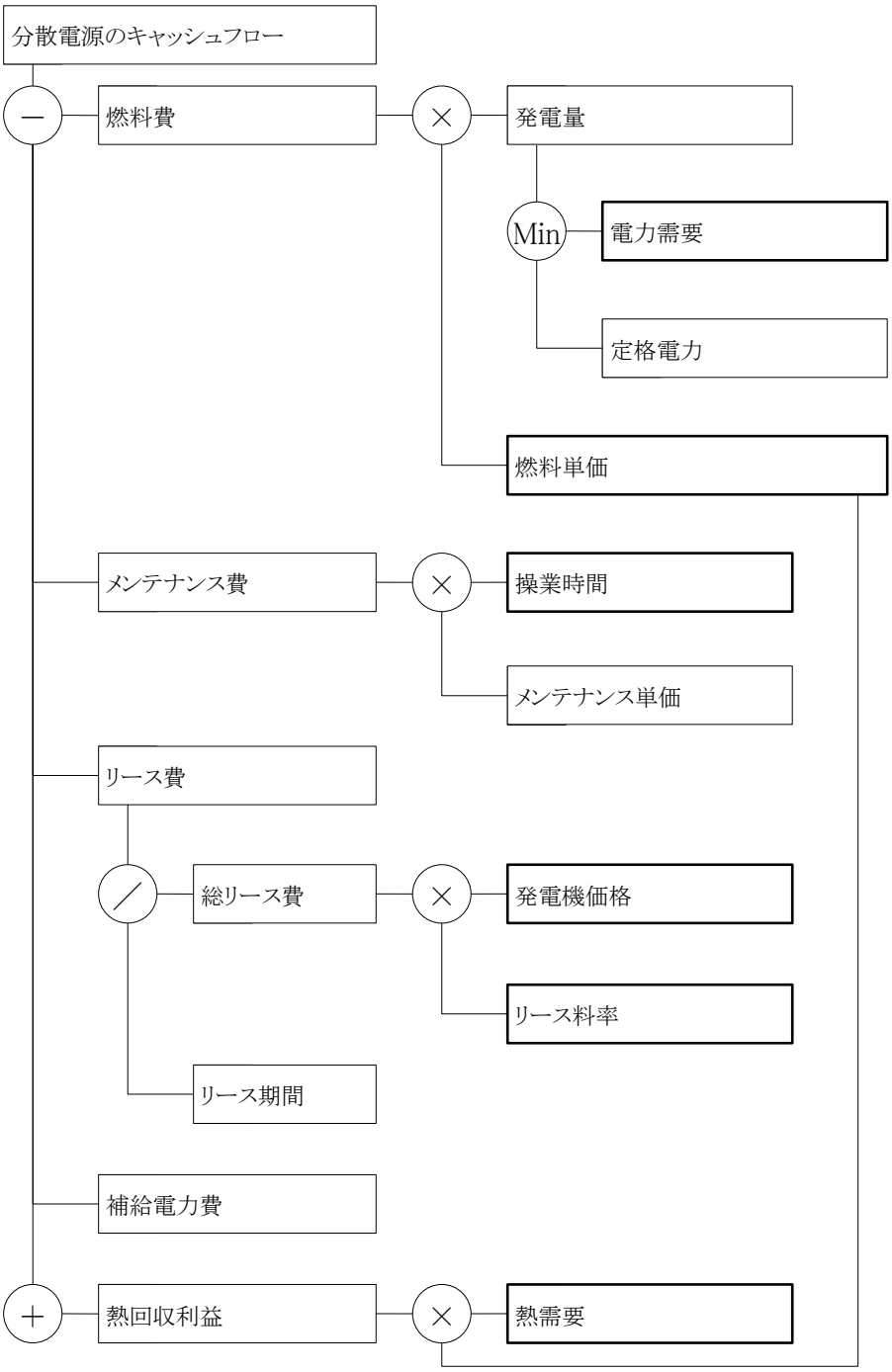

図 2.4　分散電源のキャッシュフローモデル

2.2.4 従来の問題点

まず、将来のエネルギー需要量は需要家の経済環境や事業環境により変動するリスクを有している。このリスクを考慮しないと平均単価が安いからといって適切なサービス選択とはならない。例えば、図 2.5 に示すように、平均電力需要量 6Mkwh/年で 7 年間運用す

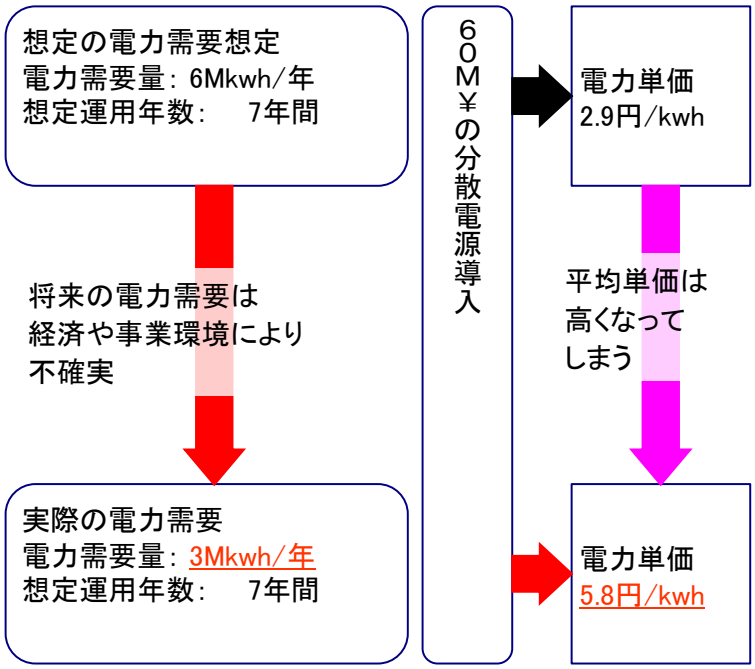

図 2.5　従来の問題点

ることを前提に 60M¥の分散電源を購入する場合、電力単価は 2.9¥/kwh となる。もし系統電源など比較する他サービスの電力単価がこの 2.9¥/kwh より高ければ、従来はこの電源が選択されていた。しかし、電源導入後に実際の電力需要量が平均の半分 3Mkwh /年になった場合を考えると、電力単価は 5.8¥/kwh と、導入判断の前提としていた 2.9¥/kwh を大幅に上回り高くなってしまう。さらに、2.2.2 節に記述したように、分散電源の場合、電力需要量が減少しても初期投資や期間中の支払いを減額できないため電力単価が高くなってしまうが、系統電源の場合、別の契約に変更することで電力単価を減額することができ、電力単価が高騰するリスクを回避することができる。単純な平均単価の比較ではなく、リスクの有無およびリスク回避性の有無を議論することが必要である。

2.3　リスク回避性に基づく経済性分析手法

2.3.1　分析アプローチ

本章では、図 2.6 に示すように、平均単価を比較するキャッシュフローモデルに加え、第 1 に、図 2.3 と図 2.4 において将来変動する電力需要量などをリスク変数とし、そのリスクモデルを定義する。

このリスクモデルを用いてキャッシュフロー分布を算出し、リスク幅を示すキャッシュ

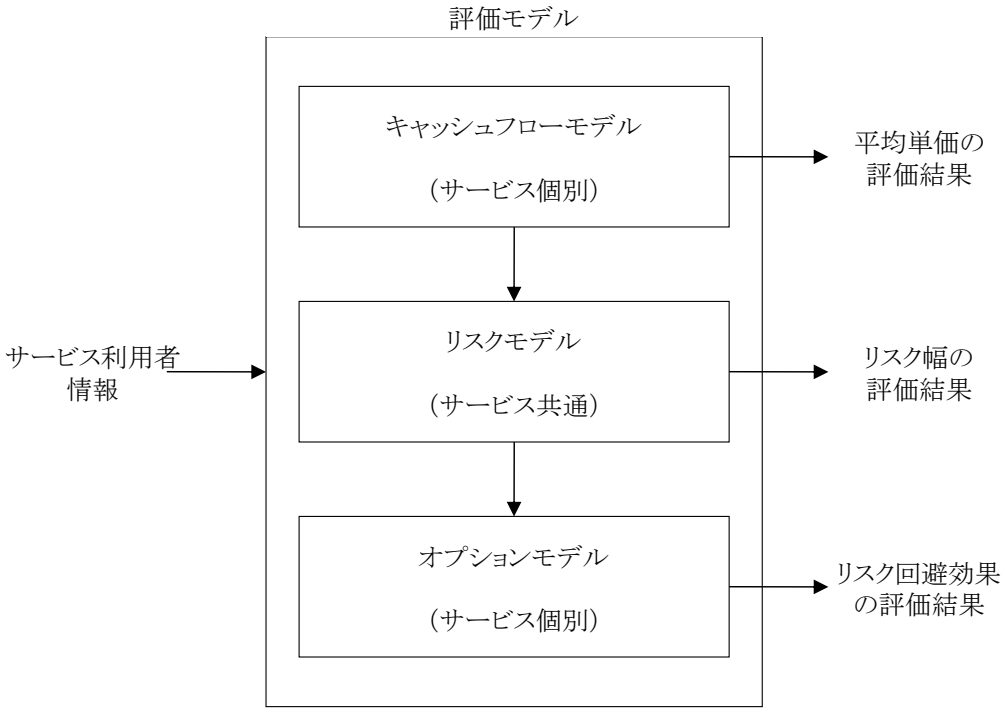

図 2.6　リスク回避性に基づく評価手法

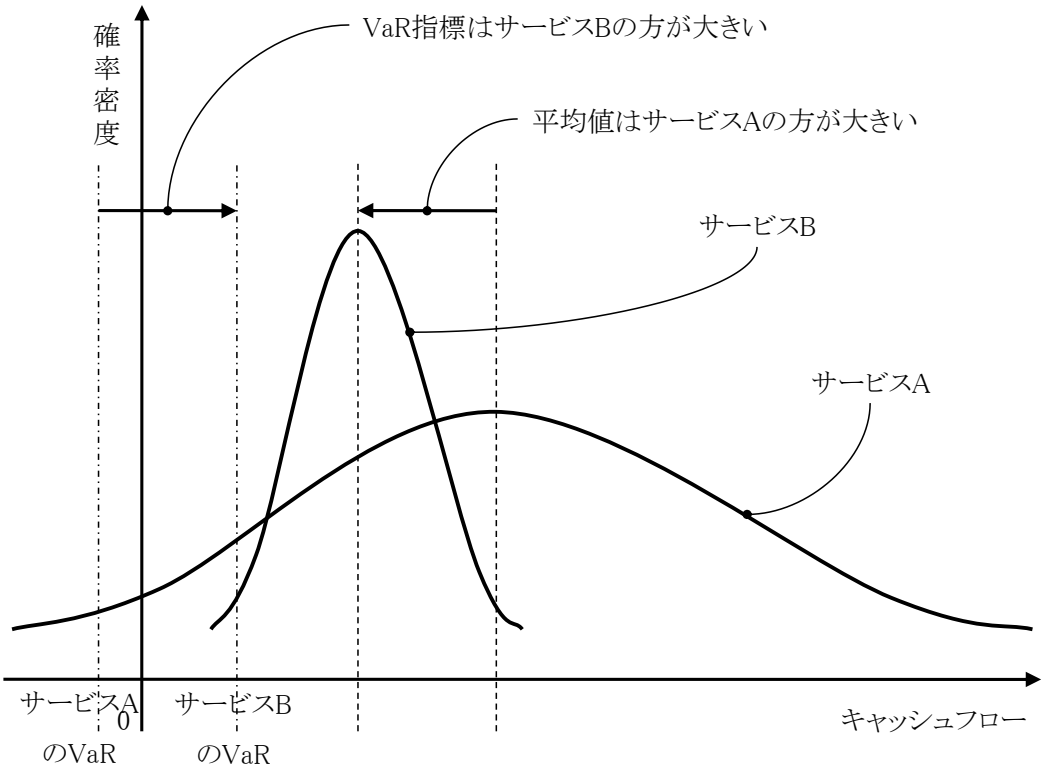

図 2.7　リスク幅を考慮した評価例

フロー分布特性値として主に使用される VaR（Value at Risk）を算出する。VaR とは、一定期間に一定確率で発生する最大損失想定額である。平均値が同じ分布でもリスク幅が広い分布の方が VaR 値は小さくなる。つまり損失額が大きくなる可能性が高いことを示せる。ここで VaR 値として 90 パーセンタイル値を用いると、90%の確率で発生する最も低いキャッシュフローが示される。図 2.7 に示すように、キャッシュフローモデルから算出される平均単価（点線）が電力サービス A の方が安い場合にも、VaR 値（一点破線）で考えると、電力サービスＢの方が有利である場合もあり、例えば最大損失想定額を抑えたい需要家であればサービス A ではなくサービス B を選択すべきだと示せる。

第 2 には、電力サービスにおいて付与される需要などの変化に応じたオプション（選択権）を、オプションモデルとして定義する。このオプションモデルにより、各サービスが提供するリスク回避の効果を示せる。さらに、このオプションモデルが、金融商品である株式オプションと似た形式で記述できることから、株式オプションのプライシング手法を参考に、機器提供サービスのリスク回避を考慮した分析手法を提案する。

例えば、分散電源を購入した場合には、装置の「定格出力」により最大電力が固定され、エネルギー需要量が低下しても、系統電源で基本料金にあたる部分のキャッシュアウトは

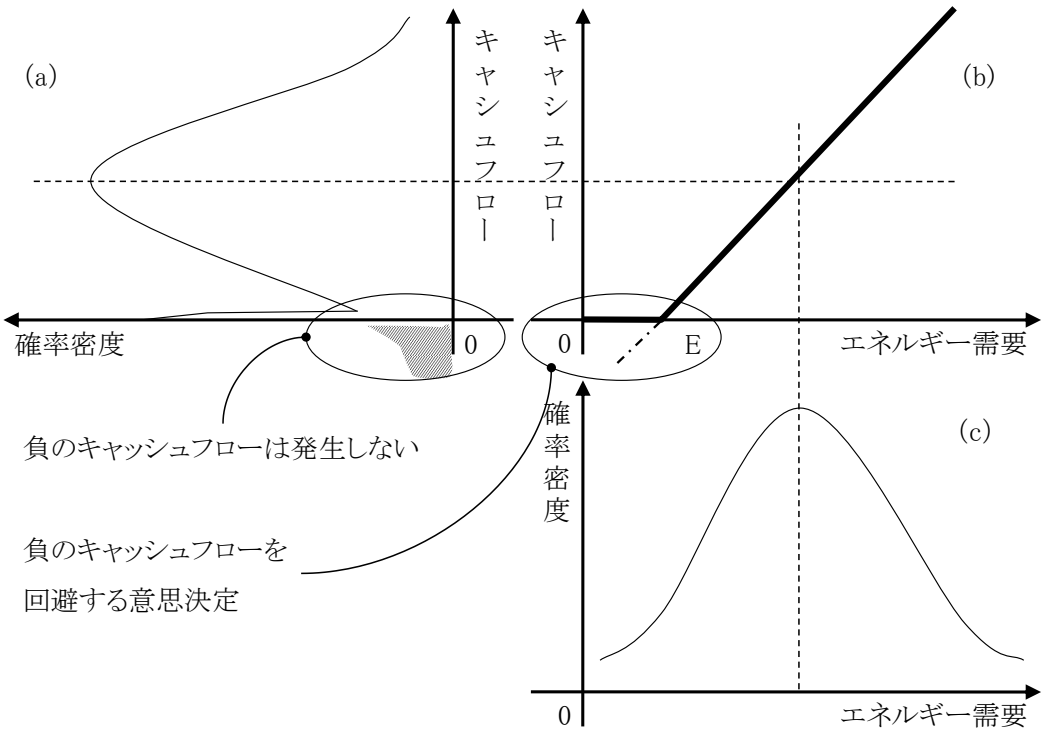

図 2.8　リスク回避を考慮した分析手法

削減されない。一方で系統電源の供給契約には、「容量変更できる」「解約できる」などの選択権が付与されており、エネルギー需要量の低下に応じてキャッシュアウトを削減するオプション特性がある。

このオプション特性は図 2.8(b)太線に示すように、エネルギー需要量変動の損益分岐点 E を境に、E 値以下では負のキャッシュフローが発生しないオプションモデルとして定義される。図 2.8(c)に示すような確率事象としてエネルギー需要量を与えることで、図 2.8(a)のキャッシュフロー分布を算出する。さらに、図 2.8(b)一点破線に示すオプション特性のないモデルから算出するキャッシュフロー分布と比較することで、図 2.8(a)斜線で示されるネガティブなキャッシュフローを回避する効果を示すことができる。

2.3.2 リスクモデル

本節では、図 2.3 と図 2.4 に示したキャッシュフローにおいて、将来変動する電力需要量(k, j)、熱需要量(k, j)、燃料単価(k)、電源価格(k)、操業時間(k)と金利(k)とをリスク変数とし、各変数がトレンド量μ_iとボラティリティσ_iでブラウン運動する一般化したウィーナー過程 $X_{i\,d}(k)=\mu_i X_i \Delta k+\sigma_i X_i \Delta z$ であると仮定し、キャッシュフロー分布特性を算出する[39]。ここでΔzは標準ウィーナー過程の増分（平均０、分散Δk）を表している。kは年度、jは日数、iはリスク変数の番号を示す。電力需要量(k, j)、熱需要量(k, j)は日毎に変動するウィーナー過程とした。

2.3.3 オプションモデル

本節では、電力供給サービス選択における意思決定で、需要家が享受するリスク回避の効果を評価するにあたり、

(1) 電力需要量変化に応じて契約変更できるオプション
(2) 他サービスのコスト変化に応じて他サービスに乗り換えられるオプション

の２つのオプションモデルを定義する。この２つを選択した理由は、「平成 11 年度　分散電源用高効率マイクロタービン発電システムに関する調査報告書」[32]の“市場ニーズ調査の調査フロー”において、分散電源の導入可能性判断基準とする『投資回収年数』の導出主要素として、「契約電力（総発電量）」と「分散電源のコスト(設備費用、燃料消費、保守費用)」が挙げられており、これら主要素の変化に対応した契約変更のリスク回避性にあたる。

(1) 電力需要変動に応じて契約変更できるオプション

電力需要家の各年度の最大電力(k)は各年度の操業度合いによって変化するが、一度分散電源を導入した場合には、分散電源装置の定格電力が固定されてしまうため、将来の最大電力(k)が減少した場合にも最大電力(k)の大きさに関係なくリース費用(k)=一定が発生する。これに対して系統電源を継続利用した場合には、最大電力(k)が減少しても、需要家は契約電力（≒最大電力）を更新することにより、各年度の最大電力(k)に応じた基本料(k)だけを支払うことになる。つまり、将来の最大電力変動量(k)に応じて、需給契約を柔軟に変更する意思決定により、図 2.9 の塗り潰しで示される、

$$\text{基本料金の低減額分}(k) = \text{基本料金}(k-1) - \text{基本料金}(k) \tag{2.1}$$

だけ得すると考えられる。また系統電源の需給契約は一般に 1 年更新のため、本オプションは 1 年毎に意思決定タイミングのくるヨーロピアンオプション[40][41]として定義する。オプションは権利行使のできるタイミングに着目して 3 つのタイプに分類される。1 つ目は取引日から権利行使の最終日までいつでも権利行使が可能なオプションであり、アメリカンオプションと呼ばれる。2 つ目は権利行使日のみに権利行使が可能なオプションであり、ヨーロピアンオプションと呼ばれる。3 つ目はあらかじめ複数の権利行使日が設定されており、そのうちの何れかの日において権利行使が可能なオプションであり、バミューダ諸島がヨーロッパとアメリカの中間に位置することから、バミューダンオプションと呼ばれる。本研究の「電力需要変動に応じて契約変更できるオプション」は 1 年後の需給契

