

情報技術を活用した新しいデマンドサイドマネージメントの 枠組みに関する検討

(課題番号14350144)

平成14年度～平成16年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))

研究成果報告書

横浜国立大学附属図書館



11643578

平成17年5月

大山 力

(国立大学法人横浜国立大学大学院工学研究院)

54009

横浜国立大学附属図書館



11643578

はしがき

限られた資源を有効に利用し、環境への影響を少なくするために、デマンドサイドマネジメントが注目されている。デマンドサイドマネジメントを行うことにより、電気エネルギー供給システム全体として省エネルギーを達成し、過剰な設備投資を回避できることが期待されている。

本研究は、電力技術に情報技術を融合させることによって個別の需要家の要求に応えられるようなきめ細かなデマンドサイドマネジメントがどうあるべきかについて検討し、規制緩和との両立を図ることを目的としたものである。そのために、まず、「需要家の消費動向のモデル化」および「効果的なデマンドサイドマネジメント実現のために需要家に提示するメニューの考案」についての検討を行った。現状では電力貯蔵設備及び変換設備のコストが高いため、供給コストに与える影響まで考慮すると、信頼度上昇のみではなく、選択的に信頼度を低下させた方が社会厚生が向上することも考えられるので、信頼度別マルチメニューサービスの一つとしての選択的負荷遮断契約のあり方について考察した。

また、機器の直接制御と電力価格提示による間接制御を組み合わせたリアルタイムデマンドサイドマネジメント方式の検討を進めた。間接制御の一形態として、需要家への報奨金に基づくシステム（報奨金型デマンドサイドマネジメント）を考案し、その有効性について検討を行った。報奨金型デマンドサイドマネジメントは、多くの需要家が参加できる方式であるため、大きな効果が期待できる。報奨金制度（間接制御）と直接制御を組み合わせた方式によれば、需要家の効用を大きく損なうことなく系統側の設備投資を減少させることができ、社会余剰の増加が期待できること、また、CO₂ 排出量の削減も期待できることがわかった。

本報告書は二部構成となっている。第一部は「選択的負荷遮断契約が需要家側・供給側に与える経済効果に関する検討」で、主として選択的負荷遮断契約の効果について検討を行っている。第二部は「アドバンスドDSMが社会余剰・環境へ及ぼす影響」で、報奨金制度（間接制御）と直接制御を組み合わせた方式について検討を行っている。

研究組織

研究代表者：大山 力（国立大学法人横浜国立大学大学院工学研究院）

交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成14年度	3300	0	3300
平成15年度	3100	0	3100
平成16年度	1600	0	1600
総計	8000	0	8000

研究発表

(1) 口頭発表

M. Nakamura, A Study on Supply Side and Demand Side Economical Effect of Interruptible Load Contract, International Conference on Electrical Engineering, July 2002

中村 光宏、需要家端における選択的負荷遮断契約が需要家側・供給側に与える影響、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、2002年9月

近藤 芳樹、リアルタイム料金設定が環境と社会余剰に及ぼす影響、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、2004年9月

第一部

選択的負荷遮断契約が需要家側・供給側に
与える経済効果に関する検討

要約

近年電気事業を取り巻く環境は大きな変化を見せている。世界各国において電気事業に関する法的規制緩和が進行し、電力市場自由化の波が押し寄せていることである。この規制緩和の流れのなかで電気事業は大きな変革を迫られている。我が国も徐々にではあるが電力市場自由化の方向に向かっている。また、1997年に京都議定書において二酸化炭素等の温室効果ガスの削減目標が定められた。これより、環境に対する影響を減らすために、省エネルギーの必要性が唱えられている。

このように、現在、電気事業ならびに電力システムは大きな転換期を迎えている。規制緩和後の将来の電力システム、とりわけ需要家に直接電力を供給する役目を担う配電システムは、これまでも増して需要家サービスを重視し、環境に配慮した考え方、システム作りをしていく必要がある。

こうした背景から、次世代を見据えた未来型電気エネルギー供給システムの枠組みを構築する必要があるとの認識を世界の研究者が持つようになってきている。その中で、高柔軟・高信頼電力供給を目的としたエネルギー流通システム(FRIENDS : Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery System) やホームエネルギーマネジメントシステム(HEMS : Home Energy Management System)等が将来の電力分野における省エネルギー対策に対応できる情報ネットワークを活用した未来型電気エネルギー供給システムとして提案されている。

本論文では、FRIENDS や HEMS 等で導入可能な選択的負荷遮断プログラムという供給プランを考え、その機能である負荷遮断電力と通常電力の品質別電力供給が導入された際に需要家・供給側にどのような経済効果が及ぶのかについて調べた。影響を考察する際に各機器の限界効用を求め [7]、それをもとに効用曲線を描き、需要家が合理的に行動するように仮定し、需要家に及ぼす影響とその時の供給側の影響についての検討を行った。更には、発電電力量・過剰設備の削減による二酸化炭素排出量の削減に関する検討も行った。その結果、従来の単一品質による電力供給よりも、選択的負荷遮断プログラムを導入し品質別電力供給を行った方が消費者余剰を改善することができ、供給側にもメリットがあり、環境への影響も小さくなることが分かった。

目次

要約

1. 序論	1-4
2. 未来型電気エネルギー供給システム	1-7
2.1 高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (FRIENDS)・・・	1-7
2.2.1 FRIENDS の目的	1-7
2.1.2 FRIENDS の機能	1-9
2.2 ホームエネルギーマネジメントシステム (HEMS)・・・	1-11
2.2.1 HEMS の目的	1-11
2.2.2 HEMS の機能	1-12
3. 選択的負荷遮断プログラム	1-14
4. 品質別供給と消費者余剰	1-16
4.1 品質別電力供給によるメリット	1-16
4.2 効用の計算法	1-17
4.3 需要曲線の求め方	1-19
4.4 品質別需要量の把握	1-21
5. 負荷遮断契約を選択する条件	1-24
5.1 供給側の条件	1-24
5.2 需要家側の条件	1-26

6. シミュレーション結果	1-29
6.1 簡略なモデル	1-30
6.2 供給予備力を考慮したモデル	1-36
6.2.1 社会厚生を最大化した場合	1-37
6.2.2 供給側が利潤を持たない場合	1-41
7. 結論	1-44
付録	1-46
参考文献	1-48
発表文献	1-49

第1章

序論

近年電気事業を取り巻く環境は大きな変化を見せている。一つは、世界各国において電気事業に関する法的規制緩和が進行し、電力市場自由化の波が押し寄せていることである。この規制緩和の流れのなかで電気事業は大きな変革を迫られている。例えば、英国では1990年に国有電気事業が民営の発電・送電・配電会社へ分割された。それ以降、多くの欧米諸国でも同様に規制緩和による電気事業の再編が実施されている。我が国においても、1995年に電気事業法が31年ぶりに大幅改正された。その内容は、新規電源に対する競争入札制の導入、特定電気事業（特定地域内の一般需要家に対する小売電気事業）の創設、並びに卸・自己託送の許可条件の緩和が主たるものであり、我が国も徐々にではあるが電力市場自由化の方向に向かっている。さらに、一部では電気事業法の更なる改正を年頭に置きつつ、一般小売部門の部分自由化を進める議論もある。

二つ目は、1997年に京都議定書において温室効果ガスの削減目標が採択された。日本国内の二酸化炭素総排出量の4分の1を占める電気事業としては地球環境が大切なことは明らかである。そこで、限られた資源を有効に利用し、環境への影響を減らすために電力システムを効率的に運用する事が求められていることである。そこで、供給側対策だけでなく需要家側にも協力してもらおうという考え方(DSM：Demand Side Management)が注目されている。DSMは、供給側が需要家側に対して積極的に働きかけ、両者の協調に基づき、電力事業だけでなく資源、環境まで含めた総合的効率の向上を行おうとするものである。DSMを行うことにより、電気エネルギー供給システム全体として省エネルギーを達成し、過剰な設備投資を回避出来ることが期待されている。

三つ目は、需要家の電力供給に対する要望の拡大がある。近年、コンピュータやそ

のネットワーク化による情報通信機器や制御器利用の普及は、都市部を中心に需要家が受けとる電力品質に対して、極めて高い品質が要求されている一方、一部の照明や加熱などの用途では、その品質よりも価格の方が優先されるものと考えられる。すなわち、電気利用の多様化は品質と価格の異なる組み合わせサービス（いわゆる多品質電力供給サービス）の潜在需要に結びつくものである。こうした多品質電力供給は、現行の配電システムではシステム的に実現が困難であると考えられる。つまり、多品質電力供給の実現に際して、双方向の情報のやり取りが可能な高機能通信ネットワークを構築する必要がある。

そのためには、需要家ごとのニーズ、状況に応じて、きめ細かなオプションを用意して対応するといったことが望まれる。DSM によって過剰な設備投資が回避でき、コストダウンがはかれることは当然需要家にとって望ましい。したがって、そのメリットを損なわないような「優しい」DSM が実現されれば需要家にとっても満足出来るものとなる。また、アドバンスド DSM によって情報提供が行われ、需要家の選択肢が増えれば、需要家は主体的に電気事業と関わることになる。それによって需要家は電気エネルギー供給システムに対する関心が高まることが期待できる。そのような DSM を実現するためには、双方向情報通信によって需要家個々の状況をリアルタイムで把握し、それに応じた DSM 対策を提示するといったように発展著しい技術情報の活用が必須となる。アドバンスド DSM は情報技術の積極的な活用によって初めて実現可能となるものと考えられる。

このように、現在、電気事業ならびに電力システムは大きな転換期を迎えている。規制緩和後の将来の電力システム、とりわけ需要家に直接電力を供給する役目を担う配電システムは、これまでも増して需要家サービスを重視した考え方、システム作りをしていく必要がある。このような次世代の配電システムは、「配電システム」というより、むしろ「電気エネルギー供給システム」、あるいはコージェネレーションシステムの地域熱併給を含めてもっと幅広く「総合エネルギーサービス」などと呼ばれる方が適切となるであろう。

こうした背景から、次世代を見据えた新しい高機能な電気エネルギー流通システムの枠組みを構築する必要があるとの認識を世界の研究者が持つようになってきている。すなわち、規制緩和後の将来の電力流通システムとして、様々な装置を利用して柔軟に系統構成を変更したり、供給信頼度の高い電力や波形品質の面でも優れた電力、さらには高度情報化サービスにより付加価値を付与したりする電力輸送形態の実現に関して、世界的に様々な議論がなされている。その中で、高柔軟・高信頼電力供給を目的としたエネルギー流通システム(FRIENDS : Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery System)やホームエネルギーマネジメントシステム(HEMS : Home

Energy Management System)等が将来の電力分野における省エネルギー対策に対応できる情報ネットワークを活用した未来型電気エネルギー供給システムとして提案されている。

本論文では、FRIENDS や HEMS 等で導入可能な選択的負荷遮断プログラムという供給プランを考え、その機能である負荷遮断電力と通常電力の品質別電力供給が導入された際に需要家・供給側にどのような経済効果が及ぼされるのかについての検討を行った。影響を考察する際に過去に研究室で行ったアンケートから求めた各機器の限界効用[7]から効用曲線を描き、需要家が合理的に行動するように仮定し、需要家に及ぼす影響とその時の供給側の影響についての検討を行った。更には、発電電力量・過剰設備の削減による二酸化炭素排出量の削減に関する検討も行った。

第2章

未来型電気エネルギー供給システム

将来の電力システムでは、コンピュータの普及やネットワーク化による情報通信技術の発達すると考えられていることから、需要家とリアルタイムに情報を交換しようという動きが高まっている。また、需要家のニーズの多様化に対する様々な料金プランの設定や、環境に対する影響を減らすために電力システムを効率的に運用する動きがある。そういった動きに対応できるようなシステム、未来型電気エネルギー供給システムが提案されている。

ここでは、未来型電気エネルギー供給システムのひとつである高柔軟・高信頼電気エネルギー流通サービス(FRIENDS)とホームエネルギーマネジメントシステム(HEMS)について紹介する。

2.1 高柔軟・高信頼電気エネルギー流通サービス (FRIENDS) [3],[14]

2.1.1 FRIENDS の目的

規制緩和後における将来の電力流通システムは、従来の配電システムのような電力供給者から需要家への一方向の電力流通のみを取り扱うシステムではなく、将来に起こりうる様々な電力システムの変化に対し、柔軟にかつ高信頼で応えることができ、需要家と供給者との双方向な情報サービスが可能な特性を持つことが求められている。このような背景を踏まえ、FRIENDS は、従来から国内外で個別に検討されていた配電システムの自動化・近代化、並びに省エネルギー方策などの話題を統合し、システム

に柔軟性および高信頼性を持たせたところに特徴がある全く新しい概念であり、需要家のすぐ近くに「電力改質センター」を導入することによって、次項に述べる項目を実現することを目的として提案された未来型電気エネルギー供給システムである。

図1に FRIENDS の全体イメージ、図2に FRIENDS のネットワーク構成例、図3に電力改質センターの内部構成例を示す。

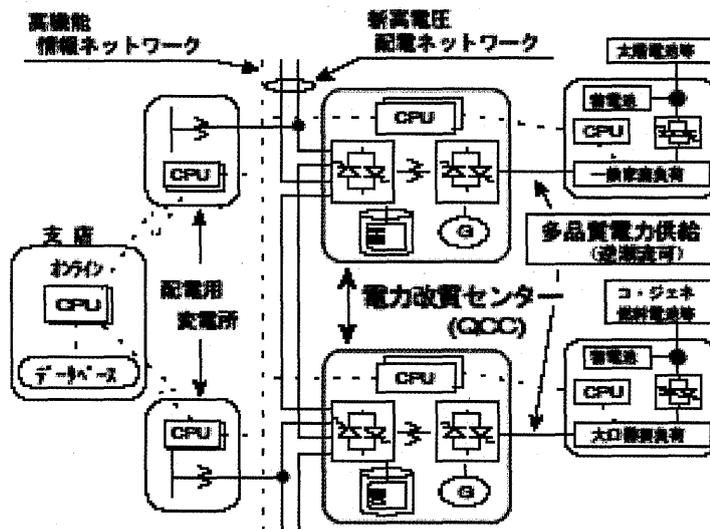


図1: FRIENDS の全体イメージ

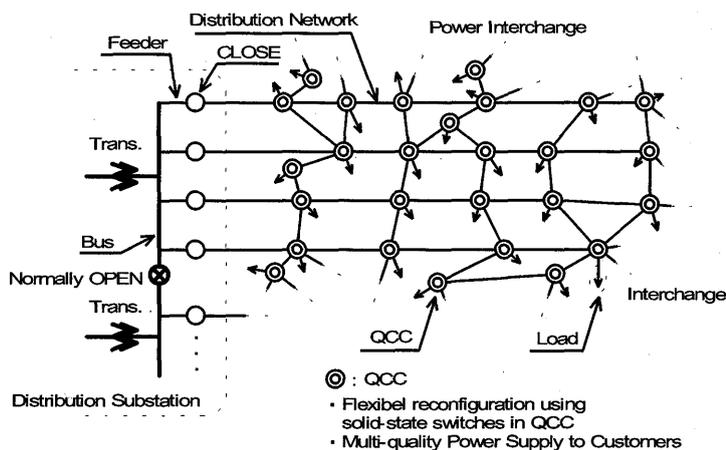


図2: FRIENDS のネットワーク構成例

FRIENDS の電力供給形態は、現行の配電システムのように、放射状高圧配電線に沿った柱状変圧器から需要家に単一品質の電力を供給する方式ではなく、電力改質センターが配電ネットワークのノードの役割を果たし、あたかも電力改質センターに負荷が集中しているかのように電力を流通させ、電力改質センターで多様な品質の電力を作り出し、需要家の望む多品質電力を供給する電力流通方式である。

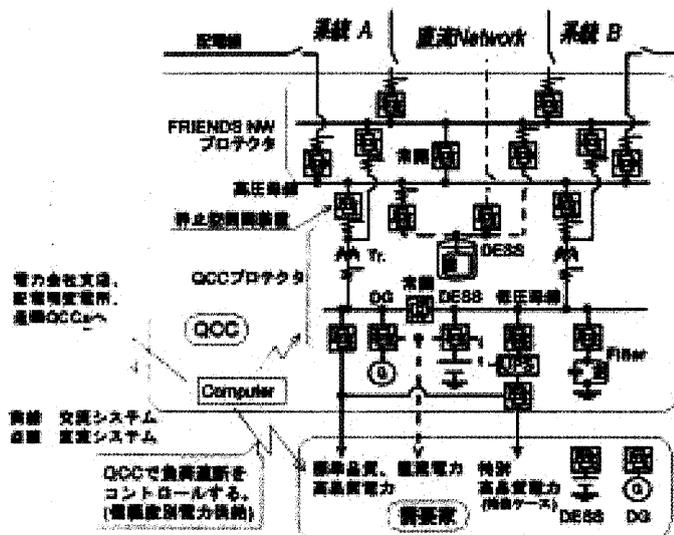


図3：電力改質センターの構成例

2.1.2 FRIENDS の機能

① 柔軟な系統構成の変更

現行の配電ネットワークは基本的に放射系統を構成し、区分開閉器等は機械式スイッチであるため、それほど頻繁に系統構成は変更されない。しかしながら、将来の電力システムでは、需要家が分散電源等を持つことによって、配電ネットワークに流れる電力潮流は一方向ではなくなることが予想され、必要に応じて柔軟に配電ネットワークを変更できることが望ましい。FRIENDS 構想では、配電用変電所の下位で電力改質センターが高圧あるいは特別高圧の配電ネットワークを構成し、従来の（機械式）

区分開閉器を電力半導体デバイスを用いた静止型開閉器、あるいは機械式と半導体式を併用した開閉器にすることによって、比較的自由に配電ネットワーク構成を変更することが可能である。

② 無停電の高信頼電力供給

①で述べたように、事故時でも柔軟に配電ネットワーク構成を変更することによって、電力改質センターは複数の配電用変電所（電源）から受電することができる。また、電力改質センターにも小規模分散電源や電力貯蔵装置などのエネルギー源が設置されるため、基本的には無停電で高信頼な電力供給が可能である。

③ 多品質電力供給

多種多様化される需要家のニーズに応えるため、多品質電力供給は最も重要な機能の一つである。FRIENDS システムでは、配電用変電所は電力改質センターにあたかも負荷が集中しているかのように電力を流通させ、電力改質センターから個別負荷に多品質電力供給を行うことを想定している。つまり、電力改質センターに様々な電力品質の改善装置を設置することによって、需要家が望む多様な品質の電力を作り出すことが可能であり、さらに、小売自由化を想定する場合には、電力改質センターが需要家と情報交換をすることによって、需要家が自由に購入先を選択できるシステムである。

④ 電力需要の平準化および省エネルギー

現在、夏季の冷房用電力需要の急増や電化率の向上に伴って、負荷率の低下が著しい。そこで、負荷率改善の対策として近年注目を集めているのが、高効率な電力貯蔵装置の電力系統への導入である。電力貯蔵装置によって負荷の小さい時期に電力を貯蔵し、負荷の大きいときに放出すれば、電力系統にとっては電力需要を平準化することと等価になる。FRIENDS 構想では、電力改質センターに分散配置された電力貯蔵装置が、こうした負荷平準化に重要な役割を果たすことになる。このことによって、配電設備の高効率利用、新設増設の繰り延べ、発電機の燃料費や送電損失の減少等、電力システム全体としての省エネルギー化に結びつくものと期待される。高効率な熱併給型の分散電源によって、電力改質センターが電力と同時に熱をも併給する拠点となる場合には、エネルギー利用全体としての省エネルギー化を図ることができる可能性もある。さらに、電力改質センターが需要家のすぐ近くに設置されることから、需要家の持つ太陽光・風力発電システムなどの局所的な小規模自然エネルギーを有効に利用することが可能となる。

⑤顧客サービスの向上

将来の電力システムには高度な機能を持つ通信ネットワークが併設される可能性が高い。すでに、一部の電気事業者ではケーブルテレビ(CATV) 事業者と協調を図りながら、需要家まで光ケーブルを敷設する計画もある。FRIENDS 構想では、電力改質センターが情報通信ネットワークの情報処理・情報交換センターとしての役割をも果たすことによって、様々な顧客サービスを向上できることが期待されている。これらは、オンライン料金情報や停電情報、自動検針などといった電力供給に関する情報にとどまらず、CATV、ホームオートメーション (HA) や、その他のマルチメディア環境での多目的情報通信サービスを実現することが可能となる。

⑥高度な需要家側制御 (DSM: Demand Side Management)

一般に、DSM とは、電力供給者から需要家側に積極的に働きかけ、電力システム全体ならびに社会全体に最も望ましい需要形態 (負荷パターンやその大きさなど) に誘導する計画を立案し、実行することである。電力供給に関する通信ネットワークが十分に発達していない現状では、主として、マスメディアを通じた省エネルギーの呼びかけや省エネルギー技術の提供、さらには季時別料金・負荷平準化のための特別料金などの料金制を利用した間接型 DSM にとどまっている。FRIENDS では、⑤で述べたように通信ネットワークを活用することによって、直接需要家機器を制御するといった、高度な需要家側制御が可能である。

2.2 ホームエネルギーマネジメントシステム(HEMS)

2.2.1 HEMS の目的

HEMS とは、エアコン等の家電機器の最適運転や、照明のオン・オフ、さらにはエネルギーの使用状況を表示するなど、家庭におけるエネルギー需要のマネジメント (省エネ行動) を支援するシステムである。

国民1人1人の意識に過剰な負担をかけずに省エネ行動が可能となるよう、センサやコントローラ等のIT 技術を活用し、エネルギー使用量をコストとして表示し、リアルタイムで視覚化し、家庭内における機器のエネルギー需要を自動的に制御するシステムの普及を図る。

これにより、家庭内では快適性を損なわず省エネを実現でき、エネルギーモニタを

用いてのエネルギー使用量のコスト化・視覚化および設備の統合管理、つまり新ライフスタイルの啓発に効果が発揮できるものとしている。

図4にHEMSの例と、図5に在不在連動制御による省エネ効果について示す。

2.2.2 HEMSの機能

① エネルギーモニタ

エネルギーモニタを用いて、消費電力や電気料金をリアルタイムに表示し、需要家に対してエネルギー使用量のコスト化・視覚化をはかり、設備の統合管理を促す。

② 空調・照明の在不在連動制御

HEMSには、人感センサが備え付けており、空調・照明等は住人が消し忘れたとしても自動的にスイッチをオフにする。

また、空調に関しては学習効果を付与することによって、住人の趣向を学習し最適制御を行うことができる。図5に連動制御による省エネ効果を示す。

③ 携帯電話・PHSでの遠隔操作

HEMSには部屋の様子を見る事ができるカメラが備え付けており、携帯電話やPHS等といったモバイル機器を利用して、部屋の様子を外出先から確認することができる。

また、モバイル機器からリモコン操作をして、エアコン等のスイッチのオン・オフを切り替えることができる。

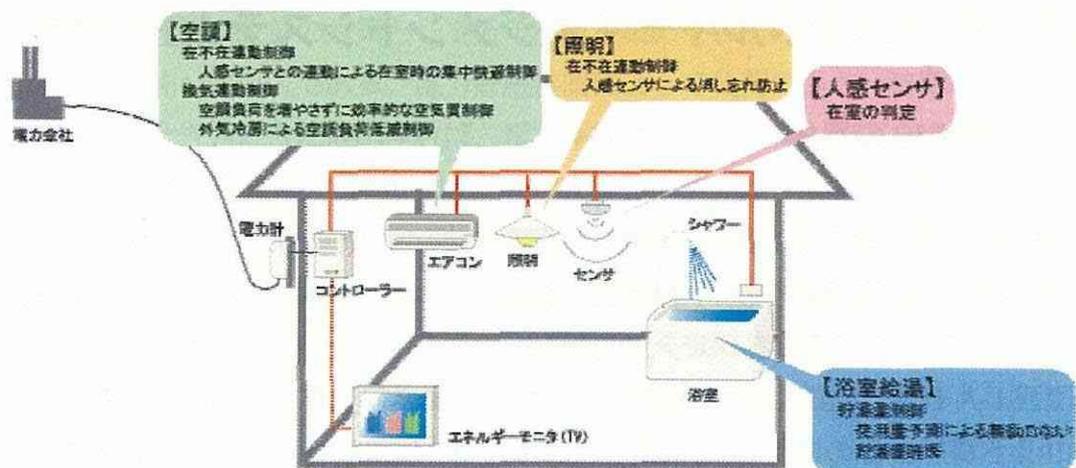


図4: HEMSの例

(<http://www.tepco.co.jp/plant-sit-env/environment/02report/shoene-j.html>)

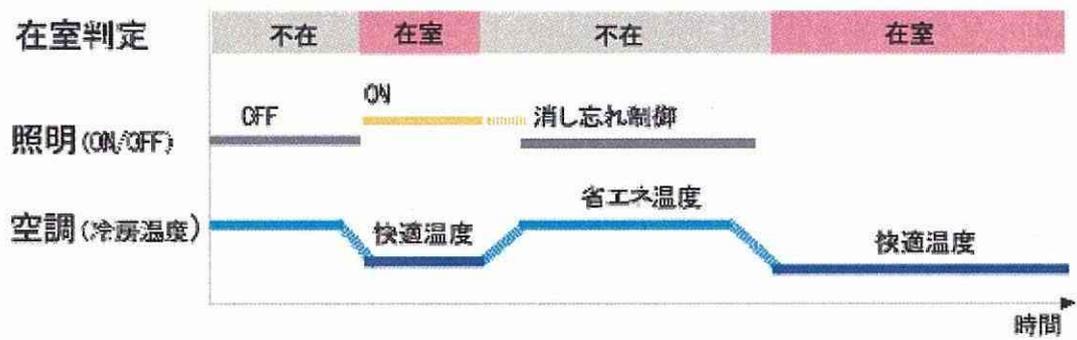


図5: 在不在連動制御による省エネ効果

(<http://www.tepco.co.jp/plant-sit-env/environment/02report/shoene-j.html>)