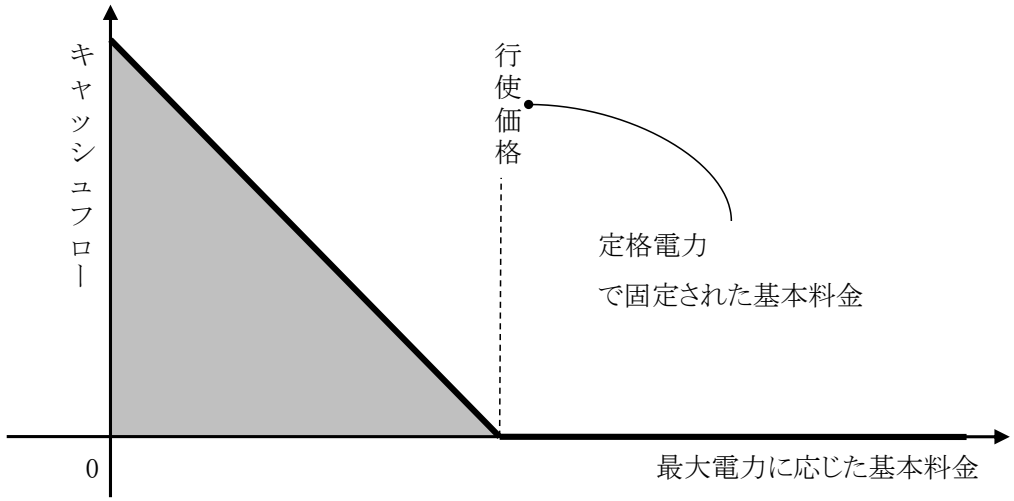

図 2.9　契約変更できるオプションモデル

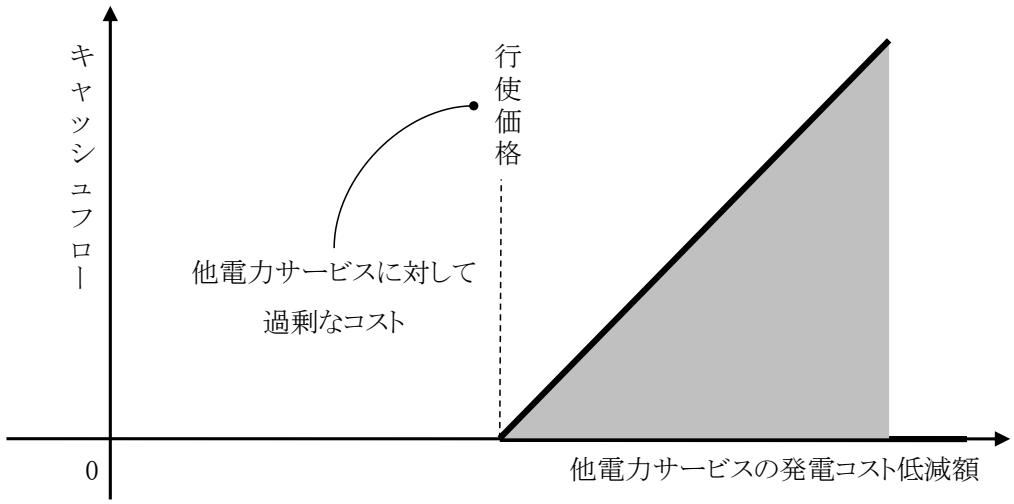

図 2.10　他サービスに切り替えられるオプションモデル

約更新日のみに権利行使可能なヨーロピアンオプション（あるいは毎年くる需給契約更新日のみに権利行使可能なバニューダンオプション）としてモデル化した。

(2) コスト変化に応じて乗り換えられるオプション

需要家はいつでも解約できるという契約変更のリスク回避性により、他サービスの発電コストが現時刻よりも将来時刻で安くなってから乗り換えることができる。つまり、図 2.10 に示すように、他電力サービスの発電コスト(k)の減少に応じて、

$$\text{発電コストの低減額分}(k) = \text{発電コスト}(k-1) - \text{発電コスト}(k) \tag{2.2}$$

だけ得すると考えられる。また他電力サービスの発電コストは日々変化する動特性はないと考え、(1) のオプションと同様にヨーロピアンオプションとしてモデル化する。

発電コストが増加した場合には損をする可能性を秘めているのではないかと考えられるが、そもそも分散電源の発電コストが増加しており、その状況で系統電源から分散電源に切り替える意思決定は考えられない。

2.4　提案手法による評価例

2.4.1　評価対象

ここでは経済性分析を行うため、表 2.2 に示すように、評価対象は高圧電力需要家とし、平均的な高圧電力需要家の電力需要量と、それから想定される定格出力の分散電源装置（1 台導入を想定）と、その装置の平均的な発電機価格、メンテナンス単価、リース期間、金

利、操業時間を設定した。電力料金としては高圧電力契約を想定し、基本料金と従量料金は表 2.2 に示す料金、契約更新は 1 年おきと想定した。さらに、ここでは熱需要が多い化学系の電力需要者を想定し、「産業間連携による省エネルギーについて」[37]にあるように熱電需要比率(R 値=電力需要/熱需要)=0.5 とし、電力需要量=6Mkwh/年から熱需要量=43.2TJ/年を設定した。

2.4.2 契約変更オプションの評価例

2.3.3 節でモデル化した契約変更オプションを用い、契約変更によるリスク回避の経済性分析の有効性を示す。電力需要量のボラティリティ σ_1は、経済産業省関東経済産業局[42]の平成 15 年から平成 18 年までの産業用大口需要電力量から表 2.3 に示すように業種別のボラティリティを推定した。Jarque-Bera 検定により正規分布の確からしさを検定し、鉄鋼（8.2）を除くと、Jarque-Bera の値は 0.28 から 3.4 の値をとり、正規分布の範囲 95%内に入る JB 値 6 以下となった。ここでは化学系の電力需要家を想定し、ボラティリティ σ_1を年率 20.3%、日率 1.06%とした。

図 2.11 に、7 年間累積コストの分布を、系統電源で各年度のリスクを考慮して最大電力を契約変更するケースを実線で、分散電源のケースを点線で、系統電源においてリスクを考慮しないケースを破線で示す。コスト分布は 5000 回のモンテカルロシミュレーションを実施し導出した。リスクを考慮して最大電力を契約変更することにより、系統電源の 7 年間累積コ

表 2.2　評価対象の条件

	平均	ボラティリティ
電力需要量	6,000,000kwh/ year	20.3%/year
定格電力	4,000kw	－
発電機価格	60M￥	13.6%/year
メンテナンス単価	9,600￥/kwh	－
リース期間	7 years	－
金利	2.0%	－
操業時間	3000hour/year	10.0%/year
熱需要量	43.2TJ/year	20.3%/year
電力基本料金	1190.0￥/kw	－
電力従量料金	9.7￥/kwh	－

表 2.3　業種別の電力需要量のボラティリティ

業種	日率	年率
食品	1.09%	20.78%
製紙	0.97%	20.33%
化学	1.06%	20.33%
石油	2.77%	52.91%
鉄鋼	0.77%	14.80%
機械	1.37%	26.11%

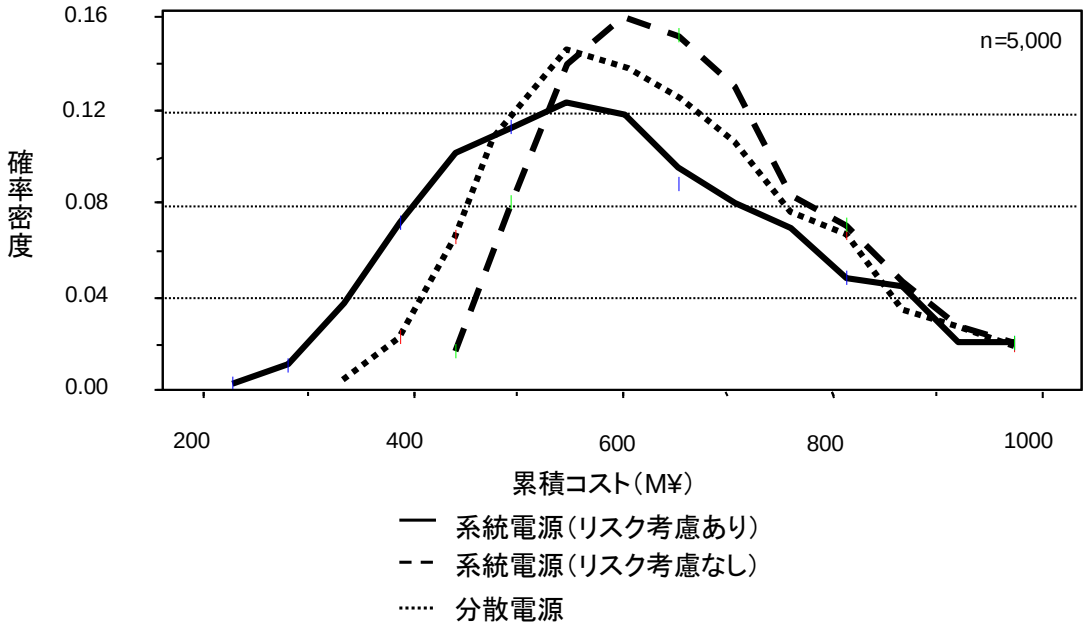

図 2.11　累積コスト分布の比較

ストの分布が低い方に推移しており、リスク回避の効果があることが示されている。

表 2.4 に各ケースの平均値と VaR 値（90 パーセンタイル値）を示す。VaR 値とは最大損失想定額である。系統電源（考慮なし）のケースでは 7 年間累積コストの平均値が分散電源のケースより高いため、分散電源の方が経済性が高いと判断してしまう。しかし実は、系統電源（考慮あり）のケースでは平均値と VaR 値の両方で分散電源のケースより低く、系統電源の経済性の方が高い。

表 2.4 では、系統電源（考慮なし）と系統電源（考慮あり）のケース間での差額も示している。契約変更によるリスク回避の効果は金額ベースで平均値では－65.3M￥、VaR 値

表 2.4　各ケース毎の平均値と VaR 値の比較

ケース	平均	VaR
分散電源	666.6 M￥	901.7 M￥
系統電源(リスク考慮なし)	691.0 M￥	900.8 M￥
系統電源(リスク考慮あり)	625.7 M￥	885.5 M￥
差額	－65.3 M￥	－15.3 M￥

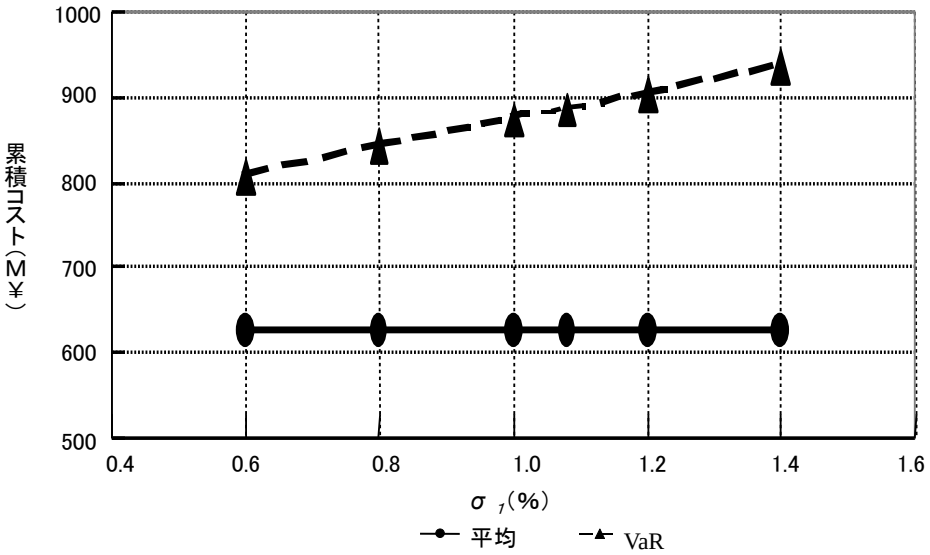

図 2.12　ボラティリティ σ_1の影響

では－15.3M￥である。

さらに図 2.12 には、ボラティリティ σ_1の変化に対する、系統電源（考慮あり）ケースでの、累積コストの平均値と VaR 値の影響を示す。平均値に変化はなく VaR 値のみ影響を受けている。また、ボラティリティが大きくなるに従い累積コストの VaR 値は高くなっており、リスク回避の効果が低くなっている。一般的にリスク回避の効果はボラティリティの大きさに比例するが、図 2.12 に示した結果では逆に反比例している。これは最大電力が電力需要の年間最大値をとることが要因であり、電力需要のボラティリティ σ_1が大きい方が、各年度の最大電力の値が大きくなり易いためである。ここではボラティリティ σ_1の 0.1%増加に対して平均でリスク回避効果が 15.8M￥低減している。

2.4.3 乗り換えオプションの評価例

2.3.3 節でモデル化した契約解約により他サービスに乗り換えるオプションを用い、契約解約によるリスク回避の経済性分析の有効性を示す。ここでは、他電力サービスの発電コストとして「エネルギー白書 2004」[43]の太陽光発電システム価格推移に基づき、1 年毎のトレンド量μ_2を－10.8%、ボラティリティσ_2を 13.6%とした。ここでトレンド量μ_2が－10.8%とは、1 年毎に発電コストが 10.8%ずつ安くなることを意味している。

まず、各年度で系統電源から分散電源に切り替えた場合の、7 年間累積コストの平均値

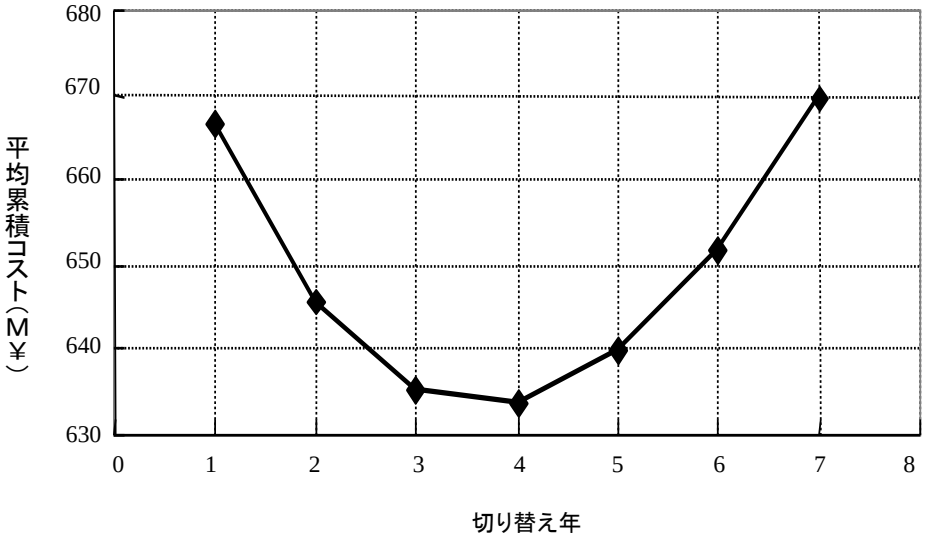

図 2.13　切り替え年による効果比較

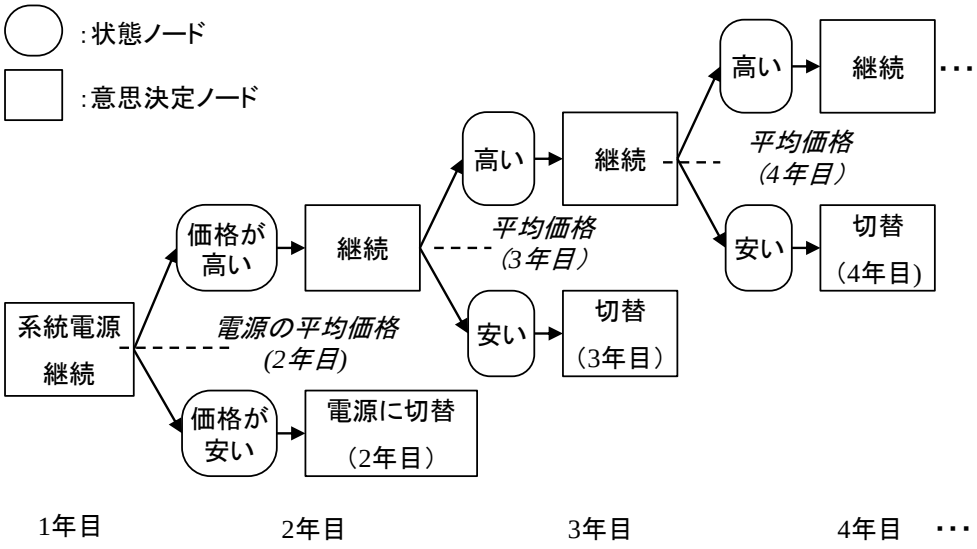

図 2.14　意思決定ロジック

グラフを図 2.13 に示す。図 2.13 からは、4 年目に切り替えると経済性が高いと判断してしまう。しかしここで、図 2.14 に示すように、分散電源の発電コストについて、実現したコストと期待される平均コストとを毎年比較し、平均コストよりも実現コストが大きい(悪い状況)か小さい(良い状況)かを判定し、小さい(良い状況の)場合にのみ分散電源に切り替えるという意思決定ロジックを導入する。

図 2.15 に、7 年間累積コストの分布を、意思決定ロジックを導入したケースを実線で、分散電源のケースを点線で、4 年目に分散電源に切り替えたケースを破線で示す。4 年目に分散電源に切り替えたケースよりも、意思決定ロジックを導入したケースの分布が低い方に推移しており、意思決定ロジックを導入したケースの方が累積コストを低く抑えられる可能性がある。状況に応じて意思決定し他サービスへの切り替えを延期することに効果があることが示されている。

図 2.16 は意思決定ロジックにより切り替えを延期した結果の、各年度での切り替え確率を示している。図 2.16 にあるように、状況が悪い場合には 7 年目を過ぎても切り替えを行わない場合がある。

表 2.5 に各ケース毎の平均値と VaR 値を示す。意思決定ロジックを導入するケースでは平均値と VaR 値の両方で他ケースよりも低く、経済性が高い。また、分散電源のケースとの差額から、契約解約によるリスク回避の効果が金額ベースで、平均値では－36.0M￥、VaR 値では－36.6M ￥であることを示せている。