第3章

選択的負荷遮断プログラム

2章で述べたように、未来型電気エネルギー供給システムは現行の電力システムより、多様化される需要家のニーズに対応できるような供給システムとなっている。

本章では、FRIENDS や HEMS 等で導入可能な「選択的負荷遮断プログラム」という供給プランを紹介する。

「選択的負荷遮断プログラム」とは、供給側と需要家側が情報交換を行い需要逼迫時等に負荷を遮断でき、需要家側は遮断されてもいい機器とされたくない機器を選べるという供給プランである。FRIENDS 等で考えられている多品質電力供給は、基本的には通常より高品質な電気を供給することにより需要家の効用を上げようというものである。それに対し、「選択的負荷遮断プログラム」では、電気の品質を下げる事が許される場合のメリットについて考えてみた。すなわち、多品質電力供給ではあるが、通常電力品質と電力品質を下げた負荷遮断電力の2種類の電力供給契約である。まず、需要家がピーク時に遮断されても良い用途（機器）を選び、その用途に対して供給側が需要逼迫時に故意的に停電を起こし、ピークカットを行うものである。これを導入することによって、供給側は新規電源の増設や供給予備率の低減による負荷率の向上等により、設備コスト削減や高効率化できるというメリットがある。また、需要家には供給側が設備コストを削減した分だけ、選択的負荷遮断契約を交わしている用途の電気料金を安くして供給する訳である。つまり、供給側は過剰な設備を減らす事ができ、需要家は電気の質を落とした分だけ電気料金が安くなるというシステムである。

また、「選択的負荷遮断プログラム」を導入する事によって、需要家と供給側にメリットをもたらすだけでなく、更には発電電力量・過剰設備の削減等による二酸化炭素排出量の削減まで期待できるシステムである。

図6に「選択的負荷遮断プログラム」の基本概念図を示す。

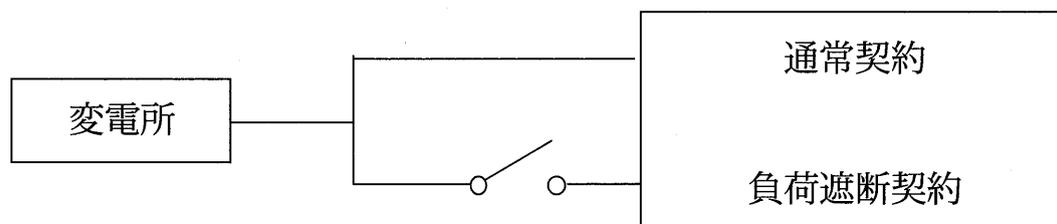


図6： 選択的負荷遮断プログラムの基本概念図

第4章

品質別電力供給と消費者余剰

本章では、選択的負荷遮断契約の特徴の1つである品質別電力供給システムにより、需要家にどのような影響があるのかを各品質の電気料金や消費者余剰に着目して検討する手法について述べる。また、需要家による影響を考察する際のモデルとしてある需要家を想定し、各電器機器の効用と電力量の関係を示した需要曲線を用いた [7]。

4.1 品質別電力供給によるメリット

規制緩和の流れなどにより、電気事業にも競争を導入し、コストダウンを図ろうとしている。しかし、規制緩和の考えには資源・環境問題が明示的には含まれていない。

しかし、巨大エネルギー産業である電気事業としては地球環境が大切な問題である事は明らかである。また、競争的環境では、資源・環境まで含めた全体的な最適化により、個々の需要家の満足度をより高めることが要求されるものと考えられる、ということは序論でも触れたが、ここでは需要家は電気エネルギーを利用する用途によって、品質、信頼度に対する要求は異なることを考慮に入れたい。つまり、需要家は価格が多少高くても高品質を必要とする用途と品質は多少悪くても価格が安いことが望まれる用途があるはずである。そのような電力需要を品質、信頼度に対する要求水準を高い順に並べ直すと、図7の様になるものと考えられる。

多種多様な需要に対して、要求水準を満たすこと(品質別供給)が実現されれば、図7において現行の電力システムでの信頼度×需要の面積よりも小さくなるのが分かる。つまり、品質別供給が実現されれば必要とされる品質、信頼度での供給が可能となり、全体として過剰設備となることが避けられるのではないかと期待できる。

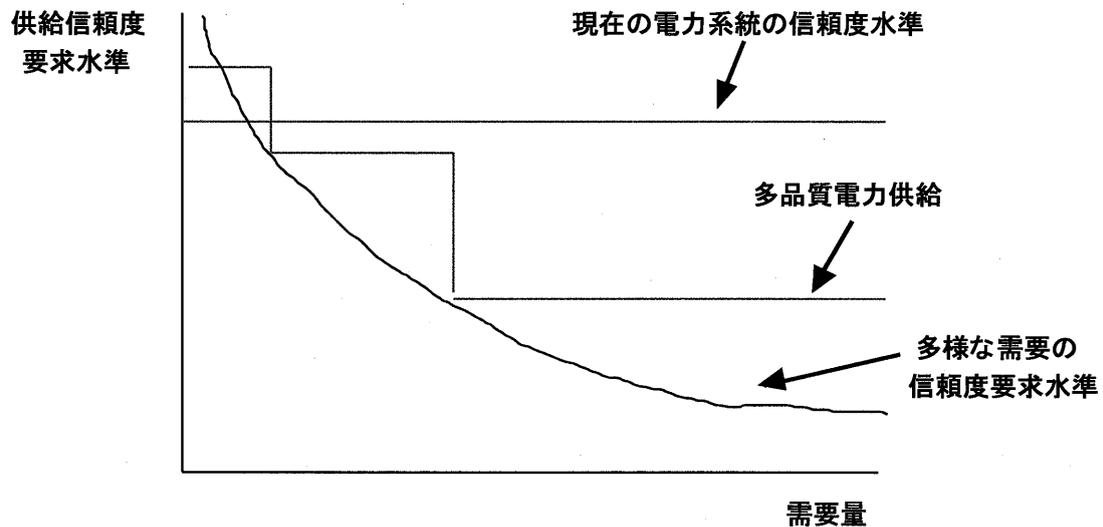


図7: 供給信頼度水準の要求水準と供給確率

4.2 効用の計算法

本節は過去に研究室で行ったアンケートに基づいた効用の算出法[7]が本論文でも重要であり、そのデータを本論文でももちいたので説明する。

品質別需要量を把握するために、ある需要家を想定し（研究室のアンケート結果に基づくもの）各電気機器の効用と電力量の関係を示した需要曲線を用いた。

この需要曲線を得るにあたって、効用は各人の主観的判断によって求められたものである。具体的に効用の求め方とアンケート結果（効用・消費電力量）を以下の表1に示す。

<具体的な求め方>

例えば、ある需要家が1日にパソコンを2.5時間使用するものとします。需要家はパソコンをデータの作成等で使用するので、お金を多少出しても停電して欲しくないと考える。そこで、最大500円（この値は人や環境によって変わる）まで払うものとして効用を計算した。ただし、パソコンの消費電力を85[W]とする。

$$\text{電力量} = 85[\text{W}] \times 2.5[\text{h}] = 212.5[\text{Wh}]$$

これだけの電力使用量に対して500円払うので、1kWhあたりの効用は次のように

なる。

$$Utility[\text{Yen}/kWh] = \frac{500[\text{Yen}] \times 1000[\text{Wh}]}{85[\text{W}] \times 2.5[\text{h}]} = 2353$$

表1: 使用時間に対する効用

用途	使用時間効用	冷蔵庫	24[h] 2000[円]
パソコン	2.5[h] 500[円]	電子レンジ	0.25[h] 150[円]
ビデオ	1.0[h] 50[円]	テレビ	5.0[h] 350[円]
白熱電球	6.9[h] 1500[円]	掃除機	0.5[h] 150[円]
ヒーター	8.0[h] 300[円]	炊飯器	12.0[h] 400[円]
洗濯機	0.66[h] 500[円]	アイロン	0.5[h] 150[円]
ラジカセ	2.0[h] 50[円]	ホットプレート	1.0[h] 250[円]
コーヒーマーカー	0.5[h] 180[円]	ドライヤー	0.33[h] 50[円]
電話機	0.5[h] 150[円]	ホットカーペット	3.0[h] 300[円]

ただし、白熱電球、電話機、炊飯器は次のようにして求めた。

(1) 白熱電球 (居間、トイレ、風呂、廊下で考える)

(a)居間 62[W]の電力を1日に9時間使用するものとする。

$$62 \times 9 = 558[\text{Wh}]$$

(b)トイレ 60[W]の電力を1日に1時間使用するものとする。

$$60 \times 1 = 60[\text{Wh}]$$

(c)風呂、洗面台 60[W]の電力を1日に1.5時間使用するものとする。

$$60 \times 1.5 = 90[\text{Wh}]$$

(d)廊下 60[W]の電力を1日に1.0時間使用するものとする。

$$60 \times 1.0 = 60[\text{Wh}]$$

故に、1日に白熱電球で使用する電力量は(a)~(d)より、768[Wh]となる。また、平均の使用電力 [W]および使用時間は次のようになる。

$$\text{平均使用時間} = 9 \times \frac{558}{768} + 1 \times \frac{60}{768} + 1.5 \times \frac{90}{768} + 1 \times \frac{60}{768} = 412.26[\text{分}] = 6.87[\text{h}]$$

$$\text{平均使用電力} = \frac{768}{6.87} = 112[\text{W}]$$

(2) 電話機

動作時最大通話時の消費電力を110[W]として、30分間使用するものとする。

また、子機の待機電力を9[W]として、24時間使用しているものとする。

(3) 炊飯器

平均保温電力を40[W]として、12時間保温する。

定格時の電力1200[W]で1時間使用するものとする。

表2: 各用途の1kWhあたりの効用と消費電力量]

用途	効用/電力量	冷蔵庫	521 3840
パソコン	2353 212.5	電子レンジ	496 302.5
ビデオ	2273 22	テレビ	424 825
白熱電球	1953 768	掃除機	305 985
ヒーター	1786 168	炊飯器	227.2 1760
洗濯機	1704 293.3	アイロン	214 700
ラジカセ	1120 56	ホットプレート	208 1200
コーヒーメーカー	871 206.7	ドライヤー	125 400
電話機	554 271	ホットカーペット	118 2550

ただし、効用の単位は[円/kWh]、電力量の単位は [Wh/日]である。

4.3 需要曲線の求め方

次に、得られた効用を値の低い順に並べると、図8の様な概形になる。ここで、図8にあるように、ある機器を使っている時の効用は一定というモデルにするのではなく、効用の値は時間や需要家毎によって異なる（例えば、昼と夜とでは白熱電球の効用は異なる）ことを考慮してモデルを設定する。これを考慮に入れ、効用の低い順に並べ直すと、効用の変化を考慮した需要曲線が得られる。これは、機器ごとの効用に並べられているのではなく、効用の値の低い順に並べられることになる。また、効用の変化に考慮し、近似する関数を図9に示すように $y = a/(x + b)$ とした。

また通常の場合、需要家は電気料金より効用が少しでも大きければ、電力を購入するが、本研究では通常電気料金より安い負荷遮断電気料金となっても、価格弾力係数が小さいため、電気料金が安くなることで生まれる需要の伸びは無視することとした。

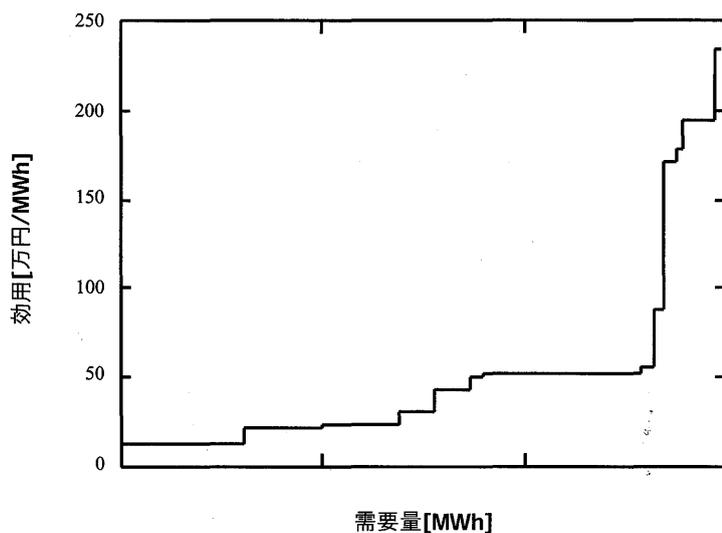


図8：各機器の効用と需要量の様子

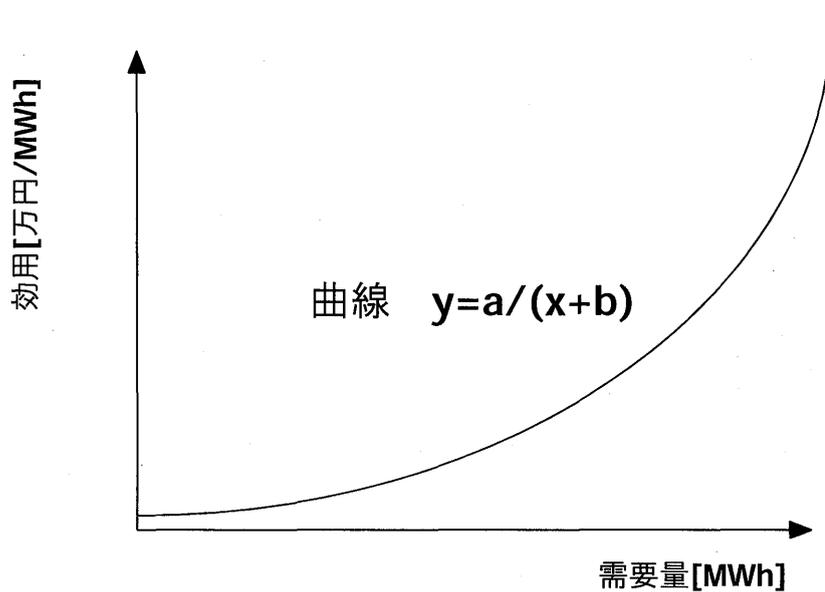


図9：近似して得られた効用曲線

<近似曲線の求め方>

効用曲線は、表2 で得られた効用の値と電力量の値を小さいものから順に並べたものを、最小2乗法を用いて $y = a/(x+b)$ の形に近似した。 x_i, y_i をそれぞれ各機器の消費電力量の中間値及び効用とすると、式は次のようになる。ただし N は機器の個数である。

$$F(a,b) = \sum_{i=1}^N \left(y_i - \frac{a}{x_i+b} \right)^2 = \sum_{i=1}^N \left\{ y_i^2 - 2 \frac{ay_i}{x_i+b} + \left(\frac{a}{x_i+b} \right)^2 \right\} \quad (4-1)$$

$F(a,b)$ は2変数関数なので、 $F(a,b)$ の最小値は次のようにして求める。

$$\frac{dF}{da} = \sum_{i=1}^N \left\{ -2 \frac{y_i}{x_i+b} + 2 \left(\frac{a}{x_i+b} \right) \right\} \quad (4-2)$$

本来なら、2変数関数の場合、 $\frac{dF}{da} = 0, \frac{dF}{db} = 0$ を満たす a, b を求めてから極値や最大・最小値を吟味するのだが、 $\frac{dF}{db} = 0$ を満たす b を求めるのは大変なので、式(4-2)を用いて $\frac{dF}{da} = 0$ を満たす a を求め、それを式(4-1)に代入する。そうすると、 $F(a,b)$ は $F(b)$ の1変数関数になるので、最小値は b を変化させ、数値計算によって求めた。

$$F(b) = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{x_i+b} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{x_i+b}} - y_i \right\}^2 \quad (4-3)$$

4.4 品質別需要量の把握

需要曲線が決定したので、次にどのようにして各品質の需要量を把握するのか説明する。

需要家は物を購入する際には合理的に行動すると考えられるので、各品質の需要量を試算する際にも合理的に行動する、すなわち消費者余剰が最大になるようにして計算した。消費者余剰とは需要家が受ける恩恵 (=効用, プラスの部分) と電気料金による支出 (マイナスの部分) の合計のことである。定式化すると次のようになる。ただし、消費者余剰を表す関数を S_c とする。

$$S_c = \int_0^{x_{IL}} F(x) dx \cdot r_{IL} + \int_{x_{IL}}^{x_T} F(x) dx \cdot r_{Normal} - \{ x_{IL} R_{IL} r_{IL} - (x_T - x_{IL}) R_{Normal} r_{Normal} \} \quad (4-5)$$

x_{IL} [MWh] : 負荷遮断電力需要量

x_T [MWh] : 総需要量

R_{IL} [万円/MWh] : 負荷遮断電気料金

R_{Normal} [万円/MWh] : 通常電気料金

$F(x)$: 効用曲線

r_{IL} : 負荷遮断電力の供給信頼度

r_{Normal} : 通常電力の供給信頼度

各品質の電気料金、供給確率などによってそれぞれの品質の需要量は異なる。負荷遮断電力と通常電力の需要量の切り替わる部分は、負荷遮断電力を購入することによって、これ以上消費者余剰が増加しない部分である。したがって、余剰が増加しなければそれ以上負荷遮断電力を需要家は購入しない（需要家の行動に基づく）。つまり、負荷遮断電力と通常電力の需要量が切り替わる条件は次のようになる。

$$\frac{\partial S_c}{\partial x_{IL}} = 0 \quad (4-6)$$

したがって、

$$\frac{\partial S_c}{\partial x_{IL}} = F(x_{IL}) \cdot r_{IL} - F(x_{IL}) \cdot r_{Normal} - R_{IL} \cdot r_{IL} + R_{Normal} \cdot r_{Normal} = 0 \quad (4-7)$$

$$(F(x_{IL}) - R_{IL}) r_{IL} = (F(x_{IL}) - R_{Normal}) r_{Normal} \quad (4-8)$$

つまり、負荷遮断電力の需要量は上式を満たすような x_{IL} を求めればよい。

次に、補足として停電に関することに触れておく。次の三つのパターンが考えられる。

まず、空調のようなものである。これは、停電が起きても直ちに効用が失われるわけではなく、徐々に失われていく。そして復帰後、徐々に効用が戻るものと考えられる。

次に、極端に効用が減る場合も考えられる。例えば、パソコンで文章を作っていたときに停電が発生すると、それまでに作っていた文章が消えてしまう。したがって、停電が一度起きるとそれ以前に得られていたと思っていた効用まで失われてしまう。同様なことは生産ラインが止まり、その上の製品がダメになってしまう場合や、冷蔵庫が長期間停止して食品が腐ってしまう場合にもあてはまる。

最後に、照明のようなものを考えてみると、照明の場合、効用は停電の期間だけ失われて、電力供給が再開されれば、直ちに復帰するものと考えられる。その様子を示したのが図10である。

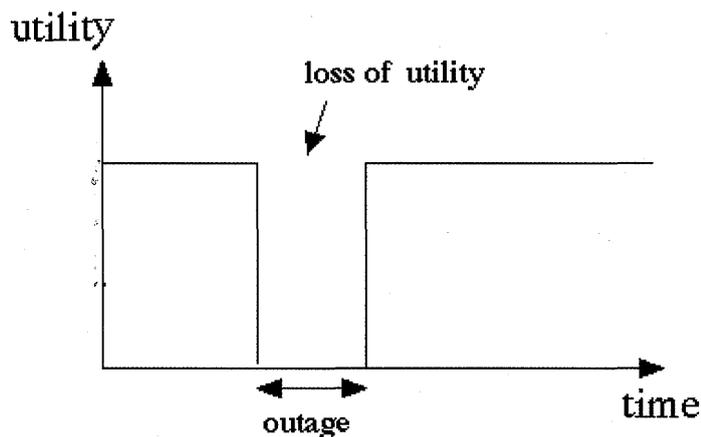


図 10: 停電中に失われる効用

本論文では、図10に示すように、効用は停電の期間だけ失われて、電力供給が再開すると、直ちに復帰するものと仮定して検討を行った。

第5章

負荷遮断契約を選択する条件

負荷遮断契約を選択する条件を求める際に、次のデータを使用した。また、負荷は1年8760時間分のデータを使用した。

・通常電気料金	2[万円/MWh]
・設備費単価	3000[万円/MW・年]
・燃料費	0.2[万円/MWh]

5.1 供給側の条件

供給側は負荷遮断を実施することによって設備コスト等を削減することができる。その削減したコストの分を負荷遮断契約を結んだ需要家の電気料金を安くするということであった。したがって、以下の条件を満たさないと供給側は負荷遮断を実施することはない。

$$\text{設備コスト削減量} \geq \text{負荷遮断電気料金による減収} \quad (5-1)$$

よって式(5-1)より、供給側が負荷遮断電気料金を安くできる下限値を求めることができる。式(5-1)の詳細は以下の様である。

$$C \geq T_L \cdot R_{Normal} - \{T_L(1-J)(R_{Normal} - R_{IL}) + T_S \cdot R_{IL}\} \quad (5-2)$$

C [万円]：設備コスト削減量
 T_L [MWh]：年間総需要量
 T_s [MWh]：年間総供給量
 J ：負荷遮断契約の割合

式(5-2)より、負荷遮断電気料金の下限值を求める。式 (5-2)を R_{IL} について解くと、

$$R_{IL} \geq \frac{C - T_L \cdot J \cdot R_{Normal}}{T_L(1 - J) - T_s} \quad (5-3)$$

となり、式(5-3)より負荷遮断電気料金の下限值が求められ、その下限値よりも大きい負荷遮断電気料金であれば、供給側は負荷遮断を実施して十分にメリットがあると考えられる。

図 11 に、供給側の負荷遮断電気料金の下限值を示す。

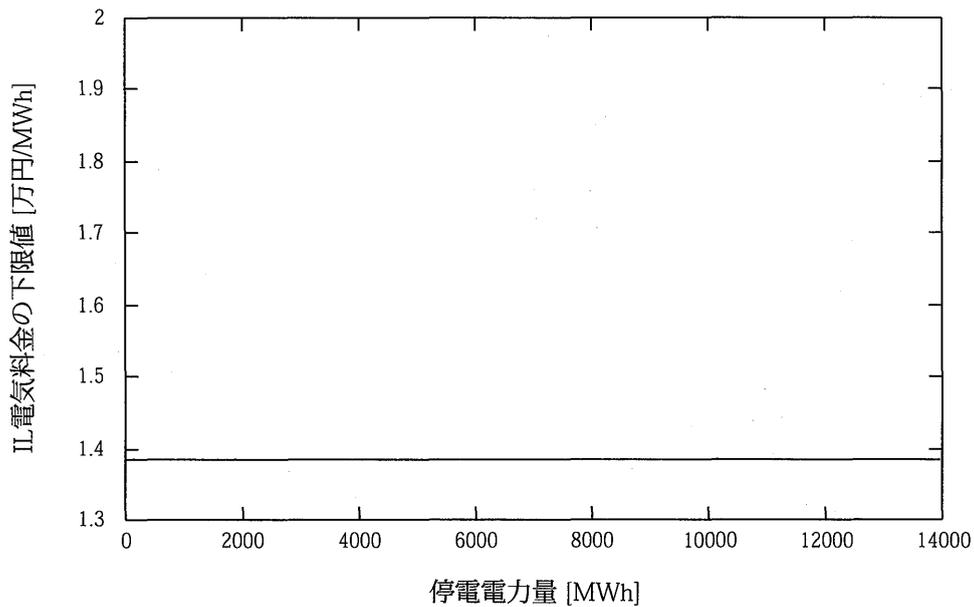


図 11：供給側の負荷遮断電気料金の下限值

図 11 より、停電電力量を増加させても供給側が選択的負荷遮断を実施する条件としての負荷遮断電気料金の下限值はほとんど変わらない結

果となった。これは、供給側からみて負荷遮断実施の得失はピークカット（負荷遮断契約率に比例）による設備費減と常時の料金収入減（負荷遮断契約率にほぼ比例）のバランスであることから考えると当然の結果である。

5.2 需要家側の条件

需要家は、需要家の余剰が負荷遮断契約を選択する前より選択した後の方が大きくないと、通常契約電力を選択する。よって、需要家が負荷遮断契約を選択する前と、選択した後の需要家の余剰を比較する。ある用途（効用： U [万円/MWh]とする）に用いる電力を負荷遮断契約した場合と通常契約した場合の需要家の余剰は以下の様になる。

1. 負荷遮断契約した時の余剰

$$S_{IL} = U(D - I) - R_{IL}(D - I) \quad (5-4)$$

2. 通常契約した時の余剰

$$S_{Normal} = U \cdot D - R_{Normal} \cdot D \quad (5-5)$$

S_{IL} [万円]：負荷遮断契約した時の余剰

S_{Normal} [万円]：通常契約した時の余剰

U [万円/MWh]：効用

D [MWh]：考えている用途の需要量

I [MWh]：負荷遮断による停電電力量

需要家が負荷遮断契約を選択する条件は、

$$S_{IL} \geq S_{Normal} \quad (5-6)$$

である。この時は負荷遮断契約を選択する時の方が、余剰が大きいのので、負荷遮断契約を選択する。よって、式(5-6)に式(5-4)、(5-5)を代入して、 U (効用)について解くと、以下の様になる。

$$U \leq \frac{D}{I} (R_{Normal} - R_{IL}) + R_{IL} \quad (5-7)$$

式(5-7)より、負荷遮断契約を選択する条件としての効用の上限値を求めることができる。これより、需要家側にある機器の効用が式(5-7)の効用の上限値より小さければ負荷遮断契約を選択し、上限値より大きければ通常契約を選択する。

なお、一需要家が用途によって通常契約と負荷遮断契約を選択できない場合（需要家毎に通常契約か負荷遮断契約かを選択する場合）には、上式で用いた U を当該需要家の平均効用とすれば適用可能である。

図12に、需要家が負荷遮断契約する条件を求めた結果を示す。ここでは、負荷遮断電気料金を1.8[万円/MWh]、1.6[万円/MWh]、前節で求めた供給側の負荷遮断電気料金の下限値に近い1.4[万円/MWh]の場合を計算した。