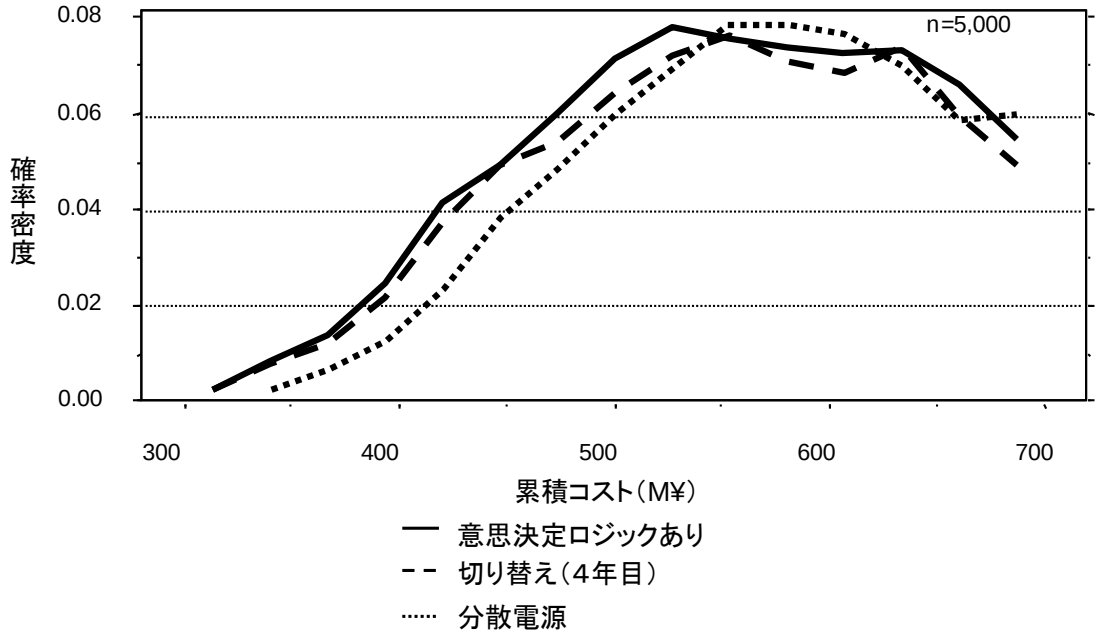

図 2.15　累積コスト分布の比較

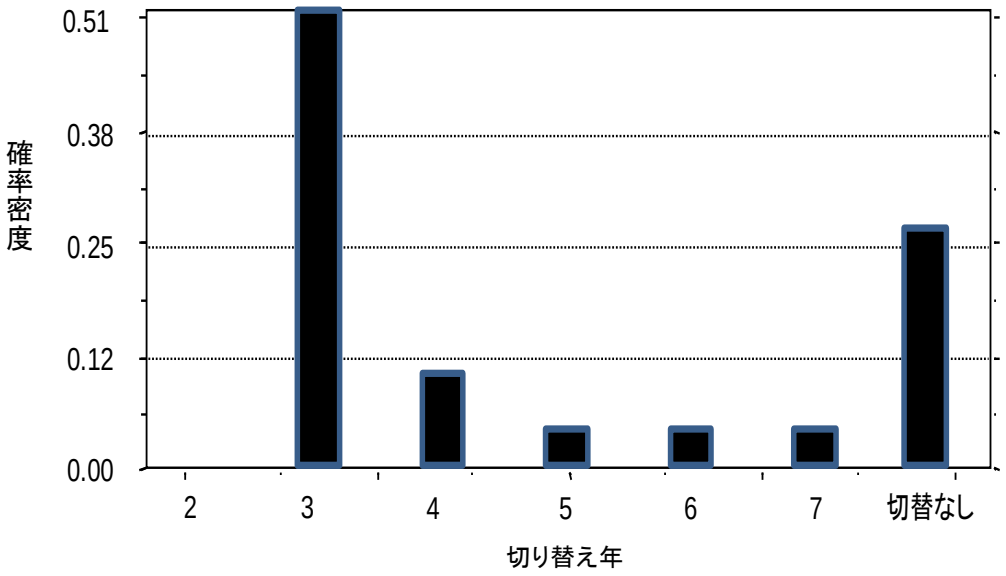

図 2.16　切り替え年度分布

表 2.5　各ケース毎の平均値と VaR 値の比較

ケース	平均	VaR
分散電源	666.6 M¥	901.7 M¥
切り替え(４年目)	635.3M¥	863.2 M¥
意思決定ロジック	630.6 M¥	865.1 M¥
差額	－36.0 M¥	－36.6 M¥

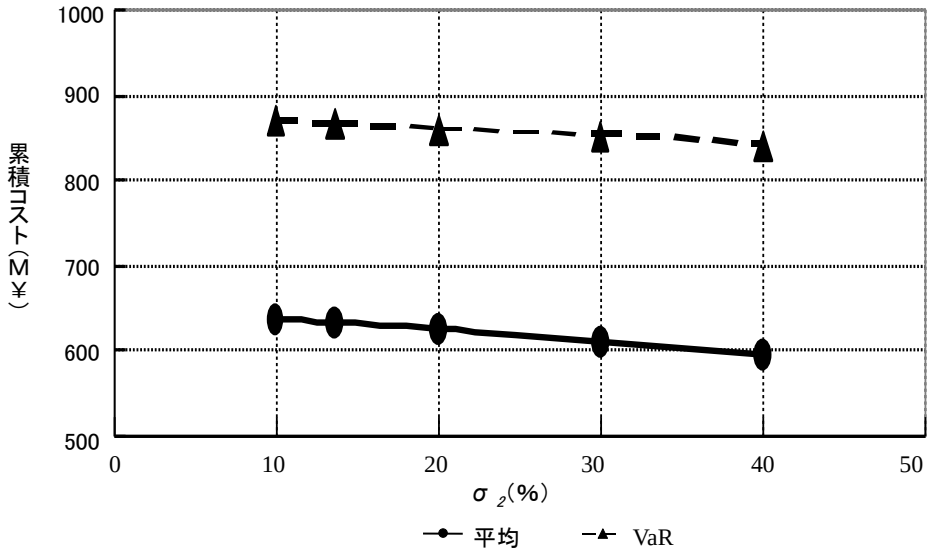

図 2.17　ボラティリティ σ_2の影響

さらに図 2.17 に、ボラティリティ σ_2の変化に対する、意思決定ロジックを導入したケースでの累積コストの平均値と VaR 値の影響を示す。平均値および、VaR 値の両方で、ボラティリティが大きくなるに従い累積コストは低くなり、リスク回避の効果が高くなっている。ボラティリティ σ_2の 10%増加に対してリスク回避効果は、平均値に関しては 14.1M￥、VaR 値に関しては 9.5M¥増加である。他サービスの発電コストのボラティリティが大きいと予想される場合、各年度で発電コストを見ながら切り替えを判断することは、累積コストの分布幅を縮めるだけでなく、全体的に分布を低い方に推移させることができ、大きな効果を期待できることを示している。

2.4.4 震災の影響評価例

さらにここで、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災を考え、本研究におけるその影響を評価する。東日本大震災では東北地方の原子力発電所がその操業を停止し、原子力発電に代わる火力発電の稼働により火力燃料費が大幅に増加し、2013 年 9 月より 9～15%の電力料金値上げを余儀なくされている。

2.4.2 節の「契約変更オプションの評価例」では、分散電源に対し系統電源(リスク考慮あり)は累積コストで 16.2 M￥のアドバンテージを持っているという結果に達した。ここで、系統電源のみ値上げが実施された場合の評価を、図 2.18 と表 2.6 に示す。

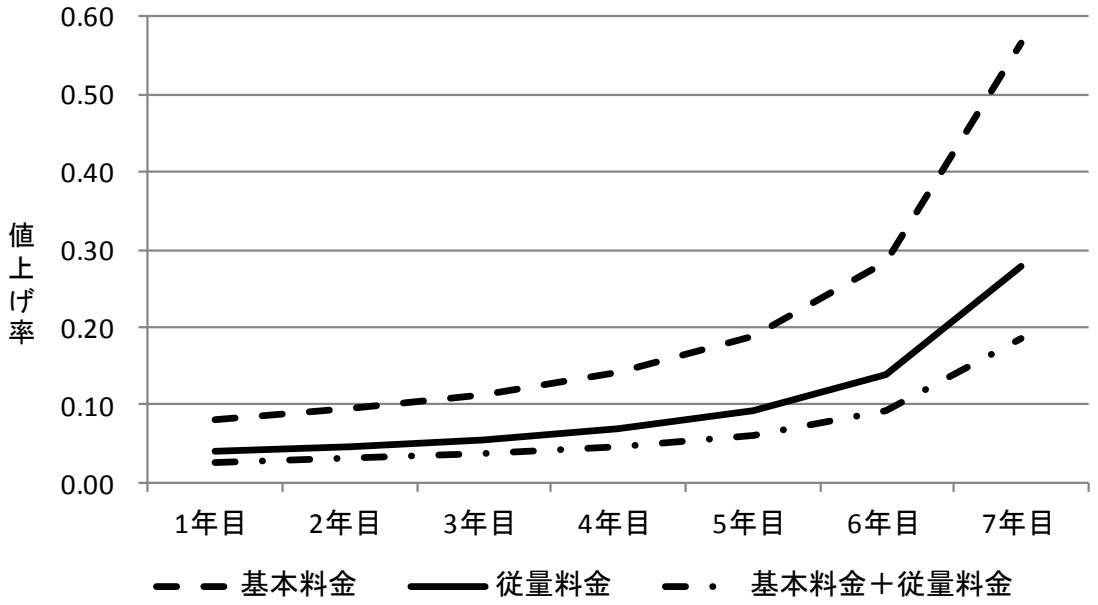

図 2.18　系統電源の限界値上げ率

表 2.6　年度別、料金別の限界値上げ率

	1 年目	2 年目	3 年目	4 年目	5 年目	6 年目	7 年目
基本料金のみ	8.1%	9.5%	11.3%	14.2%	18.9%	28.3%	56.7%
従量料金のみ	4.0%	4.6%	5.6%	7.0%	9.3%	13.9%	27.8%
基本＋従量	2.7%	3.1%	3.7%	4.7%	6.2%	9.3%	18.7%

図 2.18 は、横軸に何年目以降に値上げが実施されるか、縦軸に系統電源(リスク考慮あり)のアドバンテージ 16.2 M¥がなくなる限界の値上げ率を示している。点線は基本料金のみを値上げした場合、実線は従量料金のみを値上げした場合、一点破線は基本料金と従量料金を値上げした場合を示している。殆どのケースで 2013 年 9 月に実施された 9～15%の値上げを下回っており、今回の値上げにて、この累積期間での系統電源(リスク考慮あり)のアドバンテージが全て失われたと考えることができる。

一方で、2.4.3 節「乗り換えオプションの評価例」に示した分散電源への乗り換えオプションは全ての利用者が保有しており、系統電源(リスク考慮あり)のアドバンテージが失われている状況から、今後は分散電源への乗り換えが加速すると考えることができる。

2.5　まとめ

本章では、将来変動する電力需要量などをリスク変数としリスクモデルを定義し、各電力サービスが提供している電力需要量などの変化に応じた選択権をオプションモデルとして定義することで、平均額だけではなく最大損失想定額の観点から、各サービスが提供するリスク回避の効果を評価する手法を提案した。そして、系統電源の需給契約において契約変更および解約によりリスク回避効果があると考え、その効果を加味して需要家が電力サービスを選択するための評価法を提案した。本手法により、機器提供サービスにおいて、経済環境や事業環境により、機器価格の変動や導入効果の変動という、従来は充分に対応できなかった操業リスクを考慮したうえでサービス選択の意思決定が可能となる。本章では、仮説に基づくリスク回避の効果モデルを提案したが、電力事業会社の営業担当者と議論し、実際の高圧電力需要家を対象として、平均的な高圧電力需要家の電力需要量と、その需要量から選定される定格出力の分散電源装置と、その装置の平均的な発電機価格、メンテナンス単価、リース期間、金利、操業時間、熱需要量の数値を設定することで、現実の需要家に即した評価を行い、提案手法が有効であることを示した。

電力自由化における電力会社の脅威としては、本研究で題材として取り上げた分散電源の他に、従来の地域性を越えた他電力会社との競争激化という課題が残されている。他電

力会社との競争においても、本研究で示した手法をどのように適用していくかが課題である。

また本研究では、データを全てサービス利用者が単独で入力できることを前提として構築した。しかし実際の評価には、サービス提供者固有のデータが必要となる。評価を行うためには、サービス提供者とサービス利用者とが、互いに不利益とならないようにデータを開示して評価を行う方法が必要である。

また、オプション行使が追いつけない程に電力需要量などのリスクが急激に変動する場合、オプション行使による効果がなくなるか、さらには逆向きに制御を行ってしまい業績悪化に繋がる可能性がある。今回はそのような急激なリスク変化に関する評価を行っていない。今後の課題である。

また本研究では、将来変動するリスク変数として電力需要量、熱需要量、燃料単価、発電機価格、操業時間、金利を独立として扱った。電力需要量と燃料単価など本来は相関を持って変動するが、この相関に関しては今回は評価を行っていない。今後の課題である。

第3章

リスク結合を考慮した導入先選定方法

3.1　緒言

機器提供サービスにおいて、機器の導入先を選定することは、サービス利用者とサービス提供者とで導入効果変動リスクを分担する観点から重要である。また導入先選定には、サービス利用者の意見を反映する必要があり、交渉のなかで迅速に導入先を選定し直せる方法が必要である。

本章では、まず利用効果変動リスクを考慮しない従来の導入先選定方式の課題について説明し、利用効果リスクを考慮した導入先選定問題を定式化し、分枝限定法を用いて高速に導入先を選定する方式を説明する。また省エネルギー機器提供サービスを題材として、提案方式による導入効果変動リスクの改善効果と探索時間の改善効果を確認する。

近年の経営環境では収益の不確実性が増加しているため、サービス利用者は投資回収にリスクが見込まれる機器への投資を敬遠している。そこで、サービス提供者がサービス利用者に代わって機器を保有し、利用効果に応じた料金を受け取る機器提供サービスが増加している[44][45][47]。

例えば、サービス提供者が高圧インバータを無償で提供し、サービス利用者の工場内で操業しているモータにインバータを接続し、発生した省エネルギーメリットの一部から料金を受け取るサービスである。このサービスでは、サービス開始前に、サービス提供者はサービス利用者工場内で操業する数百台のモータの操業データを貰い、サービス提供者が保有するインバータをどのモータに導入するべきかを選定する。しかし、このサービス事業は機器売切り事業と異なり、サービス提供者が初期コストを肩代わりすることに加えて、サービス利用者がモータをどう操業するかによる利用効果変動により、サービス提供者の収入が変化する事業モデルである。サービス提供者が安全に事業を推進するためには、サービス事業全体での期待収益を大きくするだけでなく、収益変動の幅を小さくするようにインバータの導入先を選定する方法が必要である[14][46]。これに対して従来は、サービス利用者から提供される導入先設備毎の過去操業データを基に、期待される各平均利用効果を算定し、利用効果の大きい設備から順に導入先候補を選定する。この方法では、組み合わせ全体の期待収益は最大となるが、組み合わせによっては収益分布の幅が大きくなり最大損失想定額（最悪ケース）を考慮できない問題があった。さらに、導入先の選定には

サービス利用者の合意が不可欠なため、1 回の打ち合わせの中で 4～5 回の導入先候補組み合わせ案変更を実施し、インタラクティブに交渉する必要がある。しかし、例えば 100 台程度の設備に対して 20 台程度の機器を提供する場合、${}_{100}C_{20}=5.4\times10^{20}$ 個の導入先候補の組み合わせが存在する。そのため、4～5 時間の会議時間で全てを計算し比較することは難しい。本章では、導入先候補組み合わせを構築する際に、各導入先で発生する利用効果間の相関性を考慮して組み合わせを構築するとともに、分枝限定法を用いて探索範囲を絞り、数分の間に最適な導入先設備候補組み合わせを構築する手法を提案する。

本章では、3.2 節にて機器提供サービスの 1 つである省エネルギー機器提供サービスについて説明する。特に省エネルギー機器提供サービスにおけるキャッシュフロー項目とリスク項目を説明する。3.3 節では、省エネルギー機器提供サービスにおける利用効果リスクを考慮した導入先選定問題の説明とその定式化を行う。3.4 節ではさらに、最適でない導入先設備候補群を切り捨てることで短期間に最適な導入先設備組み合わせを探索する分枝限定法を用いた導入先選定方法を提案し、その初期暫定解ならびに各ノードでの上限値の算出方法を説明する。3.5 節では、提案手法による評価例を示し、リスク考慮効果の評価と設備間の相関の影響評価と探索時間の評価について説明する。

3.2　省エネルギー機器提供サービス

省エネルギー機器提供サービスとは、例えば省エネルギー機器であるインバータを売り切るのではなく、サービス利用者に無償で提供し、その設備（モータ）運用による省エネ

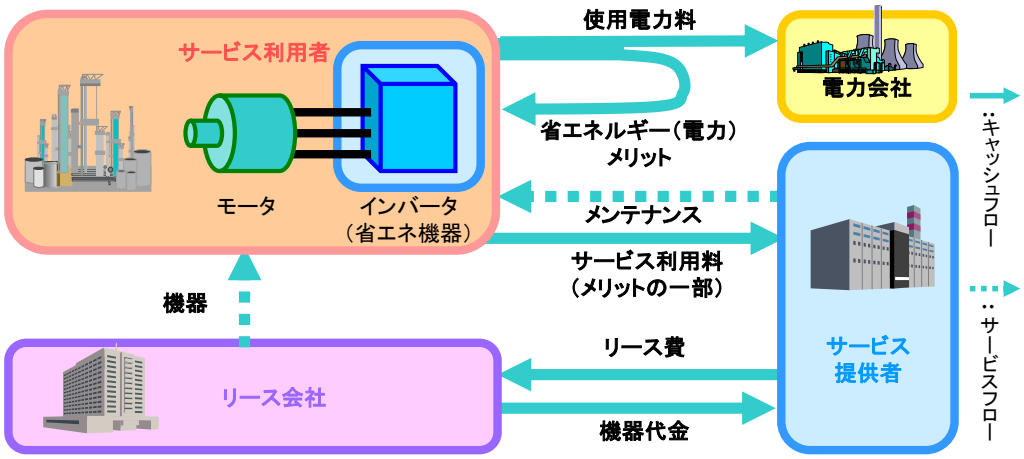

図 3.1　省エネルギー機器提供サービス

表 3.1　キャッシュフロー項目

プレイヤ	キャッシュ種類	キャッシュ項目
サービス利用者	キャッシュイン	省エネルギー（電力）メリット
	キャッシュアウト	サービス利用料
サービス提供者	キャッシュイン	サービス利用料
	キャッシュアウト	機器代金、リース費
		工事費
		メンテナンス費

ルギーメリットを、一定割合で利用料として徴収するサービスである。サービス利用者の投資リスクにより埋没している省エネルギー資源を発掘し、サービス利用者に有利子負債を伴わない省エネルギーを提供するサービスである。図 3.1 に示すように、サービス提供者は機器をサービス利用者へ無償で提供し、提供した機器による省エネルギーメリットによりサービス利用者とサービス提供者は表 3.1 に示すキャッシュインとキャッシュアウトとの差額を享受できる。

サービス提供者は機器をリース会社に売却し、リース費を支払いながら機器をサービス利用者に無償で提供する。提供した機器により発生した省エネルギーメリットにより、サービス利用者とサービス提供者は表 3.1 に示すキャッシュインとキャッシュアウトとの差額を享受することになる。省エネルギー機器提供サービスにおける収入・支出を考えると、サービス利用者の収入は機器導入による省エネルギーメリットであり、支出は省エネルギーメリットに応じたサービス利用料である。一方でサービス提供者の収入はサービス利用料であり、従来の売り切り事業の場合サービス利用者が負担していた「機器代金、リース費」・「メンテナンス費」・「工事費」という費用がサービス提供者の支出となる。ここでインバータとはモータの回転速度を制御する機器であり、モータの消費電力は回転速度に応じて変動することから、インバータを導入することにより、モータのみで運転する場合よりも消費電力を節約することができる。インバータ導入時と非導入時の消費電力の差が省エネルギーメリット（機器導入効果）となるが、モータの回転速度に応じて消費電力が変化するため、機器導入効果もモータの回転速度によって変動してしまう。インバータ導入時と非導入時の回転速度－消費電力グラフの例を図 3.2 に示す。黒線がモータのみで運転している場合、灰色線がインバータを導入した場合の消費電力を示している。また、この２本のグラフの差が省エネルギーメリットを表しており、回転速度によって省エネル