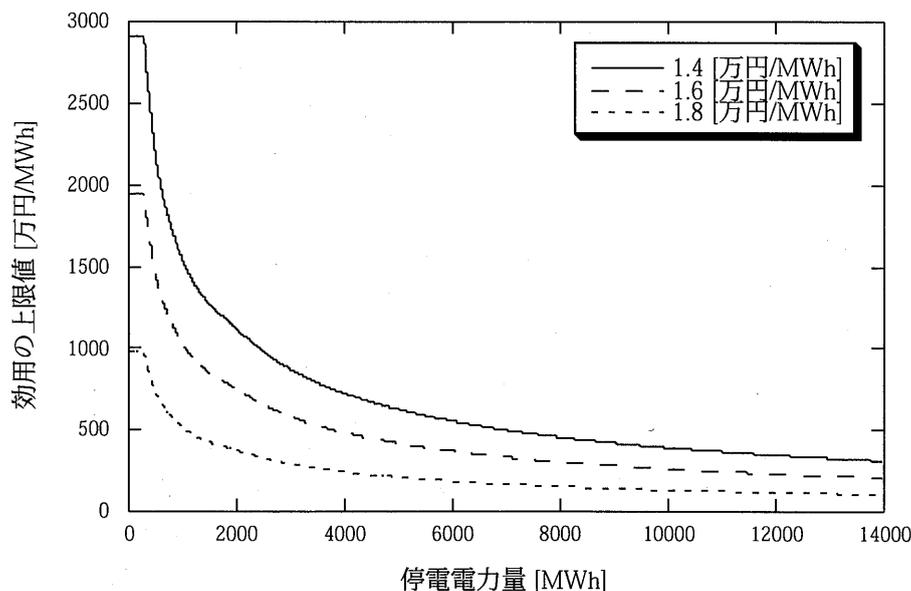


図12: 需要家が負荷遮断契約を選択する効用の上限値

図12は式(5-7)より明らかであるが、効用 U の上限値は停電電力量 I に反比例している。したがって、停電電力量が多くなるほど、すなわち供給信頼度が小さくなるほど効用が小さいものしか負荷遮断契約を選択しない。

また、通常電気料金と負荷遮断電気料金の価格差が大きくなればなるほど、負荷遮

断契約を選択する用途の効用の上限値は高くなる。これは、負荷遮断電気料金が安くなり、停電になるよりも安い電気料金で電気を購入した方がメリットのである用途が増えるためである。

本論文では、需要家の参加率10%の時を<1>、20%の時を<2>、価格差に比例する時を<3>、負荷遮断量に比例する時を<4>とする。これらの場合の需要家の参加率を図13に示す。

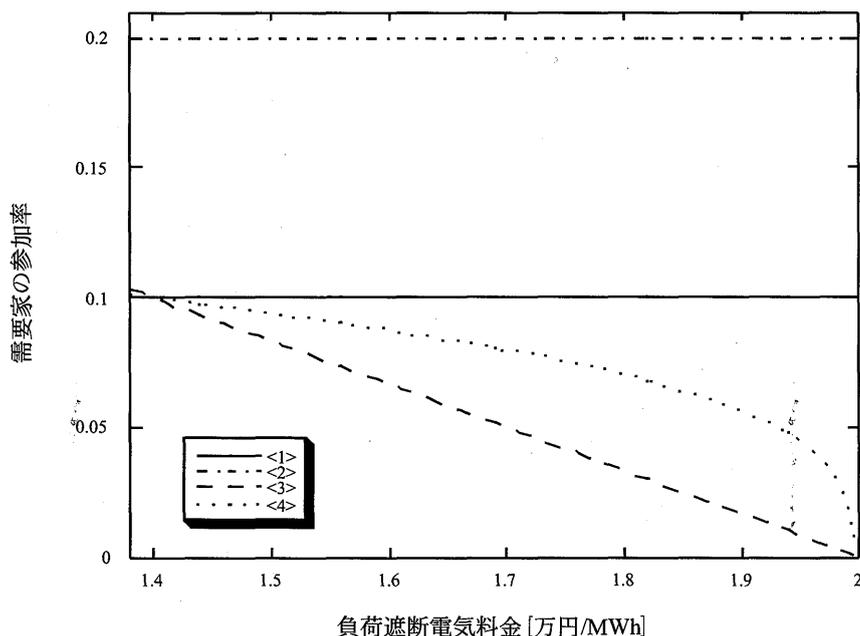


図13: 選択的負荷遮断プログラムに参加する需要家の割合

6.1 簡略なモデル

本節では、ピーク時に負荷遮断契約が全て遮断される場合について考察した。ここでは、供給側の発電設備の予備力、発電設備・送電設備の事故、通常品質の停電を考慮に入れていない簡単なモデルを使用した。したがって、供給側の発電設備の最大値はピーク負荷としていて、停電は選択的負荷遮断プログラムによる負荷遮断のみとなっており、通常品質電力のLOEPは0となる。

選択的負荷遮断プログラムの導入の効果を考える際、負荷遮断電気料金やピークカット率に注目して考える。ただし、5.2節で求めた需要家が負荷遮断契約に参加する条件を用いて、ピークカット率の設定を行うものとする。その流れを次に示す。

<ステップ1> 負荷遮断電気料金を与える。

<ステップ2> ステップ1 で与えられた負荷遮断電気料金を用いて、図12で表されるような需要家が負荷遮断契約を選択する効用の上限値を求める。

<ステップ3> ステップ2 で求めた曲線と、4.3 節近似して得られた効用曲線を選択的負荷遮断プログラムに参加する需要家の割合に合わせて、これらの交点よりピークカット電力量（負荷遮断による停電電力量）を求める。この時、負荷遮断契約を選択する用途の効用の上限値より小さい効用の機器を負荷遮断契約としているので、需要家に大きなメリットがある。

以上のステップを用いて各データを算出した。図14にピークカット率、図15に消費者余剰、図16に供給側利潤、図17に社会厚生、図18に負荷遮断契約電力のLOEP、および図19にCO₂排出削減量を示す。なお消費者余剰、供給側利潤及び社会厚生は、選択的負荷遮断プログラムを導入する前との差を求めている。

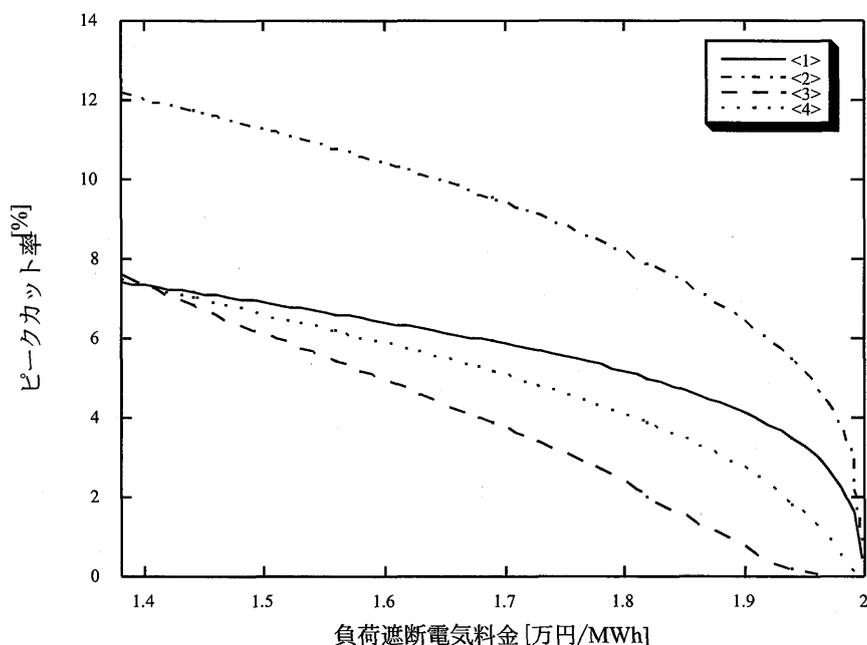


図14: ピークカット率

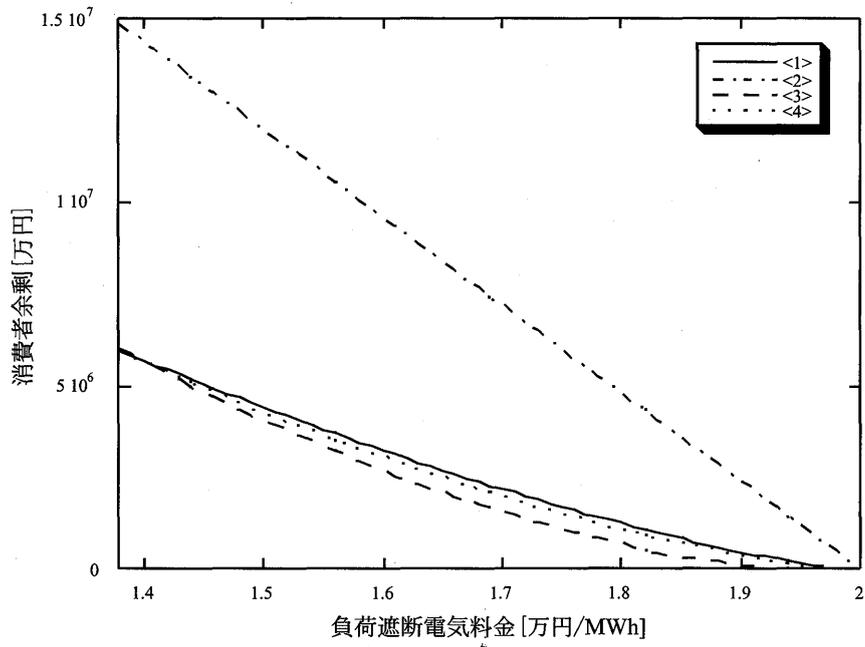


図 15: 消費者余剰

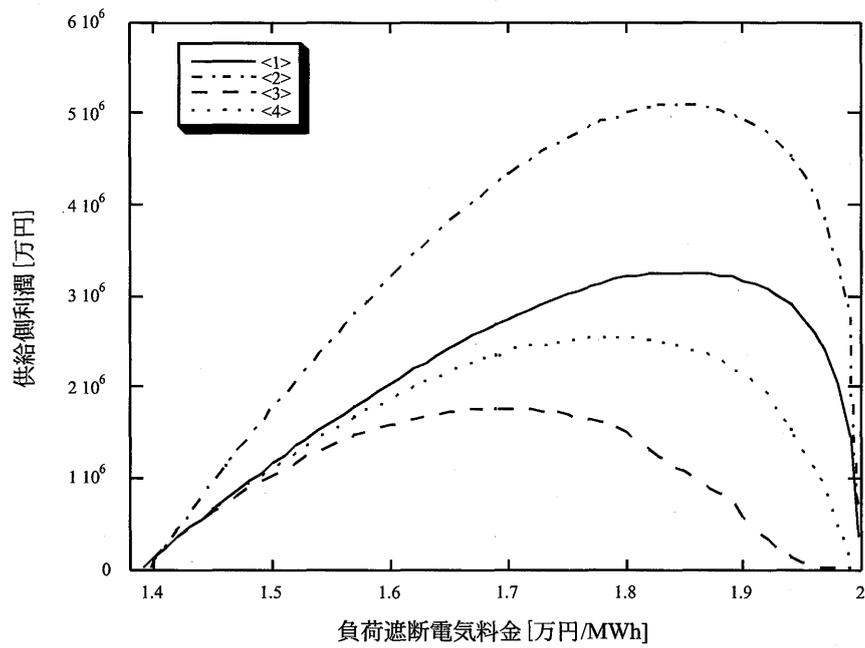


図 16: 供給側利潤

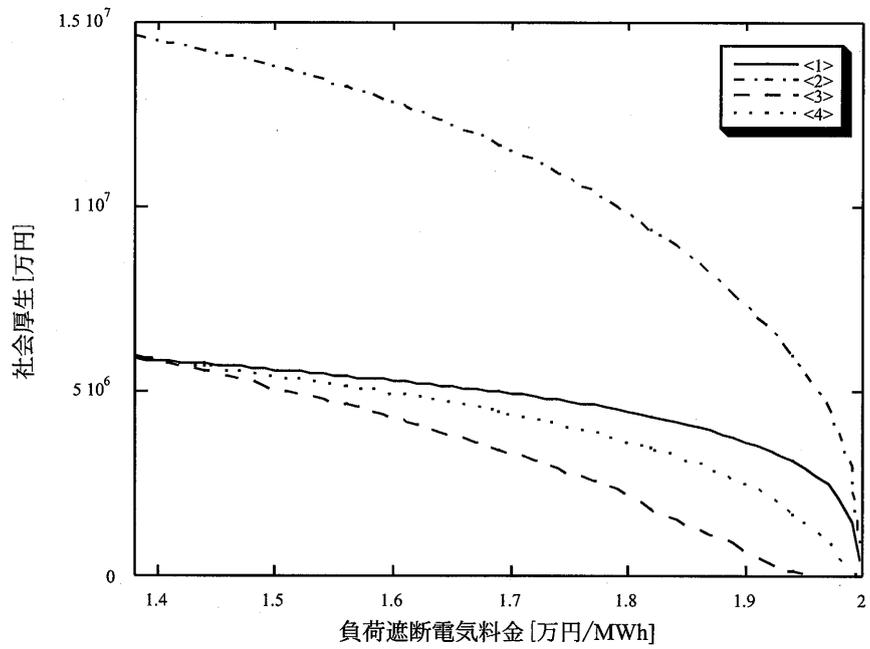


図 17: 社会厚生

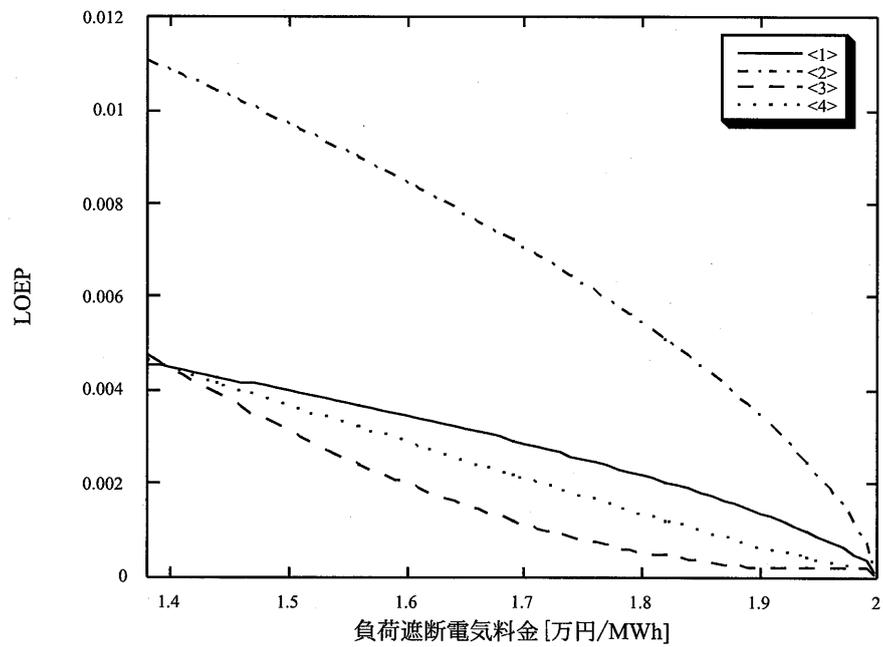


図 18: LOEP

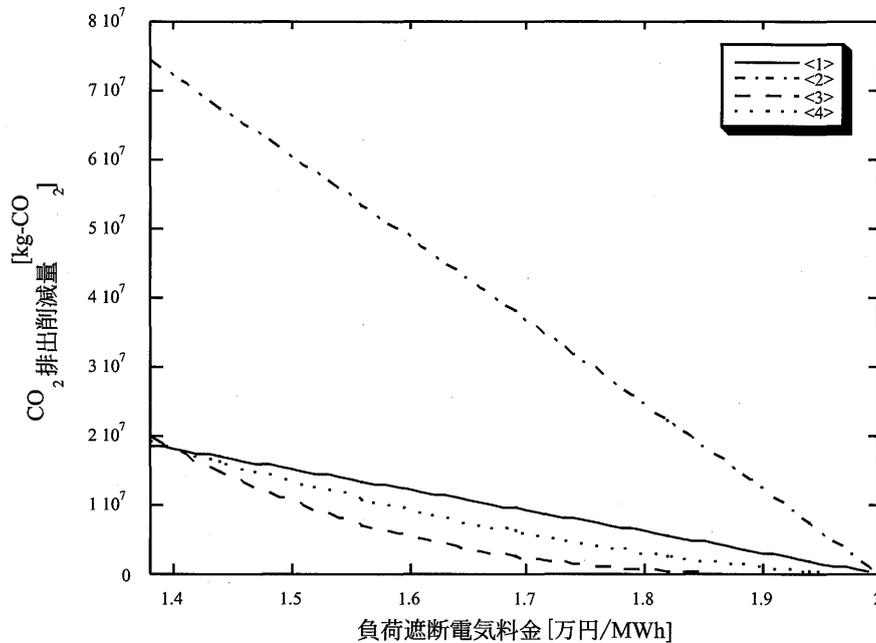


図 19: CO₂ 排出削減量

図 14 より、負荷遮断電気料金が高くなるにつれてピークカット率が小さくなっている。これは、負荷遮断電気料金と通常電気料金の価格差が小さくなっているため、需要家が負荷遮断契約を結ぶメリットが小さくなっているため、ごく少ない用途しか負荷遮断契約を選択しないからである。

図 15 より、負荷遮断電気料金が高くなると、消費者余剰は小さくなっている。これは通常電気料金と負荷遮断電気料金との価格差が大きい方が負荷遮断による停電電力量は大きくなるが、それ以上に負荷遮断電気料金が安いために需要家にとってメリットが大きく、余剰も大きくなったものと考えられる。また、選択的負荷遮断プログラムに参加する需要家の割合が10%から20%に増えると、メリットが大きい需要家の割合が増えるので、消費者全体の余剰としては更に大きくなった。また、プログラムに参加する需要家の割合が変化する時は、負荷遮断電気料金が高いと参加する需要家の割合の差が大きくなるが、消費者余剰に大きな差は見られなかった。これは、負荷遮断電気料金が高くなり、たくさんの需要家が参加していても一需要家あたりのメリットが小さく、しかし逆に少ない需要家であれば一需要家あたりのメリットを十分得られることができているからだと考えられる。

図 16 より、負荷遮断電気料金が1.4[万円/MWh]辺りまでは負の値をとっている。

これは、供給側が経済的に設備削減できる限界を超えているからである。これは、5.1節で求めた供給側が負荷遮断を行う条件にも適合している。また、負荷遮断電気料金と通常電気料金の価格差が小さくなり、負荷遮断電気料金による減収より設備コスト削減量の方が大きくなったため供給側利潤が増えたが、価格差が余り小さすぎるとピークカット率が小さくなるため供給側利潤が減るという結果となった。プログラムに参加する需要家の割合が変化する時は、需要家の割合が減っていることからピークカットが小さくなり、供給側利潤が小さくなった。さらに、供給側利潤のピークの負荷遮断電気料金も低くなっている。これは、負荷遮断電気料金が高くなると参加する需要家が減りピークカット可能量が減っているため、効率的に設備コストが削減できない。したがって、ピークカット可能量が多く保てる負荷遮断電気料金が低い所で供給側のメリットがピークをとった。

図17より、消費者余剰と供給側利潤を合わせた社会厚生は、負荷遮断電気料金が高くなるにつれて小さくなっている。これは、図14より説明することができる。通常電気料金と負荷遮断電気料金の価格差が大きいほど、ピークカット率が大きくなっているのがわかる。しかし、ピークカット率が増えるということは、停電電力量が大きくなっているということであり、需要家の失われた効用も大きくなっている。失われた効用の増加はピークカット率のそれより大きく、ピークカットするほどより大きくなる。また、供給側は、「ピークカット率＝設備削減率」であるので、供給側のメリットはピークカット率が増えるとはほぼ一次関数的に増加する。したがって、需需要家の失われた効用と供給側のメリットを合わせて考えると、図17の様な曲線になる。

図18より、参加する需要家の割合が10%の時より20%の時の方がLOEPが大きく停電が大きいようであるが、需要家全体の停電は大きいものの需要家の割合も大きいので一需要家当りの停電電力量はそれほど大きくない。したがって、図15で求めた消費者余剰が大きくなっていることがいえる。

図19より、選択的負荷遮断プログラムに参加する需要家の割合が20%の時が、他の場合よりかなり大きくCO₂排出量を削減していることがわかる。これは、ピークカット率の増加より停電電力量の増加の方が大きいことは明らかである。また、CO₂排出削減量は停電電力量に比例することから考えると、図18と同じような曲線を描くのは当然の結果である。しかし、環境を見据えた運用が求められている今、電気事業にとっては大きなメリットがあると考えられる。

6.2 供給予備力を考慮したモデル

本節では、供給側の発電設備の予備力、発電設備の事故を考慮した場合について考察した。したがって、発電機容量（予備力）がピーク負荷より大きくても、発電機事故で停電する可能性がある場合を検討した。ただし予備力といっても、発電機の計画外停止に対応できる予備力のみを考慮しており、本来同時に考慮すべき出水変動確率と需要変動確率は考慮に入れていない。

発電予備力を削減したことによって起こるであろう停電を負荷遮断契約で吸収し、発電機容量がもともとのそれより小さくなっていればメリットが生まれることが予想される。また、停電は負荷遮断による停電と発電機事故による停電が考えられ、負荷遮断契約電力で吸収できない停電については通常品質電力にも停電が起り、通常品質のLOEPも0ではなくなる。

選択的負荷遮断プログラムの導入の効果を考える際、前節では5.2節で求めた条件を用いてピークカット率を求めた。しかし、本節では設備容量・発電機事故率を考慮しているため、5.2節の条件だけでは求めることができないので、設備容量・発電機事故率・負荷遮断電気料金を供給側変数とし、図20に示す流れで需要家の負荷遮断契約の割合を求めた。なおこの際、4.4節で示した様に、品質別の信頼度と電気料金より需要家の余剰が最大となるように需要家が行動するものとした。[7]

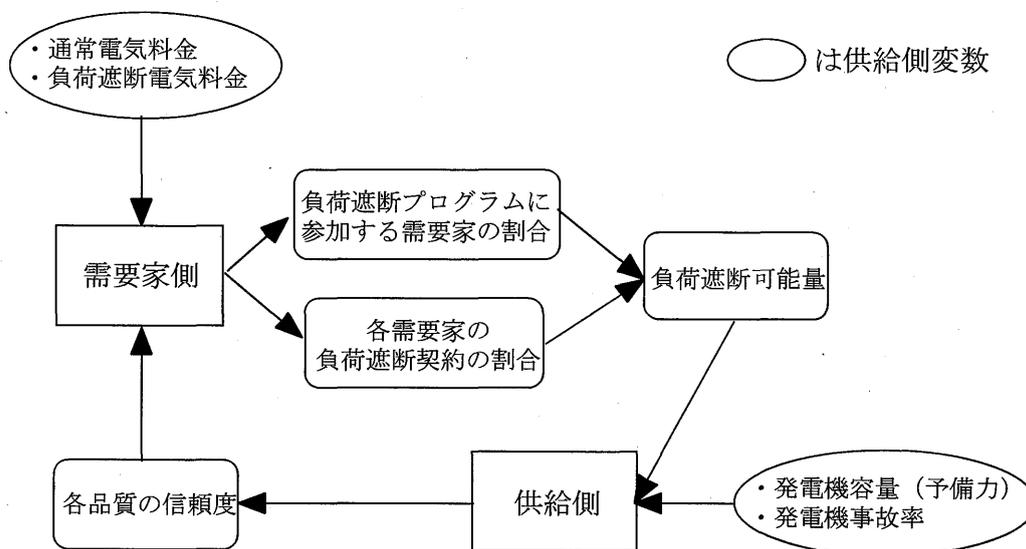


図20: 負荷遮断契約の割合を求める流れ

ここで、図 20 の説明をする。まず、選択的負荷遮断プログラムに参加する需要家の割合は合理的行動としてとらえきれないため、これを設定する。次に、通常電気料金と負荷遮断電気料金を決定する。ここで、需要家の負荷遮断契約の割合を適当な値に決める。これらから負荷遮断可能量が決定する。この負荷遮断可能量と供給側の発電設備（発電機容量・発電機事故率）を与えることにより、負荷遮断契電力と通常契電力の LOEP（供給信頼度）が求まる。この信頼度と電気料金を需要家に提示し、4.4節で説明したように需要家が合理的に動いた時の負荷遮断契約の割合を再度決定する。この時、負荷遮断契約の割合が収束するまで繰返しこれらの計算を行う。そして、その収束した割合が、需要家が合理的に行動した場合の負荷遮断契約の割合である。

なお、発電機計画外停止率とは以下の様にする。

・ 発電機計画外停止率 0.25%([10]より)

6.2.1 社会厚生を最大化した場合

本項では、負荷遮断電気料金についての検討を行った。負荷遮断電気料金を変化させた時、消費者余剰と供給側利潤の和である社会厚生が最大となる点を求めた。すなわち、供給側が利潤をもっても良いとした際に、需要家・供給側を合わせた社会的にメリットがどの程度得られるのかを検討した。