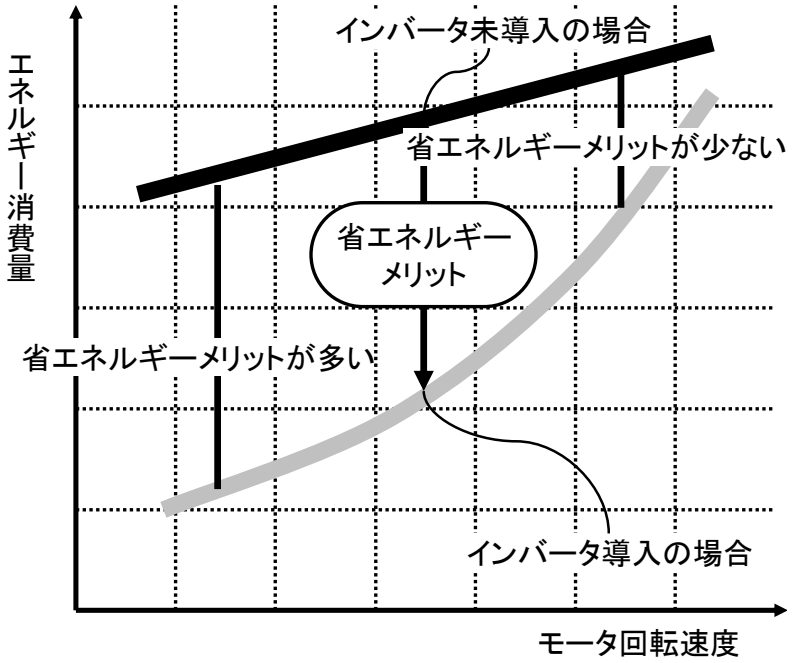

図 3.2　回転速度－消費電力グラフ

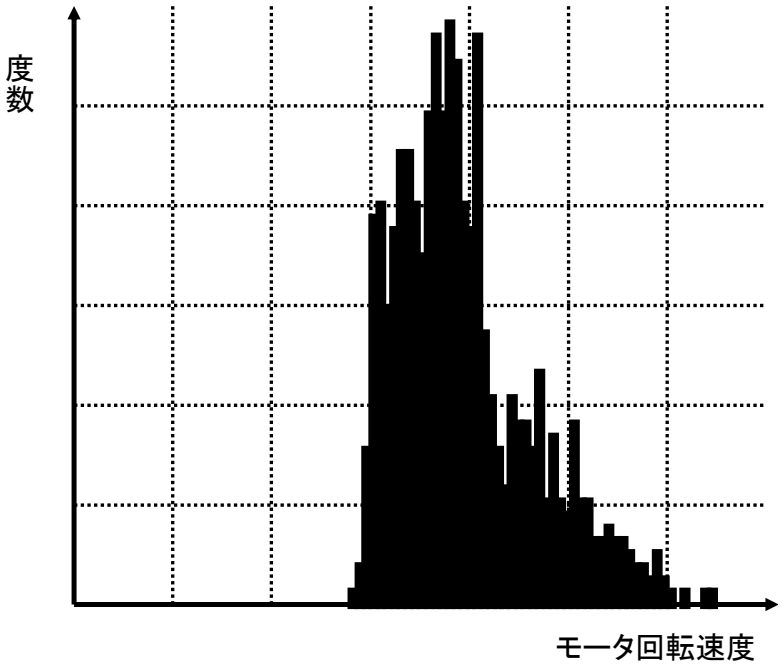

図 3.3　年間のモータ回転速度ヒストグラム

表 3.2　リスク項目

リスク項目	リスクタイプ
モータ操業度の変動	適用アプリケーションのリスク
年間操業時間の変動	適用業界・サービス利用者固有リスク
電力価格の変動	市場のリスク
金利の変動	市場のリスク

ギーメリットが変化し、回転速度が遅ければ省エネルギーメリットは大きいが、回転速度が速ければ省エネルギーメリットは小さい。また、図 3.3 に年間のモータ回転速度ヒストグラムを示す。図 3.3 に示すように年間を通して様々なモータ回転速度にて操業が行われており、省エネルギーメリットも変化する。

このようにサービス導入期間中にどの回転速度でモータを操業するのか、また年間どれだけの時間モータを操業するのかといった、サービス利用者の運用方法によって省エネルギーメリットは変動してしまう。そのため、省エネルギーメリットから算出されるをサービス利用料を収入としているサービス提供者は、従来は負っていなかったサービス利用者の操業リスクを、サービス利用者と共に分担することになる。省エネルギー機器提供サービスにおけるリスク要因としては、前述したサービス利用者のアプリケーションや業界に特化した「モータの操業度（平均回転速度）の変動」、「年間操業時間の変動」といったリスクが考えられるが、さらに使用電力料やリース費に影響する「電力価格の変動」、「金利の変動」など市場の相場変動に関するリスクについても検討する必要がある。

図 3.4 と図 3.5 とは、あるサービス利用者に省エネルギー機器提供サービスを提供した場合の、サービス提供者ならびにサービス利用者の 10 年間のキャッシュフロー予測範囲を示したグラフである。ここでは、10 年後の期待収益がサービス提供者とサービス利用者の平均値が同額となる利用料率（利用料＝省エネルギー電力料×利用料率）を設定した場合が示されている。同様に、図 3.6 と図 3.7 とは、サービス提供者ならびにサービス利用者の 10 年目の累積キャッシュフロー分布を示したグラフである。図 3.7 にあるサービス利用者のキャッシュフロー予測範囲に比べて、図 3.6 にあるように、一般的にサービス提供者のキャッシュフロー予測範囲が大きくなる。これはサービス提供者が「機器代金、リース費」・「メンテナンス費」・「工事費」といった固定費を、機器導入による省エネルギーメリットで回収する必要があるためであり、期待キャッシュフローを同じ額とした場合には、初期投資が無いサービス利用者に比べて、機器導入による省エネルギーメリット変動の影響を大きく受けてしまうためである。このように従来の機器売切り事業と異なり、

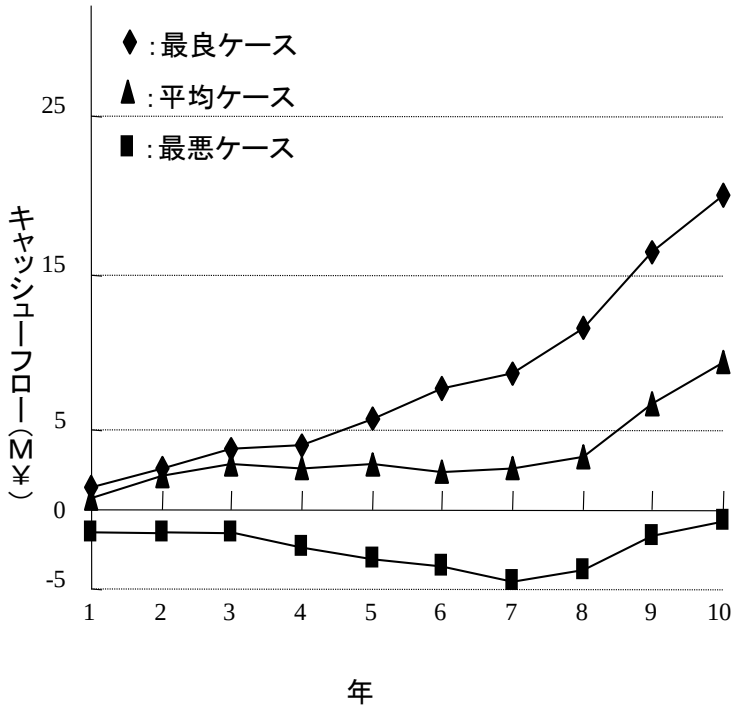

図 3.4　サービス提供者の累積キャッシュフロー

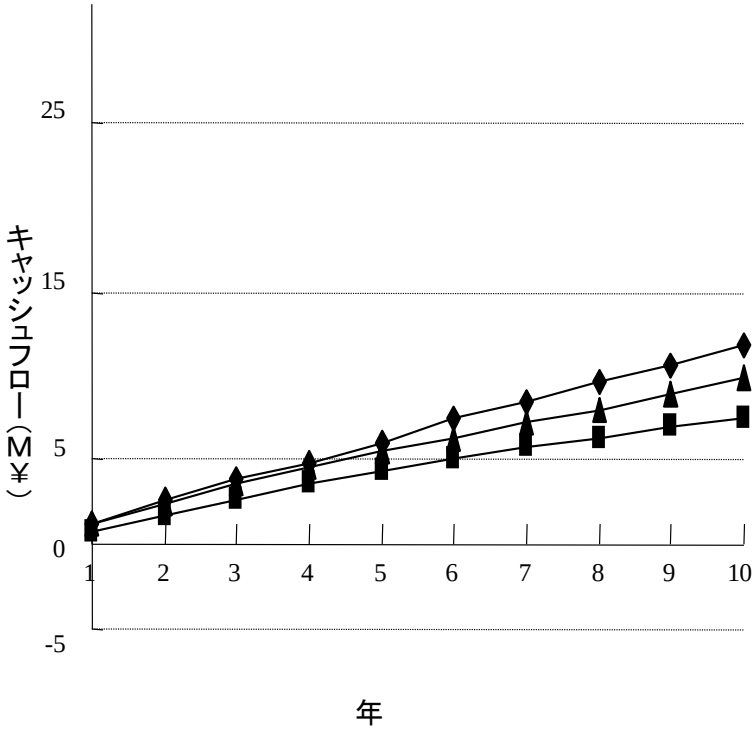

図 3.5　サービス利用者の累積キャッシュフロー

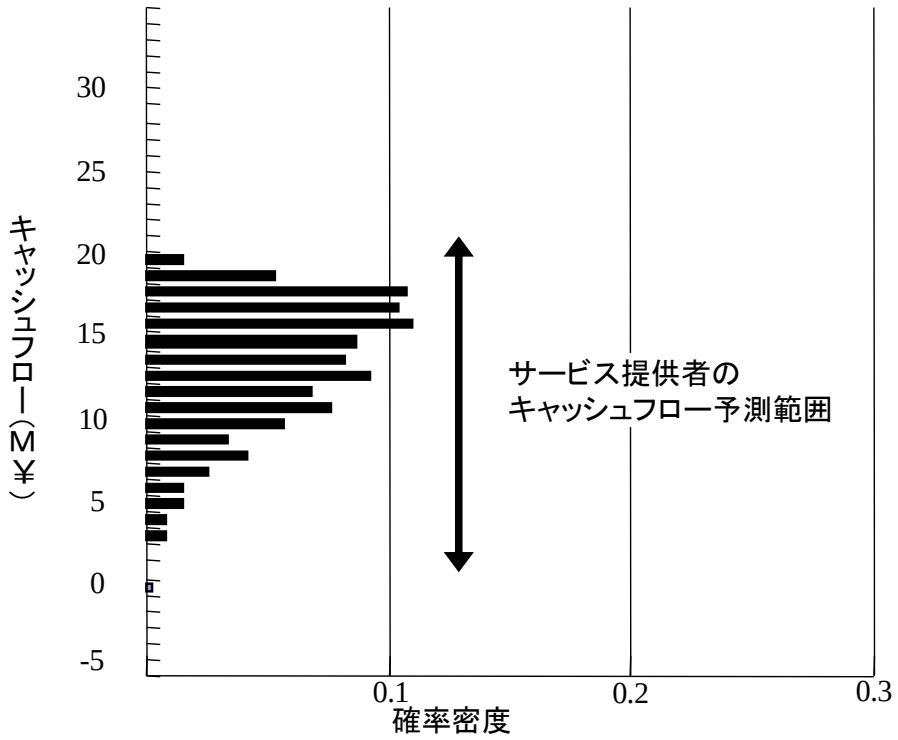

図 3.6　サービス提供者の 10 年目の累積キャッシュフロー分布

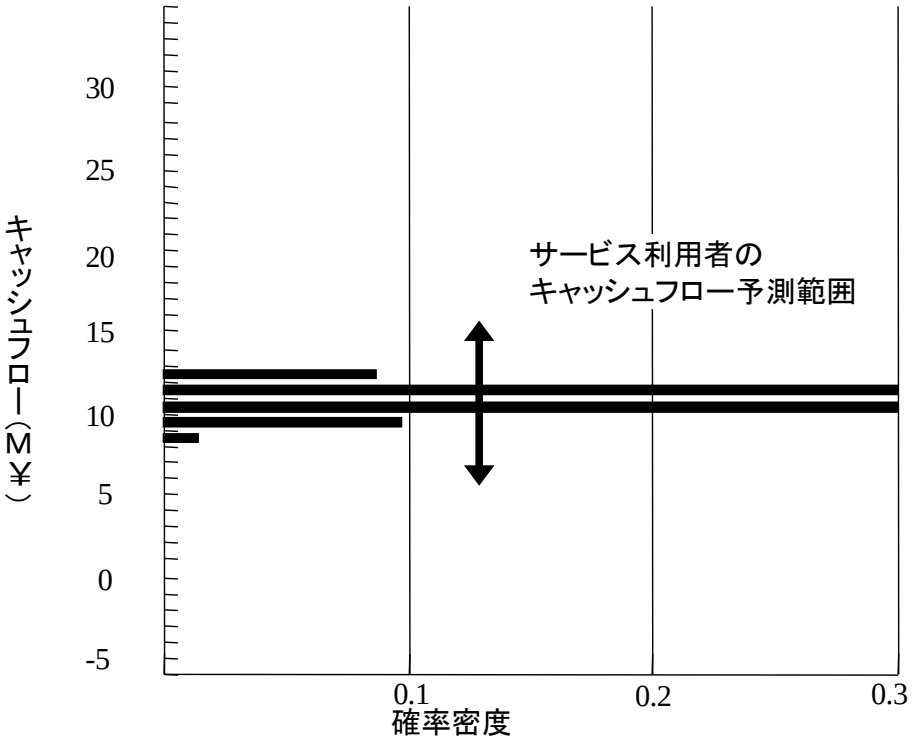

図 3.7　サービス利用者の 10 年目の累積キャッシュフロー分布

サービス提供者はサービス利用者の操業リスクを負担することから、そのリスクがサービス提供者の負担できる許容範囲を超えている場合、またサービス提供者が充分なリスク回避策を準備していない場合に、安全な事業推進が妨げられてしまうという問題が発生する。

3.3　導入先選定問題

サービス利用者のモータに省エネルギー機器であるインバータを提供する省エネルギー機器提供サービスの場合、インバータの導入対象となるモータが単体とは限らない。特にサービス利用者が大規模な工場を有している場合には、工場内で操業しているモータは数十台から数百台の規模に達する。ここでサービス利用者側には省エネルギー対策事業の予算規模に上限があり、一方でサービス提供者側にも省エネルギー機器提供サービス事業の事業規模により抱えられる省エネルギー機器台数に上限がある。このことから、機器導入が考えられる複数の設備候補を保有するサービス利用者にサービスを提供する場合に、どの設備に機器を導入するべきかいなかという導入先選定問題が発生する。機器提供サービスにおける導入先選定の問題とは、サービス利用者ならびにサービス提供者がより安全な事業推進を行うために、サービス提供者が保有する n 台のサービス提供機器を、サービス利用者工場内の導入対象となる N 個（$N>n$）の設備の何れに導入するかを選定する問題である。

3.3.1　利用効果リスクを考慮した導入先選定

機器提供サービスでは、サービス提供者は複数の設備に機器を提供するため、個別設備の収益変動リスクではなく、導入先全体での収益分布を考慮する必要がある。特に、サービス利用者工場内の設備は、製造している製品生産量により操業度合いが変化する。例えば、製品の生産量が多い時期にはサービス利用者工場内の全てのモータがフル稼働状態になり、生産量が少ない時期には全てのモータが低い稼働状態になる。そのため同一サービス利用者、同一業種サービス利用者の場合には、利用効果変動に相関の高い設備が多数含まれる。

サービス事業全体を安全に推進するためには、収益の期待値を大きくするだけでなく、同時に収益予測分布の分散値を小さくする導入先候補組み合わせを選定することが重要である。ここでは VaR (Value at Risk)値を用いる。VaR 値とは統計上の信頼水準において推定される最小収益を示す値である。図 3.8 の太線に示すように、信頼水準 95%の VaR 値を用いると、95%の確率で VaR 値よりも大きい収益、つまりは図の太線より右側の収益

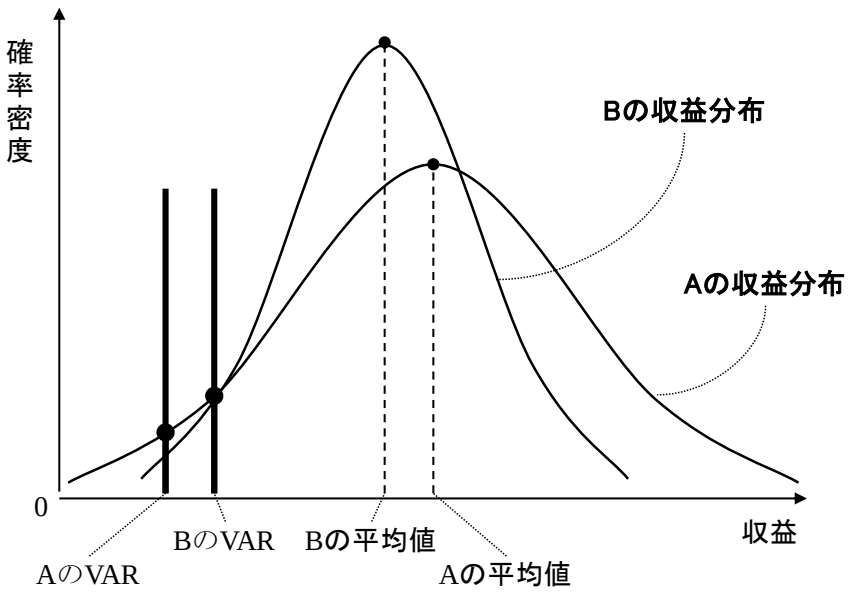

図 3.8　バリュー・アット・リスク

が少なくとも期待できる。従来の期待値による比較では A の期待収益の方が B よりも大きく A が優れていると判定されるが、最小収益で考えた場合には VaR 値の大きい B の方が A よりも優れている。事業の安全な推進ではこの最小収益による最悪のケースでの判定が重要であり、ここでは図 3.8 の太線に示す VaR 値を最大にする導入先候補組み合わせを選定する。

3.3.2　導入先選定問題の定式化

機器提供サービスでの機器の導入先組み合わせ選定問題を以下の記法を用いて記述する。まずサービス利用者の工場内には N 個の導入対象設備が存在しており、サービス提供者は n 個の提供機器を保有している。サービス利用者工場内の N 個の各設備に対して省エネルギー機器を提供した場合に、各設備 i で将来発生する省エネルギー量 $pi(t)$ の平均値を Pi、標準偏差を σi とする。ここで t は時刻を示す。

P_i　:i番目の設備の平均省エネルギー量

σ_i　:i番目の設備の省エネルギー量の標準偏差

また、サービス利用者工場内の設備 i と他の設備 $j(j \neq i)$ で発生する省エネルギー量 $pi(t)$ と $pj(t)$ との間の相関係数を下記とする。

ρ_{ij}　: i番目とj番目設備の省エネルギ ー量の相関係数

この相関係数は、 i 番目と j 番目設備（モータ）の過去稼動データから推定する。

さらにここで、サービス利用者工場内の N 個の導入対象設備に対する機器提供の有無を表すベクトル X を式(3.1)とする。

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_N \end{bmatrix} \quad , \quad x_i = \{0,1\} \tag{3.1}$$