なお、本項でも選択的負荷遮断プログラムに参加する需要家の割合を考慮し、前節の<1>～<3>のパターンをシミュレーションした。

図 21～23 にそれぞれのパターンの消費者余剰・供給側利潤・社会厚生、図 24 に設備率を示す。

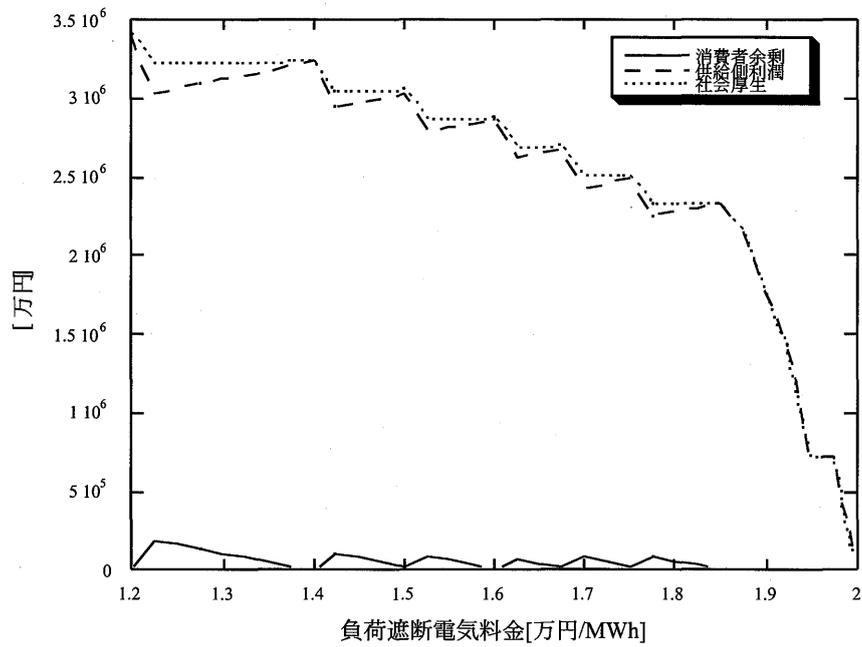


図 21: 需要家参加率パターン<1>

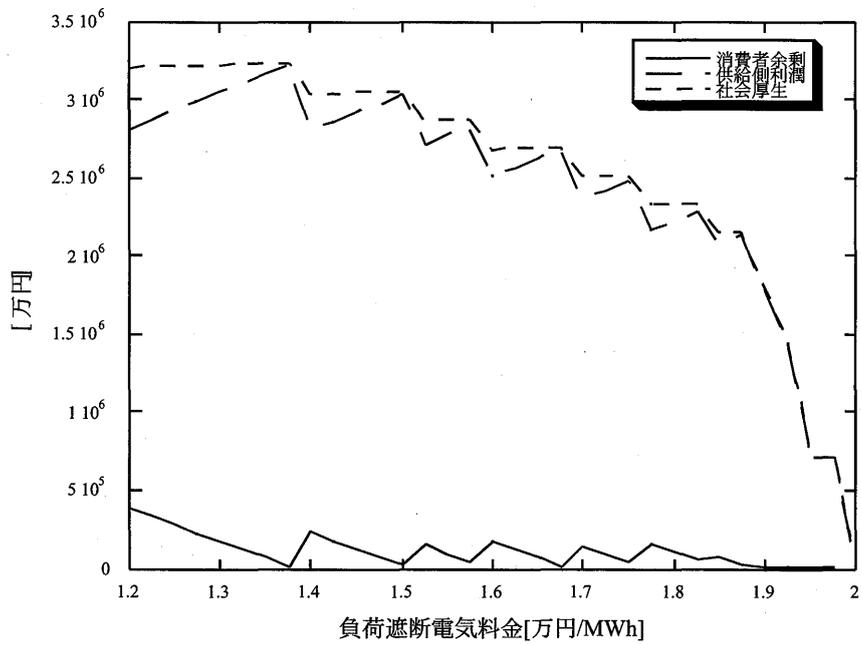


図 22: 需要家参加率パターン<2>

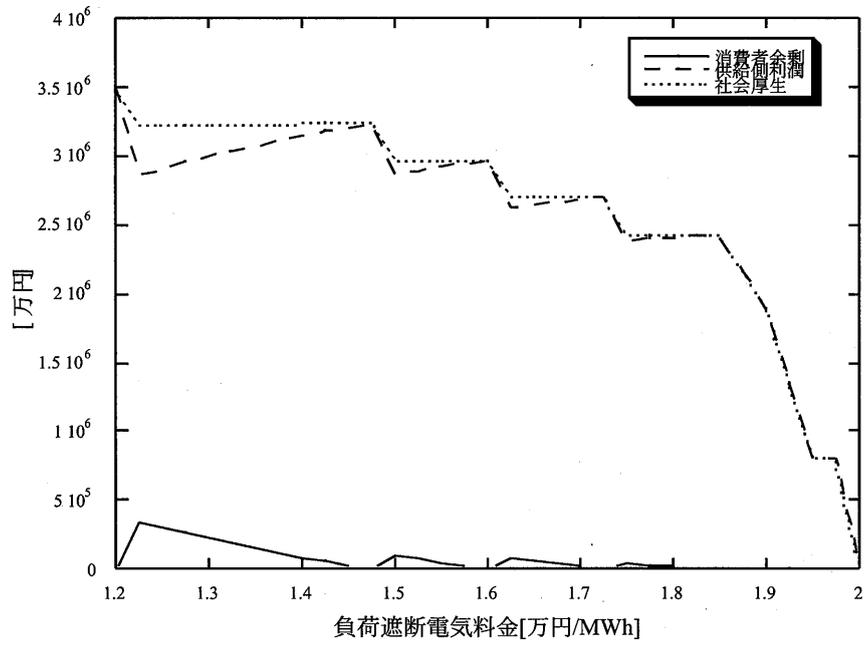


図 23: 需要家参加率パターン<3>

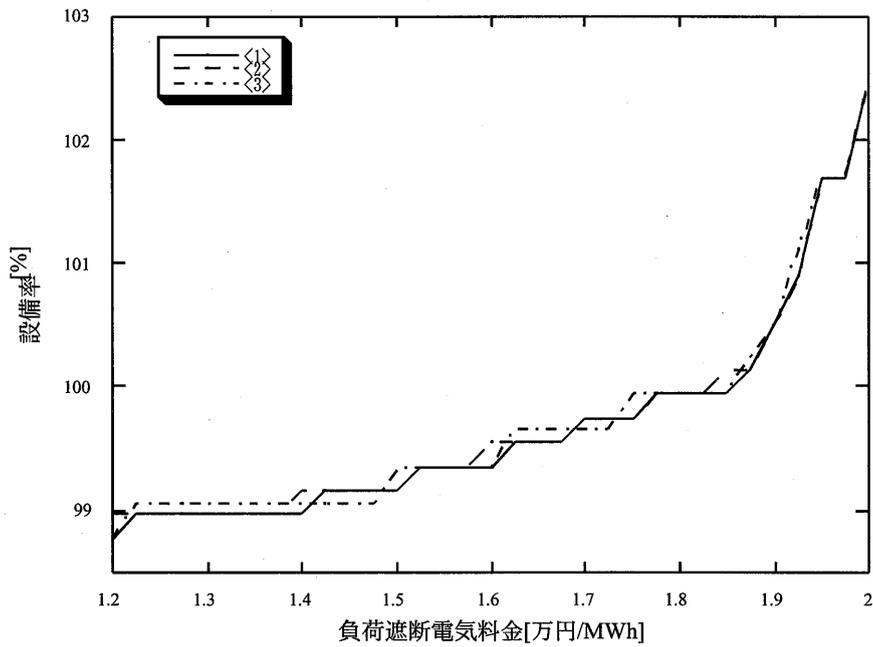


図 24: 設備率

検索法の精度の問題より、なめらかでないグラフが求まったが、以下の様に考察する。

図 21～23 より、供給側が利潤をもっても良いとした場合、社会厚生（消費者余剰＋供給側利潤）を最大とすると供給側が大きな利潤を得ることがわかった。これは、供給側が設備コストを削減した際に、それを需要家側に還元していない負荷遮断電気料金が設定されていることから供給側利潤が大きくなった。また、選択的負荷遮断プログラムに参加する需要家の割合が変化しても、ほとんど社会厚生が変わらない結果となった。これは、需要家が電気料金と供給信頼度をみて合理的に行動した結果、負荷遮断契約電力の需要量がほとんど同じ値になったからだと考えられる。

図 24 に、設備率の変動を示す。設備率もほとんど変わらない結果となり、設備率が変わらないと言うことは、供給信頼度もかわらないということであるから、電気料金が同じなら負荷遮断契約電力の需要量も同じになると考えられる。

6.2.2 供給側が利潤を持たない場合

現在、発電予備率は8~10%必要だといわれている。[10]しかし、本論文では発電機の計画外停止に対応できる予備力のみを考慮しており、本来考慮すべき出水変動確率と需要変動確率は考慮に入れていない。そこで、基準の予備率を発電機の計画外停止に対応できる割合（ここでは約2.5%）とした。

本項では、どの程度供給予備率を下げると一番効率が良いのかを求めた。この際、供給側の利潤は全て消費者に負荷遮断電気料金として還元し、利潤がないものとしてシミュレーションを行った。

図25に消費者余剰、図26にLOEPを示す。

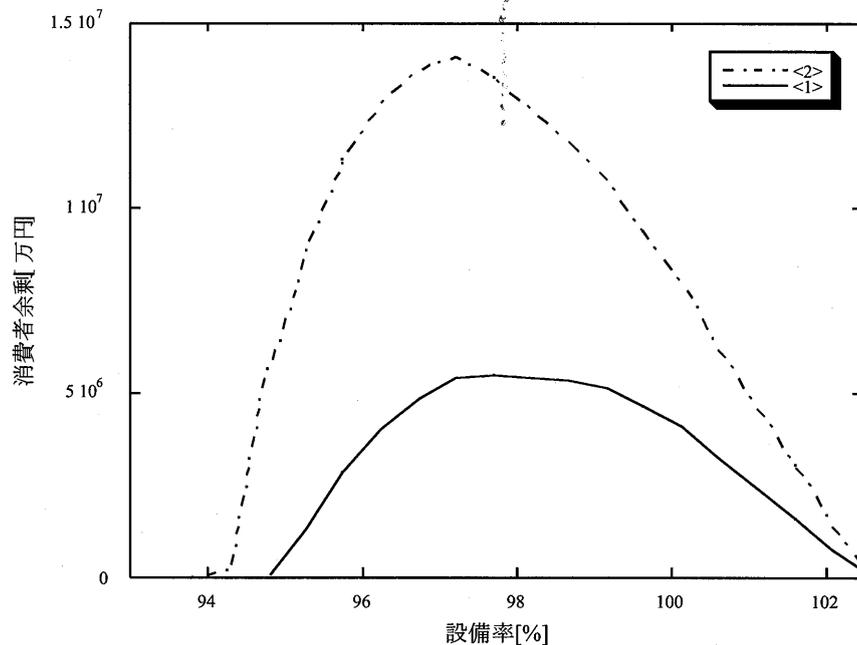


図25: 消費者余剰

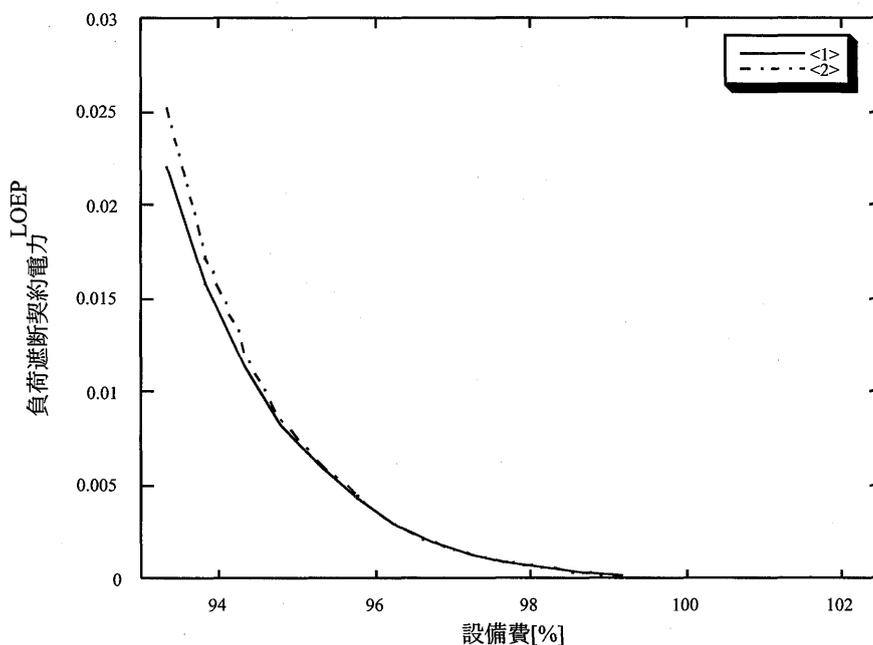


図 26: 負荷遮断契約電力のLOEP

図 25 より、供給予備率（設備率）を下げていくと消費者余剰が増え、予備率が約 3%（設備率 97%）辺りで最大値を取る結果となった。これは、設備コストを削減することによって得た利潤を、負荷遮断電気料金に反映し安くしているため消費者余剰が大きくなったと考えられる。しかし、更に予備率を下げていくと、負荷遮断電気料金が安くても、図 26 からわかるように停電が増えるので、それによって得られるはずであった効用が得られないために消費者余剰が減るといった結果となった。また、設備率 94.8%で消費者余剰は負の値をとっている。すなわち、選択的負荷遮断プログラムに参加するメリットがないということである。これは、負荷遮断電気料金によるメリットより、設備率を下げたために停電が増え効用が得られなくなったというデメリットの方が大きくなってしまったために、このような結果となった。また、需要家の参加率を変化させた場合には、メリットがある需要家が増えるわけだからメリットが大きくなった。