ここで x_i=1 は i 番目の設備に機器を提供することを示し、x_i=0 は i 番目の設備に機器を提供しないことを示す。サービス提供者が保有する機器は n 個のため、ベクトル X の各要素の間には式(3.2)の関係がある。

$$n = \sum_{i=1}^{N} x_i \tag{3.2}$$

また、機器組み合わせの総省エネルギー量は式(3.3)となる。

$$MV = \sum_{i=1}^{N} P_i x_i \tag{3.3}$$

また、機器組み合わせの総省エネルギー量の標準偏差は式(3.4)となる。

$$SD = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (\sigma_i x_i)^2 + \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1, j \neq i}^{N} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j x_i x_j} \tag{3.4}$$

ここで、導入先選定問題の目的関数は式(3.5)で表現できる。

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^{N} P_i x_i - a \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (\sigma_i x_i)^2 + \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1, j \neq i}^{N} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j x_i x_j} \right\} \tag{3.5}$$

定数 a は VaR を算出する定数である。実際のインバータ導入効果 H の分布が正規分布にほぼ一致していたことから、ここでは H の分布を式(3.6)に示す正規分布と定義した。

$$H \sim N\left(MV, SD^2\right)$$

$$\text{ここで}\quad H = \sum_{i=1}^{N} p_i(t) x_i \tag{3.6}$$

これにより定数 a は、信頼水準 95%の場合の正規分布のパーセント点を求める値 a=1.96 となる。導入先選定問題は x_i が x_i={0, 1}の二値を取り、目的関数が非線形な整数問題となっている。

一方で、導入先候補の選定にはサービス利用者の合意を得ることが不可欠である。サービス利用者との交渉時には、導入候補案を確認した後に、対象設備から除外するなどの要望があるため、1 回の打ち合わせの中で 4～5 回の導入先候補組み合わせ案修正を実施し、インタラクティブに協議することが求められる。より短時間での導入先設備候補の組み合わせ案構築の方法が必要となる。しかし、例えば、顧客工場内の 100 台程度の高圧モータに対して 20 台程度の高圧インバータを提供するサービスの場合、${}_{100}C_{20}=5.4\times10^{20}$ 個の導入先設備候補の組み合わせが存在し、4～5 時間の会議時間で全てを計算し比較することは難しい。

3.4　分枝限定法を用いた導入先選定方法

3.3.2 節にて定義した導入先選定問題は、機器提供の有無を表すベクトル Xを決定する離散最適化かつ組合せ最適化問題であることから、離散最適化かつ組合せ最適化問題に適した分枝限定法を用い手法を提案する。ここでは、組み合わせ候補を体系的に列挙し、最適化された量の下限と暫定的な上限を用いて、最適でない候補群を切り捨てることで、探索範囲を絞りより短期間に最適な導入先設備候補の組み合わせを求める。

図 3.9 に示すように、まず上から順番に k 番目までの x_i に 1 または 0 の値が設定され、その該当するノードにおいて、k+1 番目以降の x_i に 1 または 0 が設定された場合の、式(3.5)の上限値 UB を算出する。各ノードでの上限値 UB が暫定解 PS を超えない場合には、そのノード以降のノード群は最適解を持たないと判定し切り捨てる。ここで b とは上から順番に k 番目までの x_i に 1 の値が設定された数である。ノード解の上限値が暫定解を超える場合には、$b=n$ であれば末端のノードなので暫定解を更新し、$b\neq n$ であれば k+1 番目の x_{k+1} に値を設定し、そのノードを対象に上限値を算出する。これらの処理は繰りかえす。

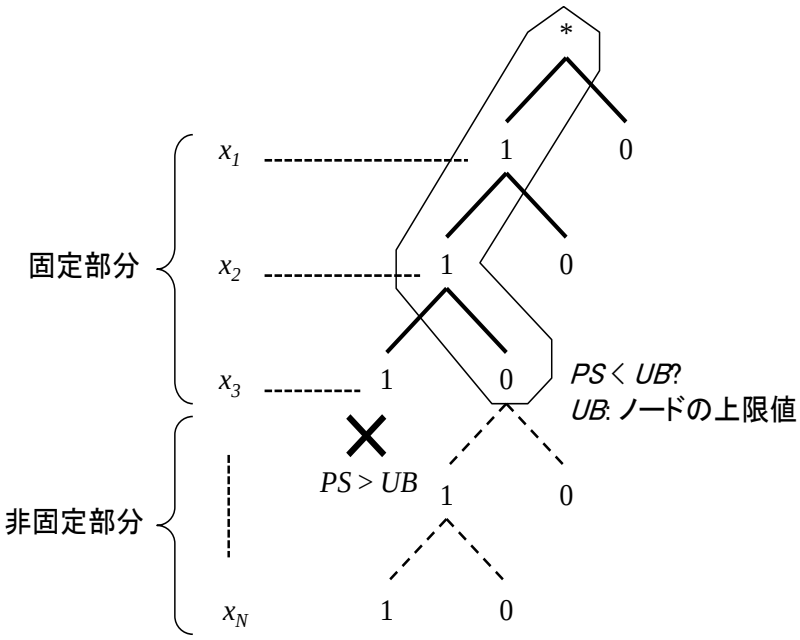

図 3.9　分枝限定法アプローチ

3.4.1　初期暫定解

最初に用いる暫定解 PS_{ini} としては、一般的に(3.5)式の第 1 項の方が第 2 項よりも大きいことから、従来手法である平均省エネルギー量による導入先候補選定法による解を用いる。導入先設備を平均省エネルギー量 P の大きい順序にソートして、上位 n 個を選定した組み合わせによる解であり、次式により求める。

$$
\begin{aligned}
PS_{ini} &= \sum_{i=1}^{N}\left(P_i x_i\right) - a\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(\sigma_i x_i\right)^2 + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1,\, j\neq i}^{N}\rho_{ij}\sigma_i\sigma_j x_i x_j} \\
&P_i \geq P_{i+1} \\
&x_i = 1 \qquad \left(1 \leq i \leq n\right) \\
&x_i = 0 \qquad \left(n < i \leq N\right)
\end{aligned}
\tag{3.7}
$$

3.4.2　ノードの上限値

各ノードでは、ベクトル X の固定部分とベクトル X の非固定部分とから、式(3.5)の目的関数の上限値 UB を算出する。

本章では、分離させることで計算が容易であることから、式(3.8)を、平均省エネルギー合計値 MV と分散合計値 ST と共分散合計値 CV、の３つの部分に分離して、ノードの上限値 UB を算出する。

$$
\begin{aligned}
UB &= \max(MV) - a\sqrt{\min(ST) + \min(CV)} \\
&> \max\left\{MV - a\sqrt{ST + CV}\right\} \\
ST &= \sum_{i=1}^{N}\left(\sigma_i x_i\right)^2 \\
CV &= \sum_{i=1}^{N}\sum_{j\neq i}^{N}\rho_{ij}\sigma_i\sigma_j x_i x_j
\end{aligned}
\tag{3.8}
$$

（1） MVの上限値

ベクトルXのk列までが確定している場合、MVは次式のように第 1 項の固定部分と第 2 項の非固定部分に分離される。

$$
\begin{aligned}
MV &= \sum_{i=1}^{k} P_i x_i + \sum_{i=k+1}^{N} P_i x_i \\
&\sum_{i=1}^{k} P_i x_i \quad :\text{固定部分} \\
&\sum_{i=k+1}^{N} P_i x_i \quad :\text{非固定部分}
\end{aligned}
\tag{3.9}
$$

ここで、$\max(MV)$は次式となる。

$$
\max(MV) = \sum_{i=1}^{k} P_i x_i + \max\left\{\sum_{i=k+1}^{N} P_i x_i\right\} \tag{3.10}
$$

ここで、既に選択されている機器数はb台なので、残りの選択可能台数は$(n-b)$台となる。従って、残りの機器から大きい順に$(n-b)$台を選択することで次式のように、MVの値は最大になる。

$$
\begin{aligned}
&\max\left\{\sum_{i=k+1}^{N} P_i x_i\right\} = \sum_{i=k+1}^{k+n-b} P_i \\
&b = \sum_{i=1}^{k} x_i
\end{aligned}
\tag{3.11}
$$

(2) STの下限値

ベクトルXのk列までが確定している場合、STは第1項の固定部分と第2項の非固定部分に分離され、$\min(ST)$は次式となる。

$$\min(ST) = \sum_{i=1}^{k} (\sigma_i x_i)^2 + \min\left\{ \sum_{i=k+1}^{N} (\sigma_i x_i)^2 \right\} \tag{3.12}$$

ここで非固定部分の下限値は、k番目までの機器を取り除き標準偏差の昇順にソートした$\sigma_m (i=1 \cdots N-k)$を用いて次式のように求める。

$$\min\left\{ \sum_{i=k+1}^{N} (\sigma_i x_i)^2 \right\} = \sum_{m=1}^{n-b} \sigma_m \tag{3.13}$$

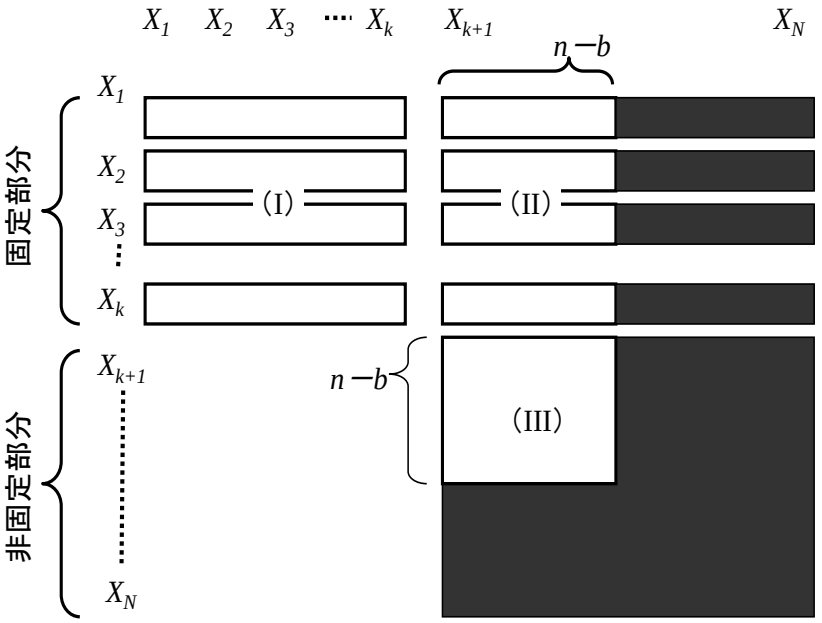

図 3.10 CVの下限値

(3) CVの下限値

ベクトルXのk列までが確定している場合CVは、図 3.10に示すように、固定部分$CV_{(I)}$と半固定部分$CV_{(II)}$と非固定部分$CV_{(III)}$の3つの部分に分離され、min(CV)は次式となる。

$$\min(CV) = CV_{(I)} + \min\left(CV_{(II)}\right) + \min\left(CV_{(III)}\right)$$

$$\begin{aligned} CV_{(I)} &= \sum_{i=1}^{k}\sum_{j\neq i}^{k} \rho_{ij}\sigma_i\sigma_j x_i x_j \\ CV_{(II)} &= \sum_{i=1}^{k}\sum_{q>k}^{N} \rho_{iq}\sigma_i\sigma_q x_i x_q \\ CV_{(III)} &= \sum_{r>k}^{N}\sum_{s>k}^{N} \rho_{rs}\sigma_r\sigma_s x_r x_s \end{aligned} \tag{3.14}$$

(4) $CV_{(II)}$の下限値

半固定部分$CV_{(II)}$はベクトルXのi列のみが固定されている。ここでは、$\rho_{iv}\sigma_i\sigma_v$を昇順にソートしておき、$\rho_{iq}\sigma_i\sigma_q$($q$=1…$k$)を除いて順番に選択することで、$CV_{(II)}$の下限値を次式のように求める。

$$\min\left\{\sum_{i=1}^{k}\sum_{q>k}^{N} \rho_{iq}\sigma_i\sigma_q x_i x_q\right\} = \sum_{i=1}^{k}\sum_{v=1}^{n-b}\left(\rho_{iv}\sigma_i\sigma_v\right)x_i \tag{3.15}$$

(5) $CV_{(III)}$の下限値

非固定部分$CV_{(III)}$は行、列の何れも固定されていない。次式で表せられるθ_wを昇順にソートしておき、

$$\theta_w = \sum_{i=1}^{n-b} \rho_{iw}\sigma_i\sigma_w \tag{3.16}$$

θw(w=1…k)を除いて順番に選択することで、$CV_{(III)}$の下限値を下記のように求める。

$$\min\left\{\sum_{r>k}^{N}\sum_{s>k}^{N} \rho_{rs}\sigma_r\sigma_s x_r x_s\right\} = \sum_{w=1}^{n-b}\theta_w \tag{3.17}$$

(1)～(5)により各ノードの上限値を計算する。このノードの上限値と初期暫定解から更新される暫定解とを比較して最適な機器組み合わせを選択することができる。

3.5　導入先選定方法の効果評価

3.5.1　評価データ

サービス利用者工場内に 100 台の高圧モータがあり、それに対して 20 台の高圧インバータを提供するケースを用いて、本手法の評価を行った。高圧インバータの導入先候補の組み合わせ総数は ${}_{100}C_{20}=5.4\times10^{20}$ 個である。

サービス利用者工場内の 100 台の高圧モータの特性を表 3.3 に示す。平均省エネルギー量の最大値は 70671kwh/月、最小値は 9618kwh/月である。省エネルギー量の標準偏差の最大値は 30198kwh/月、最小値は 2241kwh/月である。各高圧モータで発生する省エネルギー量に関して全モータ間での相関係数を設定した。相関係数の最大値は 0.9、最小値は－0.55 である。また、全相関係数の平均値は 0.17 である。

3.5.2　リスク考慮効果の評価

従来の平均省エネルギー量の大きい順に選択した導入先組み合わせ候補と、本方法により求められた最適な導入先組み合わせとの特性を表 3.4 に示す。

表 3.3　評価データ

	平均値	標準偏差	相関係数
最大	70,671 kwh/月	30,198 kwh/月	0.9
最小	9,618 kwh/月	2,241 kwh/月	－0.55
平均	－	－	0.17

表 3.4　評価結果

	総省エネルギー量	VaR(95%)
平均値評価による選択	1,009,483 kwh/月	632,252 kwh/月
リスク評価による選択	963,880 kwh/月	665,714 kwh/月
改善率	－5.29%	+6.20%

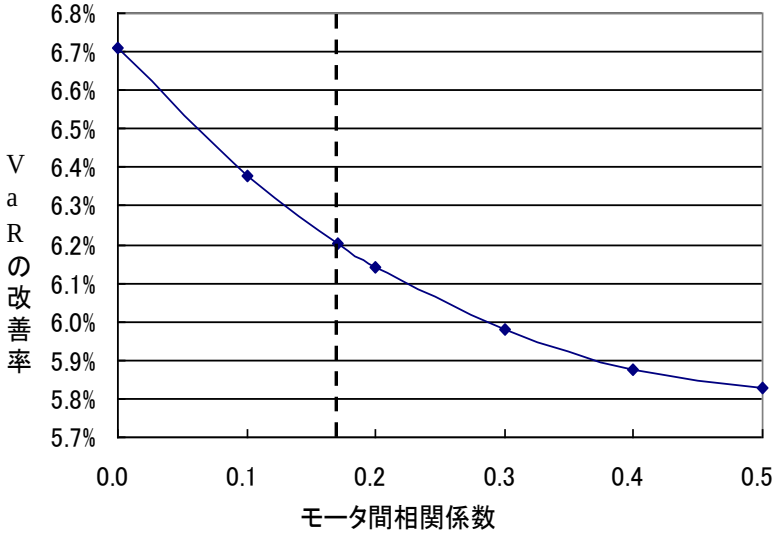

図 3.11　モータ間相関の影響評価

導入先組み合わせの総省エネルギー量に関しては、従来の手法に比べて 5.43%減少している。一方で、95%信頼水準での VaR 値に関しては、従来の手法に比べて 6.20%増加し改善されている。これにより、導入先組合全体での収益分布の幅が小さくなり収益性が安定する性が向上する。またこの VaR 値は取引限度額の指標として使われる値であり、VaR 値が 6.20%増加するということは、従来手法に比べて 6.20%分だけ新たに追加投資する可能性が広がる。

3.5.3 モータ間相関の影響評価

表 3.3 に示したように、今回の評価データでは、高圧モータ間の相関係数の平均値は 0.17 である。ここでは、高圧モータ間の相関係数の平均値を 0.0 から 0.5 まで変化させてモータ間相関の影響を評価した。図 3.11 に示すように、高圧モータ間の正の相関が弱まることで VaR 値の改善量は増加し、相関が強まることで VaR 値の改善量は減少している。正の相関が弱まった場合には、個体の省エネルギー量が小さいモータであっても、他モータと組み合わせる事で、収益分布の幅を小さくする効果が大きいことを示している。このことから、本手法を用いて、サービス導入先のモータの過去稼動データを入手した場合に、設備間の相関係数の平均値により、導入先組み合わせを選定すべきかどうか判断することが可能である。

3.5.4 探索時間の評価

計算環境として、CPU は Intel(R) Core(TM)2 Duo T720 2GHz を、RAM は 0.99GB を用いた。OS は Windows XP professional Version 2002 を用いた。プログラムは Microsoft Visual Basic 6.5 で開発した。

この計算環境において、相関係数の平均値が 0.17 で 100 台の高圧モータに対して 20 台の高圧インバータを提供するケースでは、4 分 11 秒で解を探索した。また図 3.12 に、モータ総数を 40 台から 120 台に変化させ 20 台の導入先候補組み合わせを探索した場合の、探索時間の変化を示す。図 3.12 において、実線グラフは相関係数の平均値が 0.17 の場合、

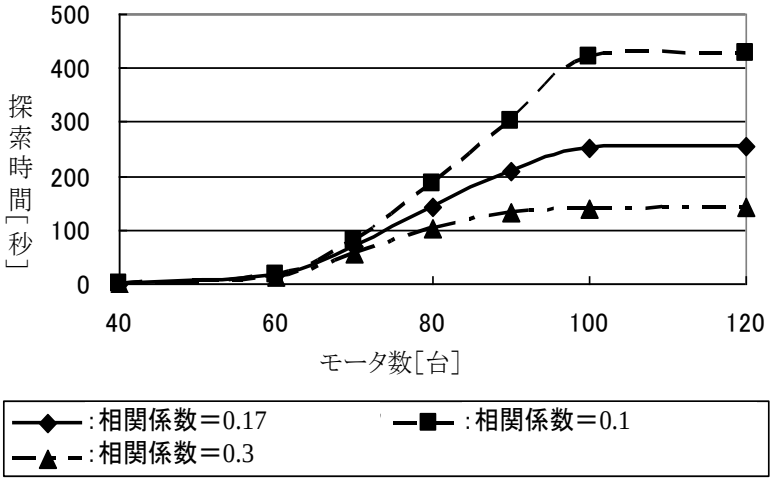

図 3.12　探索時間の評価

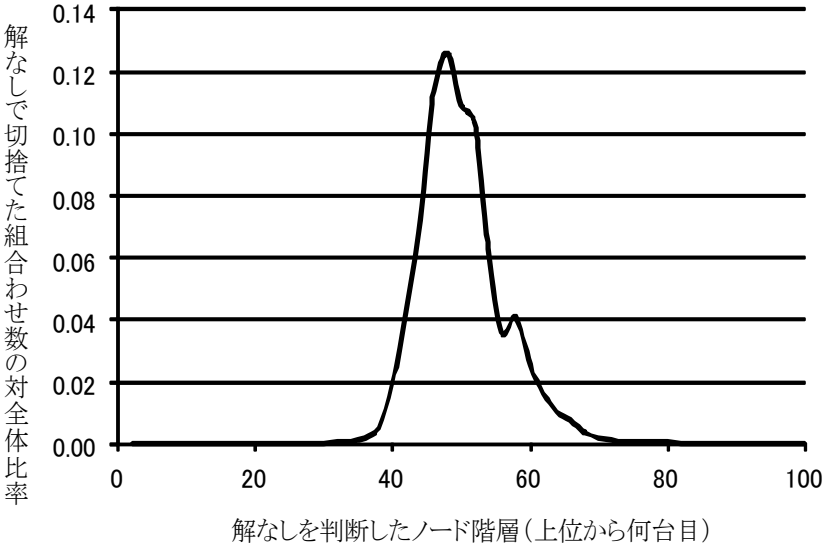

図 3.13　分枝限定で切り捨てを行ったノード階層と組み合わせ数

一点破線グラフは相関係数の平均値が 0.3 の場合、破線グラフは相関係数の平均値が 0.1 の場合の探索時間変化を示している。何れの場合においても本ケースでは、100 台以上になると対象となるモータ数が増加しても探索時間が一定となっており、組み合わせ数増加に対して効果的にノードを切り捨て短時間に探索を行えている。

さらに 3.5.3 節のモータ間相関の影響評価と組み合わせて考えると、相関係数の平均値が小さくなると VaR 値の改善量は増加するが同時に探索時間も長くなる。これは、モータ間の正の相関が低くなることで、VaR 値を改善する可能性を持ったモータの組み合わせ数が増加するため、分枝限定までに時間が掛かるためだと考えられる。しかし、図 3.12 に示すように、相関係数の平均値が 0.1 で 100 台の高圧モータに対して 20 台の高圧インバータを提供するケースでは、7 分 6 秒で解を探索した。

図 3.13 に分枝限定で切り捨てを行ったノード階層と組み合わせ数（対全体比率）の関係を示す。100 台の高圧モータに対して 20 台の高圧インバータを提供するケースにおいて、先頭から 40 後半～50 台を中心に解なしと判定し切り捨てを行っており、75 台以降は全て解なしと判定し切り捨ている。また図 3.13 に示した度数分布の総面積 0.796 が切り捨てた組み合わせ数を示しており、全体の組み合わせ数に対して 79.6%の組み合わせを試算することなく切り捨てることができている。

3.6 結言

本章では、サービス利用者から提供される導入先設備毎の過去操業データを基に、期待される各平均利用効果を算定し利用効果の大きい設備から順に導入先候補を選定するだけではなく、導入先候補の組み合わせによる収益分布のリスク幅を考慮するために、導入先候補の組み合わせを構築する際、VaR 値を最大にするよう導入先候補組み合わせを選定することで、導入先の利用効果変動の相関を考慮した導入先候補組み合わせを構築する方法を提案した。さらに、導入先の選定にはサービス利用者の合意が不可欠なため、1 回の打ち合わせの中で 4～5 回の導入先候補組み合わせ案変更を実施しインタラクティブに交渉するために、分枝限定法を用いて組み合わせ候補を体系的に列挙し、最適化された量の下限と暫定的な上限を用いて最適でない候補群を切り捨てることで探索範囲を絞り、より短期間に最適な導入先設備候補の組み合わせを求める方法を提案した。本章では、実際に機器提供サービスを導入している高圧モータの稼働データを基にして、リスク考慮効果、探索時間、モータ間相関の影響評価を行い、提案手法が有効であることを示した。

本章では 100 台の高圧モータに対して 20 台の高圧インバータを同時に提供するケース

を想定し、提案手法による導入先候補の選定を評価した。しかし実際には、高圧モータ自身の導入時期や定期修理時期により、高圧インバータを取り付けるタイミングは同時ではなく、数ヶ月間から長い場合で数年間ずれる可能性がある。このように実際のサービス運用における導入タイミングのずれを含めた導入先選定の方法検討が残された課題である。

第4章

機器買い取りオプションのプライシング方式

4.1　緒言

機器販売と比較した機器提供サービスの特長は、初期投資が不要になり投資回収リスクを負わないこと、従量課金のため効果変動による運用リスクを負わないことである[46][47]。この特長により、対象機器の利用効果発生に不確実感を感じて購入できないサービス利用者の利用が見込まれる。ところが、サービスを通じて機器を利用すると、利用効果を体験し確認できるため、購入を阻害していた不確実感が除かれ、機器を買い取りして利用したいと考えるサービス利用者が現れる。ここで、買い取りたくなる機器は利用効果の高い機器のため、従量課金で提供するサービス提供者にとっては、収益率の高い機器である。サービス提供者は発生している利用効果に見合った高値、例えば時価で販売しないと、サービスポートフォリオ全体の収益率低下を招く。そのため、買い取り時点までの利用効果に基づいて時価評価し、その価値に基づいて買い取り価格を算出するプライシング方法が提案されている[48]。しかし、サービス利用者は機器の価格を利用効果の大小に関係ない簿価で考えるため、利用効果が大きいからと言って高値で買い取ることに納得感がもてない。そのため時価による買い取り価格交渉を行っても、簿価で買い取られ、サービス提供者がこの収益変動リスクを全て負担するという問題が発生してしまう。この問題に対して、サービス利用開始時点に機器を簿価にて買い取る権利（買い取りオプション）をサービス利用者に購入して貰うことで、サービス利用者にリスクを一部負担して貰う方法がある。本章では、サービス提供者とサービス利用者がこの利用効果変動によるリスクを分担するために、サービス利用開始時点にこの買い取りオプションの価格付けをするプライシング方法を提案する。本方式により、第 1 に、買い取り時点での時価か簿価かという価格交渉が不要となり、第 2 に、権利購入というサービス利用者のリスク分担によりサービス事業全体での収益率低下を回避できる。

本章では、4.2 節にて従来の方式である買い取り時点でのプライシング方式を説明する。

4.3 節では、サービス利用開始時点で買い取りオプションを価格付けするため、買い取りオプション価値評価部とサービスポートフォリオ評価部とからなり、損失をできるだけ小さくしたいというサービス提供者の要求と、オプション価格をできるだけ安くしたいというサービス利用者の要求に応える価格を算定するプライシング方法を提案する。4.4 節では、石油メーカーのボイラー通風装置への提供を想定し提案手法による評価例を示す。

4.2　従来のプライシング方式

機器提供サービスにおいて、サービス利用者が途中で買い取りたくなる機器は多くの場合に利用効果が高い機器である。サービス事業者にとっては収益率の高いサービス機器であり、買い取りを認めたとしても、会計上の簿価よりも高い価格で販売しないと、サービスポートフォリオ全体の収益率低下という問題を招く。そのため簿価よりも高い価格で販売する必要があり、従来の方法としては、買い取り時点までの機器利用効果を算定し、その効果に基づいて価格付けする方法が一般的である。

4.2.1　買い取り時点での時価評価

時価評価は一般的に次式(4.1)により算出される。

$$
\begin{aligned}
&TV = AP \times (UY - PY) \\
&\quad TV[¥] && :\text{時価} \\
&\quad AP[¥/\text{年}] = \frac{\sum_{i=1}^{PY} \mathrm{P}rofit(i)}{PY} && :\text{平均利用効果} \\
&\quad UY[\text{年}] && :\text{法定耐用年数} \\
&\quad PY[\text{年}] && :\text{保有年数}
\end{aligned}
\tag{4.1}
$$

時価評価において重要なのは、導入後から現時点までに発生した効果 $Profit(i)$であり、企業買収においては、買収先企業の株価を基に企業の時価を算定する方法が提案[48]されている。また IT 資産の評価手法としては、機器利用効果を示す価値指標を設定し、利用前後での価値指標改善値を設定して IT 機器の価値を財務数値化する方法が提案されている[49]～[58]。

4.2.2 時価評価の問題点

しかし一方で、企業が保有する機器などの資産には、企業会計上の価値を算出する原価償却法が存在する[48]。簿価は一般的に式(4.2)により算出される。

$$BV = PP \times \left(1 - \frac{PY}{UY}\right) \tag{4.2}$$

ここで、BVが簿価[￥]であり、PPは初期の取得額[￥]である。

原価償却法により算出される簿価は、式(4.2)が示すように機器の利用効果の大小に関係なく取得額と保有年数とから一意に算出される。例え利用効果が大きい機器だとしても、公に認められた簿価と比べ高い価格で買い取ることにサービス利用者は納得感が得られない。従来の時価評価手法では、図 4.1 に示すように、買い取り時点にて簿価と時価の２つの価値指標が選択肢として算出されてしまう。そのため、例え算出された時価が妥当な値だとしても、図 4.2 に示すように、利用効果が大きい機器の場合、時価が簿価を上回る値段となるため、簿価での購入を考えるサービス利用者と価格交渉で合意を得られないという問題がおきる。

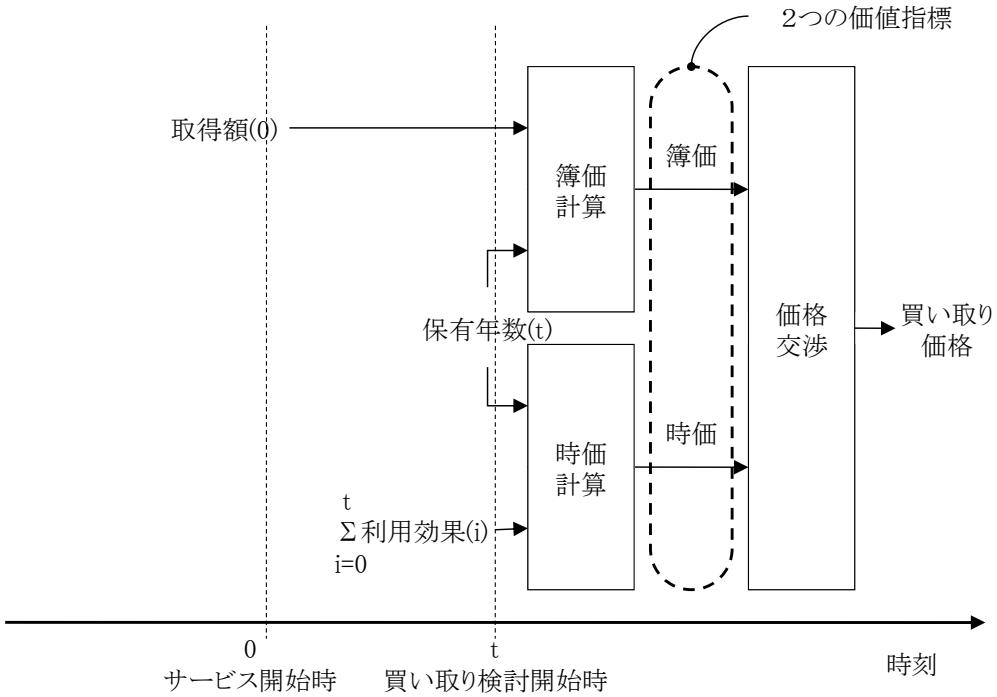

図 4.1　従来の買い取り価格決定プロセス

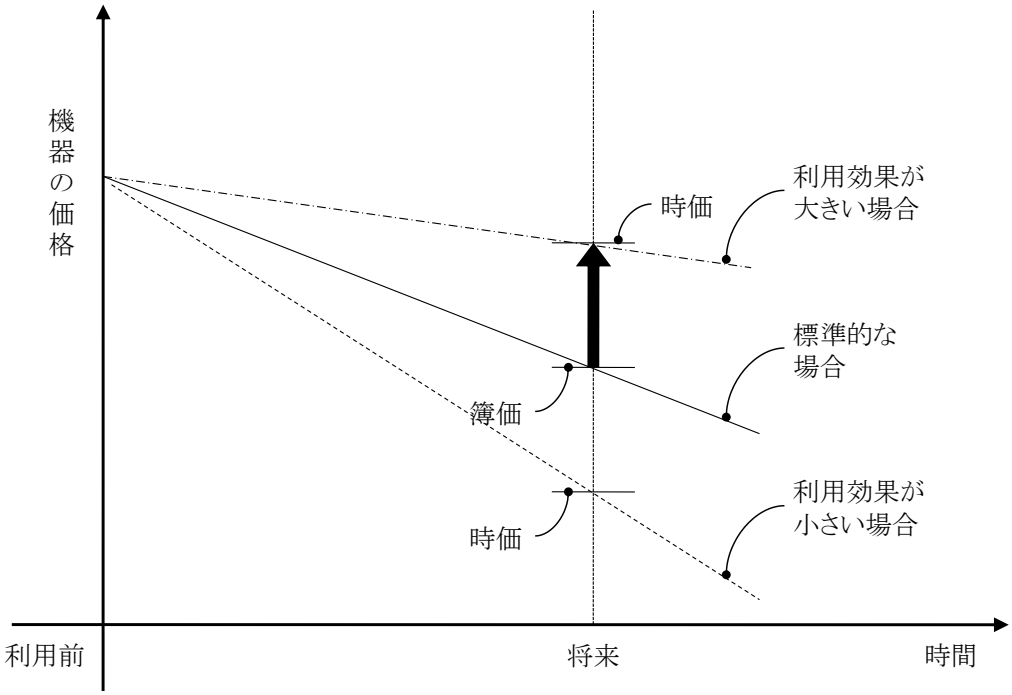

図 4.2　簿価と時価の関係

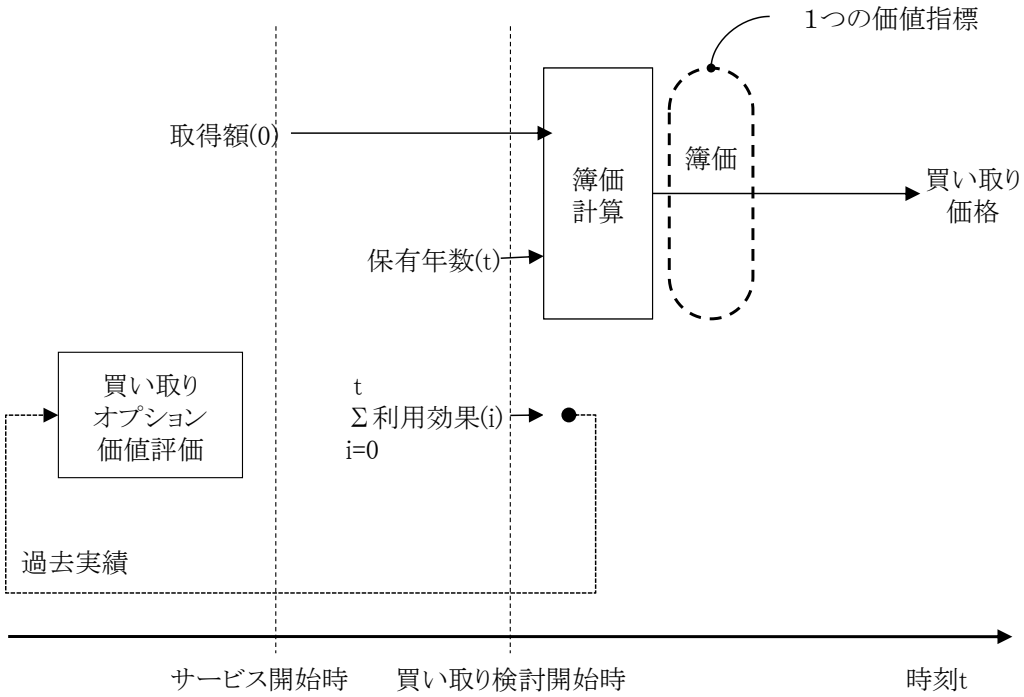

図 4.3　オプションによる買い取り価格決定プロセス

この問題に対して、機器を簿価で買い取る権利（買い取りオプション）の販売であれば、第 1 に、簿価で買い取りたいと考えるサービス利用者の希望に応え、第 2 に、買い取り時点での時価評価や価格交渉を回避できる。さらには、権利販売によりサービス提供者にとってのサービスポートフォリオ全体の収益率低下を回避する。本章では、買い取りオプション販売を実現するため、買い取り時点で時価評価をする方法（図 4.1）ではなく、サービス利用開始時点で買い取りオプションの価値評価をする方法（図 4.3）を提案する。これにより買い取り時点では価値指標が簿価のみとなる。

4.3　買い取りオプションの価格付け方法

買い取りオプションの価格付けを行うには、買い取ったオプションの価値を評価することが必要であり、ここでは将来買い取りオプションを行使することで得られる利得を価値と考える。まず、利得の源泉である将来時点における対象機器の利用効果は、機器の利用状況により小さくなったり大きくなったりするリスクを有している。サービス利用者から見ると、図 4.2 のように、利用効果が大きくなった機器（一点破線）の場合、買い取りオプションを行使することで実線と一点破線の差額だけ正の利得を獲得できる。一方で、利用効果が小さくなった機器（破線）の場合、サービス利用者は権利を行使しないため負の

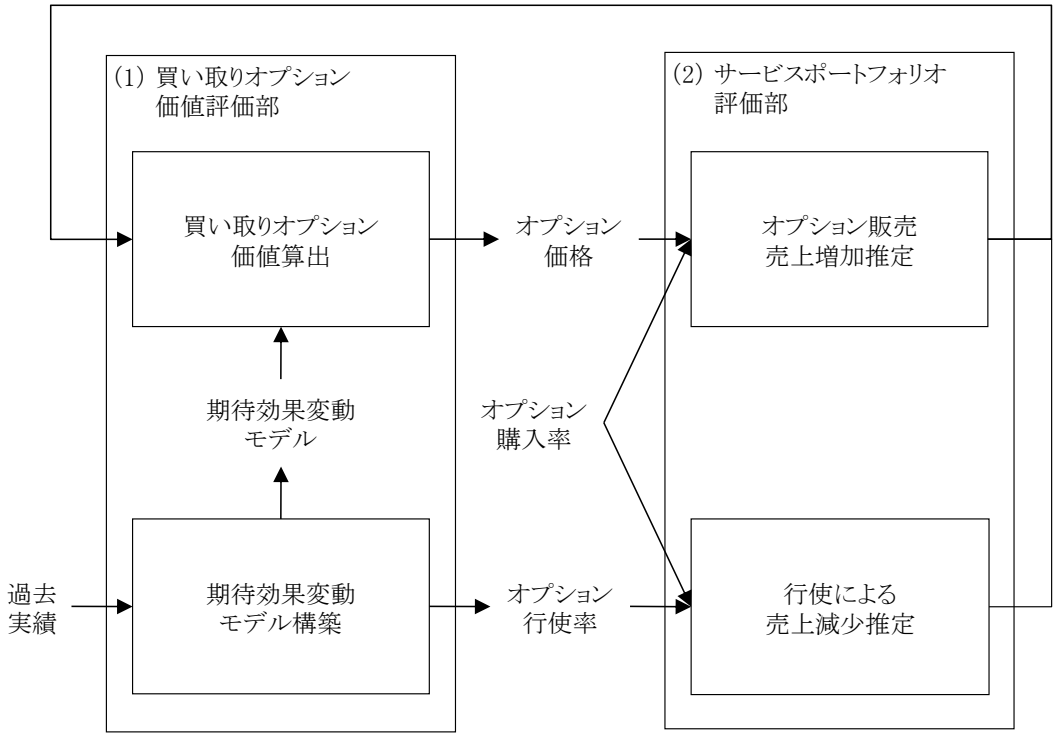

図 4.4　買い取りオプションの価格付け方法

利得は発生しない。このようなサービス利用者から見た利得特性を表すオプションモデルと将来の利用効果変動特性を表すリスクモデルを持ち、買い取りオプションの価値を評価する「買い取りオプション価値評価部」が必要である。一方で、サービス提供者から見ると、サービス利用前の権利販売により売上が増加するが、ある機器の利用効果が大きくなった場合、サービス利用者により買い取りオプションが行使されるため、利用効果が大きい機器と小さい機器が混在するサービスポートフォリオ全体においては、利用効果の大きい機器からの期待していた将来売上が失われる。このようなサービス提供者の売上のトレードオフを評価する「サービスポートフォリオ評価部」が必要である。本章では、図 4.4 に示すように、サービス利用者から見た買い取りオプションの価値を算出する「買い取りオプション価値評価部」と、サービス提供者の売上のトレードオフを評価する「サービスポートフォリオ評価部」とを連携し、サービス利用者とサービス提供者とのリスク分担を調整する買い取りオプションの価格付け方法を提案する。

4.3.1 買い取りオプションの価値評価部

買い取りオプション価格評価部は、将来の利用効果変動特性を表すリスクモデルとしてサービス利用者あるいは類似サービス利用者の過去の機器利用データから統計的に推定する効果変動モデルと、減価償却に基づく簿価算定モデルと、買い取りオプションの利得特性を示すオプションモデルとから構成される。

(1) 期待効果変動モデル

ここで効果の発生をランダム・ウォークで仮定すると、Δt 時刻後の期待効果変動モデルは次式のように定義される。

$$\Delta E(t) = \mu\Delta t + \sigma\Delta z \tag{4.3}$$

μ : 効果変動のトレンド

σ : 効果変動のボラティリティ

Δz : ウィーナー過程の増分(平均 : 0, 分散 : Δt)

これにより、現時点 t=0 での効果実績値 $E(0)$とから、将来時点 t=k での機器利用効果は次式のように推定される。

$$E(k) = E(0) + \sum_{i=1}^{k} \Delta E(t) \tag{4.4}$$

(2) 簿価算定モデル

対象機器の取得価格を $V(0)$とすると、将来時点（＝利用年数）$t=k$ での簿価は次式のように定義される。

$$V(k)=\left(1-\frac{k}{n}\right)V(0) \tag{4.5}$$

k: 保有年数

n: 法定耐用年数

ここで、償却率 $r(t)$は次式により算出される。

$$r(t)=\frac{\left(1-\frac{V(n)}{V(0)}\right)}{n} \tag{4.6}$$

(3) 買い取りオプションモデル

また買い取りオプションを保有することによる利得特性を図 4.5 のオプショングラフに示す。将来時点 $t=k$における利用効果 $E(k)$が簿価 $V(k)$よりも大きい場合には、買い取りオプションを行使することで、$E(k)-V(k)$分の利得を得る。また、利用効果 $E(k)$が簿価 $V(k)$よりも小さい場合には、オプションを行使しないので利得は負にならず 0 となる。買い取りオプションの利得 $PO(k)$は次式により定義される。

$$PO(k)=\max(0,E(k)-V(k)) \tag{4.7}$$

ここで買い取りオプションモデルを図 2.8(b)のように与えると、利用効果から利得に変換するオプションモデルに従い、図 2.8(a)に示すサービス利用者に発生する利得の確率分布が推定される。この確率分布の中心値から買い取りオプションの価格 Pを算定する。

効果変動モデルは図 2.8(c)にあるように、ある確率分布に従い発生する確率過程である。この確率分布は、図 4.6 に示すようにサービス利用者設備の過去の計測データから推定する。図 4.6 の実線は過去の実績分布を、太線は推定した分布を示している。

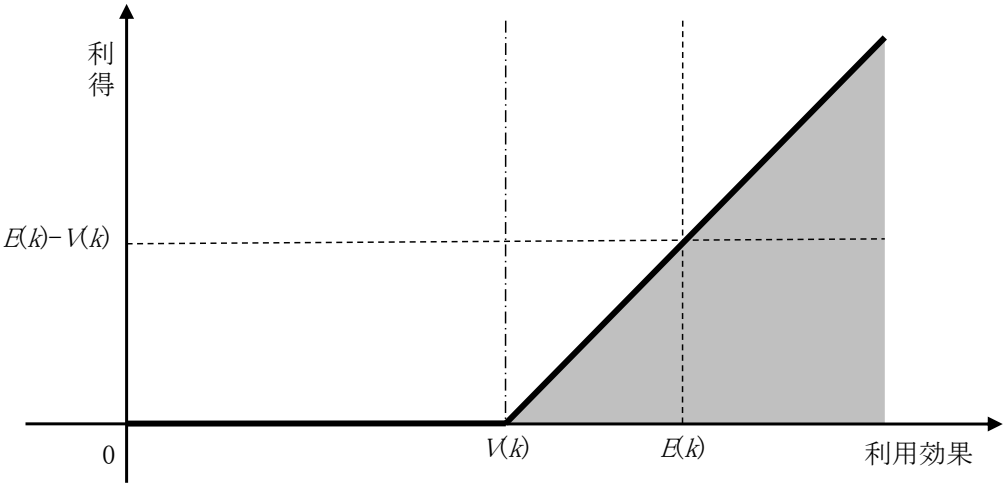

図 4.5　利用効果変動に応じたオプションモデル

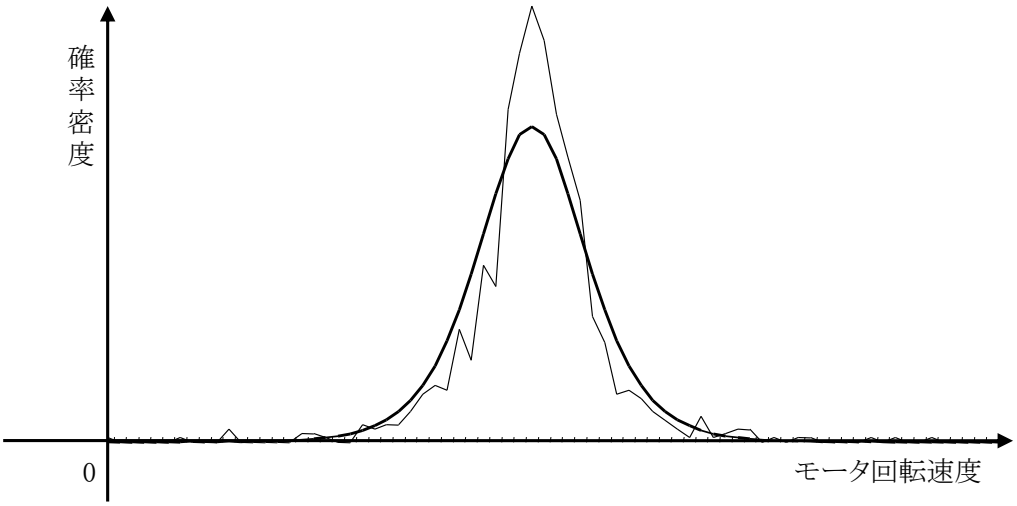

図 4.6　確率分布の推定

4.3.2 サービスポートフォリオ評価部

サービスポートフォリオ評価部は、オプション販売による売上増加推定部と、オプションの行使による売上減少推定部とからなる。サービスポートフォリオ全体での売り上げのトレードオフを推定し買い取りオプション価値算出部にフィードバックを行い、買い取りオプション価格 P を算定する。

(a) オプション販売による売上増加推定

オプション販売売上増加量 Ru はオプションの価格 P とから次式のように定義される。

$$Ru = P \times U \times r$$

U : ユーザ数 (4.8)

r : オプション購入率

(b) オプション行使による売上減少推定

行使による売上減少量 Rd は、簿価よりも高い確率で利用効果が現れるサービス利用者数 U' により、次式のように定義される。

$$Rd = \left(R(k) - P\right) \times U' \times r \times b$$

$R(k)$: 行使するユーザの期待利益 (4.9)

b: オプションを行使するユーザ比率

4.3.3 買い取りオプション価格算定

損失をできるだけ小さくしたいというサービス提供者の要求と、オプション価格 P をできるだけ安くしたいというサービス利用者の要求の、２つの要求に応えると、オプション価格 P を決める目的関数は式(4.10)となる。

目的関数:

$$\min\left(Ru - Rd\right) \tag{4.10}$$

制約条件: $Ru - Rd \geq 0$

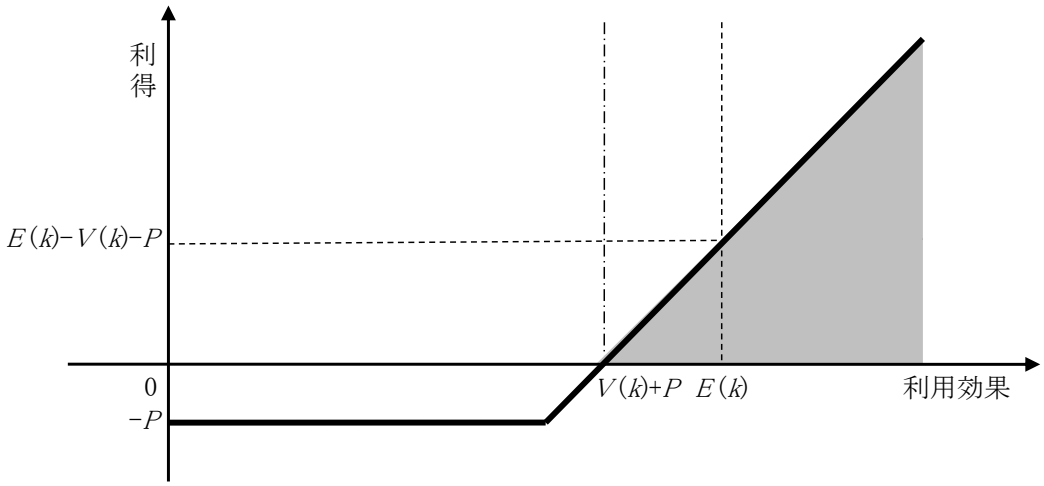

図 4.7 オプション価格を加えたオプションモデル

ここで、オプション価格 P により買い取りオプションの利得特性は、図 4.7 のオプショングラフに示すように変化する。サービス利用者にとって、効果が低い場合にもオプション価格 P だけの損失は発生することを示しており、オプションを行使する利用効果が $V(0)$ から $V(0)+P$ に移動することを示している。

4.4 オプション購入による期待利益評価

4.4.1 評価対象

本章では、高圧モータの回転速度を制御する高圧用インバータを用いて省エネルギー効果を提供する機器提供サービスを評価対象とし、石油メーカーのボイラー通風装置への提供を想定した。評価対象の条件を表 4.1 に示す。図 4.8 に示すように、7 年目には約半数のサービス利用者の累積導入効果が取得価格 $V(0)$=2000 万円を上回り、約±300 万円のばらつきが現れる。

表 4.1　評価対象の運用条件

	平均
平均省エネルギー量　$E(0)$	2,500,000kwh/年
省エネボラティリティ　σ	5,000kwh/月
電力単価	9.7¥/kwh
取得価格　$V(0)$	20,000,000¥
法定耐用年数　n	7 年

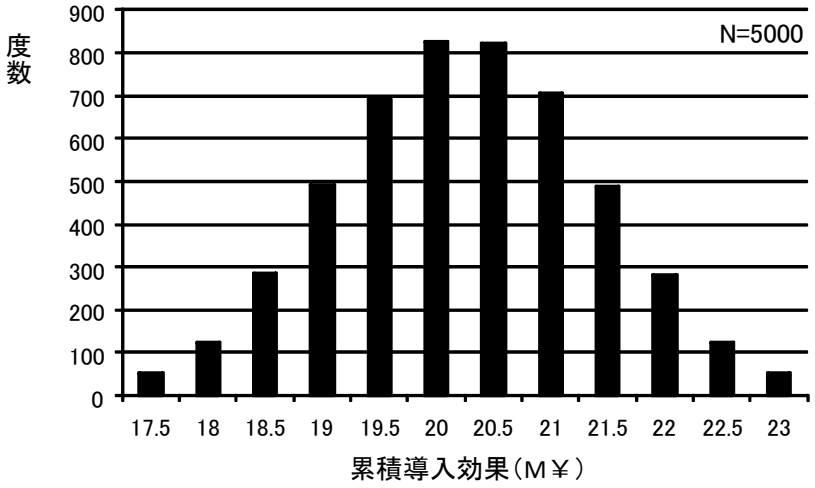

図 4.8　累積導入効果の度数分布

4.4.2 評価結果

表 4.1 の条件に従い、オプション行使サービス利用者比率 b を 1.0 とし、サービス提供者の売上増減 $Ru-Rd=0$ とした場合、オプションを行使するサービス利用者の比率 U'/U は 0.72、オプションを行使するサービス利用者の期待利益 R は平均 11.6k¥、オプション価格 P は 4.8k¥と価格付けされる。オプションを行使できないリスクが 28%あるが、オプションを購入したサービス利用者の期待利益率は 1.74 となる。サービス利用者から見た場合に魅力的な利回りのオプション価格と考えられ、サービス利用者によるリスク分担が可能になる。

図 4.9 には、オプション行使サービス利用者比率 b のオプション価格 P への影響を示す。オプション行使サービス利用者比率 b が下がれば、オプション行使による売上減少量 Rd が減少することから、オプション価格 P が下げられ、オプション価格 P が下がることによりオプション行使者の期待利益率はさらに増大する。

表 4.2 には、発生する省エネルギーのボラティリティ σ を変化させた場合の、利用効果が高いサービス利用者比率 U'/U とサービス利用者期待利益 R の関係を示す。予想に反して、ボラティリティ σ が小さい方が、買い取りオプションからの期待利益 R が大きい。表 4.3 に示すように、ボラティリティ σ が小さい場合、累積効果 $E(n)$ が取得価格 $V(0)$ を下回るケースでも、年度別に見ると時価 $\Sigma E(k)$ が簿価 $V(k)$ を上回る回数が多くなることが原因だと考える。

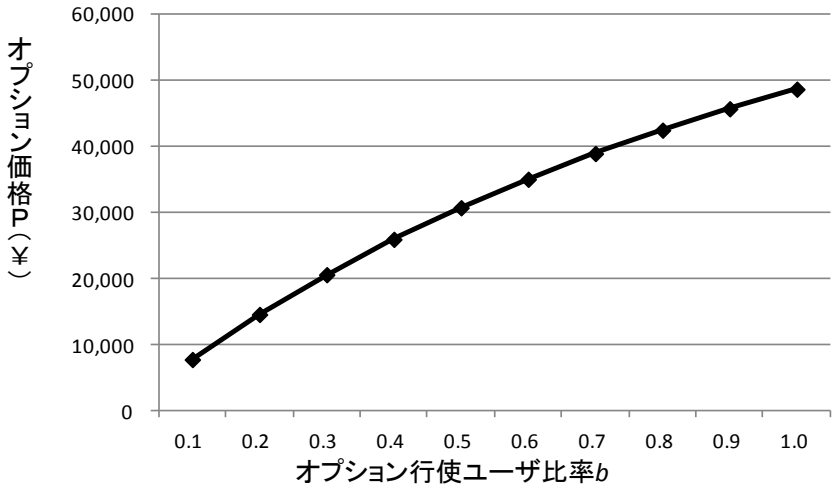

図 4.9　オプション行使サービス利用者比率 b のオプション価格 P への影響

表 4.2　ボラティリティ σ の影響

ボラティリティ σ	2500kwh/月	5000kwh/月	7500kwh/月	10000kwh/月
利用効果が高い ｻｰﾋﾞｽ利用者比率 U'/U	0.88	0.72	0.67	0.61
サービス利用者期待利益 R	122k¥	117k¥	97k¥	95k¥

表 4.3　簿価と時価の年度別の関係（サンプル）

	累積	1 年目	2 年目	3 年目	4 年目	5 年目	6 年目
簿価	20.0M¥	19.1M¥	16.3M¥	13.4M¥	10.6M¥	7.7M¥	4.9M¥
時価(サンプル)	19.8M¥	17.3M¥	14.9M¥	12.5M¥	10.1M¥	7.7M¥	5.0M¥

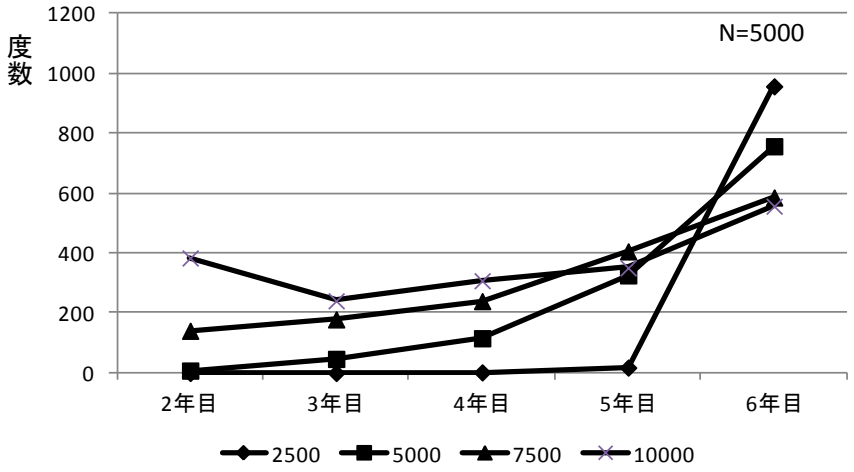

図 4.10　ボラティリティ σ による行使年度と行使度数の関係

図 4.10 には、ボラティリティ σ を 2500kwh/月、5000kwh/月、7500kwh/月、10000kwh/月と変化させた場合に、買い取りオプションが行使される年度別の度数を示す。ボラティリティ σ が小さい方が後半の年度で買い取りオプションを行使している回数が多い。これが、表 4.2 に示された、ボラティリティ σ が小さい方が買い取りオプションの期待利益 R が大きいという評価結果の要因となっていると考える。

4.5　結言

本章では、機器提供型サービス導入後の導入効果が予想と異なった場合に、サービス提供者に発生する損失をサービス利用者に分担して貰う買い取りオプションに関して、サービス利用者から見た買い取りオプションの価値を算出する「買い取りオプション価値評価部」と、サービス提供者の売上のトレードオフを評価する「サービスポートフォリオ評価部」とを連携し、サービス利用者とサービス提供者とのリスク分担を調整する買い取りオプションの価格付け方法を提案した。本章で提案した買い取りオプションのプライシング方法により、第 1 に、買い取り時点での価格交渉が不要となり、第 2 に、サービスポートフォリオ全体での収益率低下を回避できる。本章では、実際に機器提供サービスを導入しているボイラー通風装置の稼働データを基にして、高圧インバータを用い省エネルギー効果を提供する機器提供型サービスを評価対象とし、サービス提供者にとっての収益率低下を回避する買い取りオプション価格を試算するとともに、サービス利用者にとって魅力的な利回りのオプション価格となることを示した。また省エネルギー効果のボラティリティが買い取り価格とオプション行使に与える影響を評価し、どのようなボラティリティ特性をもつサービスの場合に買い取りオプションが効果的かを検討した。

本章では、オプション行使サービス利用者比率 b をあらかじめ与えられるパラメータとして評価を行った。しかし実際には省エネルギー効果が大きい場合には、買い取りオプションのオプション行使サービス利用者比率 b は向上すると考えられる。逆に、省エネルギー効果が小さい場合には、オプション行使サービス利用者比率 b は低下すると考えられる。オプション行使サービス利用者比率 b を推定する方法を検討するとともに、省エネルギー効果の変動に応じて変動するオプション行使サービス利用者比率 b に基づき、買い取りオプションの価格をプライシングする方法の検討が残された課題である。

第5章　結論

5.1　本研究のまとめ

本論文では、機器提供型サービスのサービス提供者による適正なサービス運営ならびにサービス利用者による適切なサービス選択を目的に、機器提供型サービスにおけるサービス提供者とサービス利用者のリスク分担に基づいた意思決定技術に関する研究成果を、以下の 4 章に分けて述べた。

第 1 章では、機器提供型サービスの背景を説明するとともに、機器提供型サービスの利用・提供のためには、リスク分担をサービス利用者とサービス提供者両方の立場から評価し意思決定する必要性を論じた。そして、サービス利用者のサービス選択におけるリスク回避評価という課題と、サービス提供者のリスク負担の低減・最適化という課題の２つの課題を整理した。そして、1 つ目の課題に対しては、操業リスクに応じた選択権（オプション）によるリスク回避効果の有無および大小を評価する方法の研究、2 つ目の課題に対しては、第 1 に機器導入先を選定しリスク分担を低減する方法の研究、第 2 にリスクを分担するプライシング方法の研究を、研究方針として示した。

第 2 章では、「サービス利用による利用者のリスク回避の評価」という課題にて対して、機器提供サービスを導入により得られる導入効果の変動を定量評価するリスクモデルと、機器提供型サービスを導入した場合のリスク回避効果を定量評価するオプションモデルを定義することで、平均額だけではなく最大損失想定額の観点から、各サービスが提供するリスク回避の効果を評価する手法を提案した。本手法は、経済環境や事業環境による機器価格の変動や導入効果の変動といった、従来は充分に対応できなかった操業リスクを考慮したうえでの機器提供サービス選択の意思決定に有効である。さらに、系統電源サービスと分散電源を購入する場合とを比較する事例を説明し、系統電源サービスにおけるリスクモデルを定義し、電力需要量変化に応じて契約変更、解約するオプションモデルを定義した。最後に、評価対象を平均的な高圧電力需要家とした評価を実施し、提案方式によるサービス選択方式ならびに他サービスへの切り替えタイミング決定方式を示した。リスク回避のオプション提供にあたり、サービス提供者もサービス利用者のリスクを分担することになるが、第 2 章ではサービス選択という観点よりサービス利用者側の視点で論じた。

第 3 章では、「サービス提供者のリスク負担の 低減・最適化」という課題に対して、同一または同一業種のサービス利用者に複数機器を提供した場合に、導入メリット変動に相関の高い機器が多数含まれ、機器導入先の組み合わせによりサービス全体収入の分布幅が大きく影響されることを論じ、サービス提供者の事業リスクを考えた場合、平均収入と最低収入の両面から適正化することが有効であることを論じた。そこで、利用効果リスクを考慮した導入先選定問題の定式化し、分枝限定法を用いて高速に導入先を選定する方式を提案した。さらに、導入先選定問題における初期暫定解とノード上限値の求め方を整理した。最後に、省エネルギー機器提供型サービスにおいてサービス利用者工場内の複数設備（モータ）に省エネルギー機器を複数提供するケースに適用し、導入先選定問題の定式化と分子限定法を用いた導入先選定方式ならびに選定時間を評価し、その有効性を示した。

第 4 章では、同じく「サービス提供者のリスク負担の 低減・最適化」という課題に対して、機器提供型サービス導入後の導入効果が予想と異なった場合、サービス提供者に発生する損失をサービス利用者に分担して貰う買い取りオプションに関して、サービス利用者から見た買い取りオプションの価値を算出する「買い取りオプション価値評価部」と、サービス提供者の売上のトレードオフを評価する「サービスポートフォリオ評価部」とを連携し、サービス利用者とサービス提供者とのリスク分担を調整する買い取りオプションの価格付け方法を提案した。本方法はサービス提供者の抱えるリスクを複数のサービス利用者に広く分担して貰う場合に有効である。実際に機器提供サービスを導入しているボイラー通風装置の稼働データを基に機器提供型サービスを評価し、サービス提供者にとっての収益率低下を回避する買い取りオプション価格を試算するとともに、サービス利用者にとって魅力的な利回りのオプション価格となることを示した。

5.2　今後の課題

最後に今後の課題について述べる。

(1) オプション行使判断とリスク変動速度の影響評価・検討

本論文での、「サービス利用による利用者のリスク回避の評価」では、リスク変動が充分緩やかで、リスク回避オプションが行使後に充分機能するケースにて提案方式を評価した。しかし実際には、オプション行使が追いつけない程にリスクが変動した場合には、オプション行使による効果がなくなる、さらには逆向きに制御を行い業績悪化に繋がることが予想される。どこまで急激なリスク変化に対応できるのか、急激なリスク変化の場合にオプション行使をどう意思決定するべきかに関する評価が今後の課題である。

(2) 時間方向のリスク結合を考慮した方法の検討

本論文で検討した「リスク結合を考慮した導入先選定方法」では、複数の機器を同時に提供するケースを想定して手法を提案し評価した。しかし実際には、機器の老朽化状況や定期修理時期により、多くの場合に導入タイミングは同時にはならない。このように導入タイミングのずれといった時間方向のリスク結合を考慮した方法の検討が残された課題である。

(3) リスクに関する情報の非対称性とリスク分担方法の検討

本論文で検討した「機器買い取りオプションのプライシング方式」では、オプション行使サービス利用者比率 b などを与えられたパラメータとした。しかし実際には省エネルギー効果が大きいと予測されるサービス利用者のオプション購入比率は高くなり、省エネルギー効果が小さいと予想されるサービス利用者のオプション購入比率は低くなると考えられる。このようにリスクに関する情報の非対称性と、非対称性がある状況下でも上手にリスク分担を設計する方法が残された課題である。

謝辞

本研究の全過程を通じ、懇切なるご指導、ご鞭撻を賜った大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻　薦田憲久教授に心から感謝の意を表します。

大学院博士後期課程において、情報システム工学全般に関して親切なるご指導とご助言を賜るとともに、本研究をまとめるにあたり、貴重なお時間を割いて頂き、丁寧なるご教示を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻　藤原融教授、細田耕教授に謹んで深謝の意を捧げます。

大学院博士後期課程において、情報システム工学全般に関して親切なるご指導とご助言を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻、西尾章治郎教授、下條真司教授、岸野文郎名誉教授に深く感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、ファイナンス工学全般ならびにリアル・オプションに関して親切なるご指導とご助言を賜りました日本リアルオプション学会副会長の青山学院大学高森寛名誉教授に深く感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、共同研究者として入社以来直接ご指導頂き、有益なるご助言を頂きました。(株)日立製作所横浜研究所情報サービス研究センタ長の赤津雅晴博士、(株)日立製作所情報・通信システム社経営戦略室主管の安信千津子博士に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、共同研究者としてご助言を頂きました。(株)日立製作所横浜研究所サービスイノベーション研究部の中川忠輔博士に厚く御礼申し上げます。

第 2 章のリスク評価ならびにオプション評価手法の電力分野への適用に関して、ご指導、ご支援を頂きました、(株)日立製作所インフラシステム社電力システム本部 本部長付の馬渕祐一氏、大東幸雄氏、同じく担当本部長の多賀正光氏、(株)日立製作所インフラシステム社経営企画本部長の水上潔氏、(株)日立製作所インフラシステム社情報制御システム品質保証本部の伊村芳彦氏に深く感謝申し上げます。

第 3 章の機器導入先選定、および、第 4 章の買い取りオプションプライシング研究の省エネルギー機器提供サービスへの適用に関して、ご指導、ご支援を頂きました。(株)日立製作所情報制御システム事業部ＰＥ部元担当部長(現トモソウジャパン(株)代表取締役)の

藪谷隆氏、(株)日立製作所インフラシステム社電機システム本部　主任技師の阿部純氏にに深く感謝申し上げます。

本研究の機会を与えて頂くと共に、暖かい御指導と御鞭撻を賜った、(株)日立製作所 情報・通信システム社 技師長の前田章博士、(株) 日立製作所横浜研究所 元主管研究長の舩橋誠壽博士、(株)日立製作所横浜研究所 元第1部部長(現神奈川大学)の瀬古沢照治教授に心から御礼申し上げます。また、本研究にともに携わり、様々なご討論、ご助言を頂きました、(株)日立製作所横浜研究所インフラシステム研究部の渡辺徹研究員、(株)日立製作所社会イノベーション・プロジェクト本部の宮田真技師他、多くの方々に感謝申し上げます。

最後に、いつも暖かく励ましてくれた両親、妻、娘に深く感謝します。

参考文献

[1] (独)産業経済研究所 BBL セミナー: “我が国の ESCO 事業の動向”, http://www.rieti.go.jp/jp/events/bbl/05111401.html, RIETI 編集部 (2005).

[2] “官庁施設における ESCO 事業導入・実施マニュアル”, 国土交通省　大臣官房　官庁営繕部　設備・環境課 (2011).

[3] 松本久幸, 杉浦厚, 藪谷隆, 嶋田恵三: “ドライブソリューションによるプラント設備の省エネルギー技術”, 日立評論, Vol.90, No.5, pp. 418-419 (2008).

[4] 赤津雅晴: “成功するアウトソーシングの勘所”, 情報処理, Vol.46, No.5, pp. 534-539 (2005).

[5] 情報処理推進機構: “ビジネスグリッドが切り開く次世代IT基盤”, アスキー (2006).

[6] 産業技術総合研究所グリッド研究センター: “グリッド—情報社会の未来を紡ぐ”, 丸善 (2004).

[7] 宮田征門, 吉田治典, 浅田昌彦, 岩田卓郎, 田辺陽一, 柳澤忠宏: “実 ESCO プロジェクトにおけるベースライン簡易補正手法の比較検討”, 空気調和・衛生工学会論文集, Vol.119, pp.7-15 (2007).

[8] 張琦, 小坂満隆, 白肌邦生, 藪谷隆: “サービス概念に基づく企業間共創プロセスモデルの提案と省エネサービスビジネスへの適用”, 電気学会論文誌 C、Vol.132, No.6, pp.1035-1040 (2012).

[9] 谷繁幸: “機器提供型サービス事業におけるリスク管理”, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp. II-161-166 (2003).

[10] R. J. Camporeale: “Modeling Risks Associated with Full Requirements Service”, in *Proceeding of the IEEE Conference of Power Engineering Society Summer Meeting 2001*, Vol.1, p.656 (2001) .

[11] A. Dumrongsiri, A. Jain, and K. Moinzadeh: “Analysis of an Inventory Model in Subscription-Based Rental Service with Two-Classes of Customers”, in *Proceeding of the IEEE Conference of Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2008)*, pp.1055-1059 (2008).

[12] Y. Xiong and Y. Zhou: "The Decision Policies of Accepting or Rejecting Rental Request on Its Different Start and End Time", in *Proceeding of the IEEE Conference of Management and Service Science(MASS '09)*, pp.1-4 (2009) .

[13] Z. Yang, H. Qingmiao, L. Changbin, and S. Jinying: "Analysis of the EPC period deciding model based on the Game Theory", in *Proceeding of the IEEE Conference of Service Systems and Service Management 2008*, pp.1-5 (2008).

[14] 小坂満隆, 藪谷隆: "インバータを利用した省エネルギー・CO2 排出量削減に対するサービスビジネスモデルに関する一考察", 電気学会論文誌 C, Vol.129, No.4, pp.755-761 (2009).

[15] M. Bannai and Y. Tomita: "Influence of Fuel Price Fluctuation on Revenue in Energy Service Business and Risk Hedge", in *Proceeding of the IEEE Conference of Power Engineering Society General Meeting 2005*, Vol.1, pp.9-16 (2005).

[16] H. Qing-miao and Z. Song-lin: "Analysis of Building Energy Efficiency Service Market Entrance Uncertainty Based on Option Gambling Theory", in *Proceeding of the IEEE Conference of Management Science and Engineering (ICMSE 2011)*, pp.1180-1184 (2011).

[17] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴, 薦田憲久: "契約の柔軟性を考慮した電力サービス選択の分析手法", 電気学会論文誌 C, Vol.127, No.12, pp.2159-2165 (2007).

[18] S. Tani, M. Akatsu, and N. Komoda: "Electric Power Service Selection Considered Flexibility of Contract", in *Proceeding of 12th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA2007)*, pp.599-603 (2007).

[19] 谷繁幸, 藪谷隆, 薦田憲久: "サービス事業におけるリスク回避効果の経済性評価", 電気学会情報システム研究会, IS-08-9, pp.43-46 (2008).

[20] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: "リアル・オプション評価手法を用いた電力需給契約の評価手法", 電気学会情報システム研究会, IS-05-11, pp.21-26 (2005).

[21] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: "情報ユーティリティサービスにおける価値評価方法", 電気学会情報システム研究会, IS-07-21, pp.27-30 (2007).

[22] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: "ユーティリティサービスにおける柔軟性価値可視化の検討", 電気学会 C 部門大会, p.300 (2006).

[23] 谷繁幸, 中川忠輔, 薦田憲久: "機器提供型サービスにおけるリスクを考慮した導入先選定方法", 電気学会論文誌 C、Vol.132, No.2, pp.319-324 (2012).

[24] S. Tani, T. Nakagawa, and N. Komoda: "Plants Selection Method for Equipment Service Considering Use Effect Risk" in *Proceeding of the 4th Japan-China Joint Symposium on Information Systems (JCIS 2011)*, pp.47-50 (2011).

[25] 谷繁幸, 中川忠輔, 薦田憲久: "機器提供型サービスにおける導入先選定方法の考察", 電気学会平成 23 年全国大会, 4－211, p.362 (2011).

[26] T. Nakagawa, S. Tani, C. Yasunobu, and N. Komoda: "Business Risk Management Based on a Service Portfolio Approach for an Equipment-Providing Service", in *Proceeding* of *the 2nd edition of the Int. Workshop on Certification and Security in Inter-Organizational E-Services* (CSES-2004), within the IFIP 2004 World Computer Congress(WCC2004), pp.85-90 (2004).

[27] T. Nakagawa, S. Tani, C. Yasunobu, and N. Komoda: "Pricing Method Based on Service-portfolio Approach to Equipment-providing Services", *Studies in Informatics and Control*, Vol.15, No.1, pp.103-112 (2006).

[28] S. Tani, T. Nakagawa, and N. Komoda: "The Pricing Method of the Purchase Option by the Book Value for Equipment Service", *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, Vol. 5, Issue 6, pp.738-745 (2011).

[29] S. Tani, T. Nakagawa, and N. Komoda: "Equipment Diversion Design Method in Equipment Service", in *Proceeding of 3rd World Multi conference on Applied Economics, Business and Development (AEBD '11)*, pp.26-29 (2011).

[30] 谷繁幸, 中川忠輔, 薦田憲久: "機器サービスにおける機器転用設計法", 電気学会情報システム研究会, IS-10-73, pp.1-4 (2010).

[31] 山家公雄: "電力自由化のリスクとチャンス", エネルギーフォーラム (2001).

[32] "平成 11 年度　分散電源用高効率マイクロガスタービン発電システムに関する調査報告書", (財)エネルギー総合工学研究所 (1999).

[33] M. Miyake, and T. Nanahara: "Competition and Cooperation of Distributed Generation and Power System-Case Study on Cogeneration System-", in *the Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan B*, Vol.125, No.2, pp.147-156 (2005).

[34] Y. Fujii: "Future Prospect and Issues of Distributed Energy Systems", in *the Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan B*, Vol.125, No.9 pp.833-836 (2005).

[35] “電力小売市場の自由化について”, 経済産業省エネルギー庁　電力・ガス事業部電力市場整備課, http://www.enecho.meti.go.jp/denkihp/genjo/seido.pdf (2012).

[36] “新エネルギーの展望 コジェネレーション技術”, (財)エネルギー総合工学研究所 (2002).

[37] 塙雅一: “産業間連携による省エネルギーについて”, 季報エネルギー総合工学, Vol.27, No.2, pp.86-96 (2004).

[38] 電力事業講座編集委員: “電力料金”, 電力新報社 (1997).

[39] 野口悠紀雄, 藤井真理子: “金融工学　ポートフォリオ選択と派生資産の経済分析”, ダイヤモンド社 (2000).

[40] L. Trigeorgis: “Real Option - *Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*”, The MIT Press (1996).

[41] A. Martha, and K. Nalin: “Real Options - *Managing Strategic Investment in an Uncertain World*”, Harvard Business School Press (1998).

[42] 経済産業省関東経済産業局: http://www.kanto.meti.go.jp/tokei/

[43] “エネルギー白書 2004”, 経済産業省資源エネルギー庁, http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2004/

[44] P. Baumgartner and R. Wise: “The New Profit Imperative in Manufacturing”, *Harvard Business Review*, September, pp.133-141 (1999).

[45] 薮谷隆: “ニュービジネスモデル HDRIVE による高圧モータの省エネルギー”, 紙パ技協誌, Vol. 60, No. 6, pp.840-847 (2006).

[46] 中川忠輔, 谷繁幸, 安信千津子: “機器提供サービス事業におけるリスク管理”, 計測自動制御学会第４回制御部門大会, pp.667-670 (2004).

[47] 福山良和, 戸高雄二: “ユーティリティ設備の最適運転による省エネルギー”, 計測と制御, Vol.45, No.10, pp.871-874 (2006).

[48] 大和証券法人ビジネス部: “企業オーナーのための M&A 読本”, ビジネス教育出版 (2008).

[49] 中川忠輔, 谷繁幸, 赤津雅晴, 薦田憲久: “IT 投資戦略立案のための相乗効果を考慮したロードマップ構築手法”, 電気学会論文誌 C, Vol.126, No.7, pp. 919-925 (2006).

[50] S. Tani, T. Nakagawa, and M. Akatsu: “Portfolio Management Method in IT Property” in *Proceeding of the 10th WSEAS International Conference on Mathematics and Computers in Business and Economics (MCBE'09)*, pp.217-220 (2009).

[51] 吉川裕, 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “情報化投資の管理手法の提案”, 情報処理学会第 70 回全国大会講演論文集, No4, pp.441-442 (2008).

[52] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “IT ポートフォリオ管理手法”, プロジェクトマネジメント学会研究発表大会予稿集 2007(秋季), pp.352-353 (2007).

[53] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “IT ポートフォリオ管理における IT 資産評価手法”, 電気学会情報システム研究会, IS-07-12, pp.7-12 (2006).

[54] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “IT ポートフォリオ管理手法”, 経営情報学会・オフィス・オートメーション学会合同・第５２回春季全国研究大会全国研究発表大会要旨集, pp.314-317 (2006).

[55] 赤津雅晴, 谷繁幸, 吉川裕, 中川忠輔: “合意形成を促進する IT 投資マネジメント手法の提案”, 経営情報学会・オフィス・オートメーション学会合同・第５２回春季全国研究大会全国研究発表大会要旨集, p.51 (2006).

[56] 吉川裕, 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “関係者間の合意形成を重視した IT 投資評価の一手法”, 経営情報学会・オフィス・オートメーション学会合同・第５２回春季全国研究大会全国研究発表大会要旨集, p.20 (2006).

[57] 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “IT 資産におけるポートフォリオ管理手法”, 電気学会情報システム研究会, IS-05-64, pp.45-50 (2005).

[58] 吉川裕, 谷繁幸, 中川忠輔, 赤津雅晴: “IT 投資評価手法の提案”, 電気学会情報システム委員会, IS-04-34, pp.17-22 (2004).