図 26 に、負荷遮断契約電力の LOEP を示す。設備削減を行えば行うほど、停電電力量は指数関数的に増えていくのでこのようなけっかとなった。また、通常契約電力の LOEP を考えると、選択的負荷遮断プログラムに参加する需要家の割合に関係なく、ほとんど 0 となると考えられる。本来なら、設備を削減すれば停電が増えるので LOEP が増加することになるが、選択的負荷遮断プログラムを導入することにより停

電を負荷遮断契約に吸収させることができるので、その結果通常契約電力の品質が高くなると言える。

第7章

結論

本論文では、FRIENDS や HEMS 等で導入可能な選択的負荷遮断プログラムという供給プランを考え、その機能である負荷遮断電力と通常電力の品質別電力供給が導入された際に需要家・供給側にどのような経済効果が及ぼされるのかについての検討を行った。影響を考察する際に過去に研究室で行ったアンケートから求めた各機器の限界効用[7]から効用曲線を描き、需要家が合理的に行動するように仮定し、需要家に及ぼす影響とその時の供給側の影響についての検討を行った。更には、発電電力量・過剰設備の削減による二酸化炭素排出量の削減に関する検討も行った。

簡略なモデルと供給予備力を考慮したモデルの2通りについてシミュレーションを行った。この結果、簡略なモデルは、従来の単一品質供給より負荷遮断契約を結ぶ品質別供給を導入する方が消費者余剰・供給側利潤とも高い値をとり、選択的負荷遮断プログラムを導入するメリットを示すことができた。また、その時二酸化炭素排出量もかなり削減できることがわかった。

供給予備力を考慮したモデルについては、社会厚生を最大にする場合と供給側の利潤をなくした場合を検討した。

まず、社会厚生を最大にした場合は、需要家の参加形態によらず供給信頼度が同じような値になるため、社会厚生はほぼ同じような値となった。また、供給側が設備コストを削減した際に、それをすべて需要家側に還元せずに負荷遮断電気料金が設定されていることから供給側利潤が大きくなった。

供給側の利潤をなくした場合は、設備率97%程度で消費者余剰が最大となり、設備も削減できる事ながら、通常契約電力の供給信頼度も高くなり、十分にメリットがあると考えられる。

このように、選択的負荷遮断プログラムを導入することにより、設備が削減でき供

給側にメリットがあり、需要家に対して安い負荷遮断電気料金で供給すると需要家にもメリットが生まれる。また、設備を削減したことによりCO2の排出量も削減でき、コスト面・環境面でも効果があると考えられる。

今後の課題としては、以下の2点が挙げられる。

- ・ 選択的負荷遮断プログラムに必要なスイッチ・情報通信設備等の設備費の考慮
- ・ 負荷遮断は一般的に大口需要家に対して有効とされているので、大口需要家に対しての経済効果の検討

付録

1. 消費者余剰

需要曲線に関連して展開されるもう1つの重要な概念に消費者余剰がある。消費者余剰はなぜ貨幣を保留しておかないで、貨幣と交換に財やサービスを購入するのかというと、それは購入しないで我慢するよりも、購入したほうが満足が大きいからにはほかならない。ここでは、需要曲線を用いて、貨幣の交換によって財やサービスから得られる効用を貨幣で測定し、消費者に生じる消費者余剰について試みる。図??における横軸 x_1 は需要量、縦軸 p_1 は価格であって、 D は消費者のある財に対する需要曲線である。需要曲線が意味することは、いま価格が $PM = NO$ ならば、 x_1 財は OM だけ需要されるだろうという計画表の域をでないが、ここでは消費者が実際に OM 量の x_1 財を購入するものとしよう。価格は OM のどの1単位に対しても同じであるから、消費者の支払う金額は $OM \times PM$ であって、図1では四角形 OMP_N で示される。

しかし、消費者が x_1 財の OM なしで済ますよりは、どれだけなら犠牲を厭わないかと考えると、それは四角形 OMP_N で示される額ではない。なぜならば、図1から読み取れるが、 OM 量より少ない x_1 財の数量に対しては、消費者は PM よりもっと高い価格で表示される評価を行っているからである。したがって、そのものなしで済ますよりは、むしろ進んで支払うことを辞さない額となれば x_1 財 OM に見合う支払い額は四角形 $OMPL$ である。この財貨の購入において四角形 $OMPL$ と四角形 OMP_N の差額三角形 NPL は、この財貨購入において、消費者に帰せられる利益であり、消費者余剰といわれるものである。

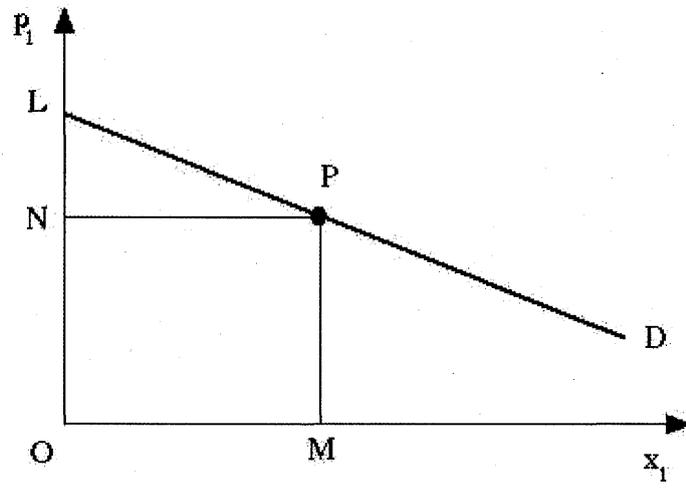


图1：消费者余剩

参考文献

- [1] 松川 「負荷遮断料金によるデマンドサイド・マネジメント」、エネルギー・資源学会、Vol.14、No.6、pp30-35 (1993)
- [2] M.Fotuhi – Firuzabad, Roy Billinton, “Impact of Load Management on Composite System Reliability Evaluation Short-Term Operating Benefits” IEEE Transactions on Power System, Vol.15 No.2, pp858-864, May 2000
- [3] 長谷川、奈良 「新しい柔軟な電気エネルギー流通システム」、電学論B、Vol.117、No.10、pp1324-1327 (1997-10)
- [4] 高橋、浅野 「離散型統合資源計画モデルによる次世代DSM システムの普及分析 その1：モデル開発」、電気学会電力・エネルギー部門大会、分冊A、論文Ⅱ、No.122、pp459-460 (2002-8)
- [5] 浅野、高橋 「離散型統合資源計画モデルによる次世代DSM システムの普及分析 その2：家庭用負荷制御プログラムの最適普及方策」、電気学会電力・エネルギー部門大会、分冊A、論文Ⅱ、No.123、pp461-462 (2002-8)
- [6] 久保田 「電力改質センターによる系統信頼度改善効果に関する検討」、修士論文、横浜国立大学(2001)
- [7] 下村 「品質別電力供給システムが需要家に及ぼす影響に関する検討」、修士論文、横浜国立大学(2002)
- [8] 藤井 「Interruptible Load 導入が電気事業者と需要家に与える影響に関する検討」、卒業論文、横浜国立大学 (2002)
- [9] 関根、林、芹沢、豊田、長谷川 「電力系統工学」、コロナ社
- [10] 田村 「電力システムの計画と運用」、オーム社
- [11] 尾島、田中 「DSMの時代 ～持続可能なエネルギー供給を目指して～」、早稲田大学出版部
- [12] 東京電力株式会社広報部 「数表でみる東京電力 平成13 年度」、東京電力株式会社
- [13] 東京電力ホームページ “<http://www.tepco.co.jp>”
- [14] FRIENDS ホームページ “<http://svr.huee.hokudai.ac.jp/friends/frame/index-j.htm>”

発表文献

- [1] 中村、大山 「Interruptible Load 契約が供給側及び需要家側に与える経済効果の検討」、電気学会全国大会講演論文集、No.6-111、pp197-198 (2002-3)
- [2] M. Nakamura, T. Oyama “A Study on Supply Side and Demand Side Economical Effect of Interruptible Load Contract”, International Conference on Electrical Engineering, Vol.1, pp103-106, Jeju, Korea (2002-7)
- [3] 中村、大山 「需要家端における選択的負荷遮断契約が需要家側・供給側に与える影響」、電力技術・電力系統技術合同研究会、PE-02-81 PSE-02-91 (2002-9)

第二部

アドバンスト DSM が社会余剰・環境へ及ぼす影響

要約

近年、電気事業は大きな転換期を迎えている。まず、世界進行している「自由化」である。従来、1社独占の下で行われてきた電気事業に自由化の波が押し寄せてきており、我が国も少しずつではあるが自由化の方向へ向かってきている。

次に「分散型電源」である。環境問題の高まりや、送電設備が不要なこと、分散型電源の低価格化などにより、今後、系統に小型の分散型電源が導入することが予想される。

3つめは「IT化」である。近年、情報技術の進歩はめざましく、さまざまな分野でIT化が進んできており、電力系統の分野でも例外ではない。昨今、電力系統の分野で注目を集めている次世代型エネルギー流通システムであるFRIENDS(Flexible, Reliable Intelligent ENergy Delivery System)等が導入された場合に、それに付帯した高速通信線によりさまざまなサービスが行えると考えられる。

本論文でのテーマである「アドバンスト DSM」はこの「IT化」により実現可能となるものである。従来、考えられてきたアドバンスト DSMは直接型 DSMによる「選択的負荷遮断契約」と間接型 DSMによる「リアルタイム料金」である。しかし、これらの DSMは「自由化」の下では大きな効果を発揮できず、系統に「分散型電源」が導入された場合にも対応できない。

そこで、本論文ではこれらの問題を解決する手法として、新しい間接型 DSMである、「報奨金型 DSM」を提案した。この「報奨金型 DSM」は、通常の場合だけでなく、機器故障などの負荷逼迫時にも需要家の負荷削減による余剰消失の分だけ報奨金を支払い、負荷を削減してもらう新しい「アドバンスト DSM」である。この「報奨金型 DSM」は間接型 DSMであるため機器故障に対して瞬時に対応することはできないが、発電機 1 台の故障に対して耐えられるように負荷制御していけば(n-1 基準)、非常に高い信頼度を保ったまま設備を削減することが可能になる。

本論文では、この「報奨金型 DSM」と従来の「選択的負荷遮断契約」を比較検討した。その結果「報奨金型 DSM」のほうが社会余剰と環境の面で大きな効果が得られることが分かった。

目次

要約 目次

第1章 序論	2-4
第2章 アドバンスト DSM	2-6
2.1 現在行われている DSM	2-6
2.2 アドバンスト DSM	2-6
2.2.1 選択的負荷遮断を用いた品質別電力供給	2-7
2.2.2 リアルタイム料金	2-8
第3章 リアルタイム料金が経済・環境へ及ぼす影響	2-9
3.1 負荷の大きさに比例させるリアルタイム料金	2-9
3.1.1 評価手法	2-9
3.1.2 リアルタイム料金設定	2-10
3.1.3 負荷変化	2-10
3.1.4 ベストミックス	2-11
3.1.5 標準料金の調整	2-11
3.1.6 試算結果	2-11
3.2 低負荷時と高負荷時のリアルタイム料金の価格差を大きくすると	2-13
3.2.1 料金の変化による社会余剰の変化	2-13
3.2.2 電源構成に制限が無い場合の試算結果	2-14
3.2.3 原子力発電の量を制限した場合	2-17
3.2.4 本節のまとめ	2-19
第4章 報奨金を用いたアドバンスト DSM	2-20
4.1 アドバンスト DSM の問題点	2-20
4.2.1 報奨金を用いた間接型 DSM	2-21
4.2.2 報奨金の設定	2-21
4.2.3 モデル	2-23
4.2.3 直接型 DSM との比較	2-24
4.2.5 結果と考察	2-24
第4章 結論	2-28

参考文献
发表文献

第1章

序論

近年、電気事業は大きな転換期を迎えている。まず、世界進行している「自由化」である。従来、電力・ガス・水道などの産業は、公益事業として政府の規制の下に置かれてきた。しかし、これらの公益事業にも競争原理を導入し料金の低廉化を図ろうとする動きが出てきており、我が国も少しずつではあるが自由化の方向へ向かっている。

次に系統への「分散型電源」の導入である。環境問題の高まりや、分散型電源の低価格化、自由化による過剰設備投資によるリスク回避などにより、今後、系統に小型の分散型電源が導入することが予想される。

3 つめは「IT 化」である。近年、情報技術の進歩はめざましく、さまざまな分野で IT 化が進んできており、電力系統の分野でも例外ではない。将来、系統に次世代型エネルギー流通システムである FRIENDS(Flexible, Reliable Intelligent ENergy Delivery System)等が導入された場合に、それに付帯した高速通信線によりさまざまなサービスが行えると考えられる。本論文でのテーマである「アドバンスト DSM」はこの「IT 化」により実現可能となるものである。

DSM とは、需要側と供給側が協調する事により、効率的に電力システムを運用し需要家側と供給側の双方にもたらす方策である。近年、環境問題の高まりにより、CO₂ 排出量の多いピーク電源を削減する意味でも DSM は重要になってきている。

本論文で述べられている「アドバンスト DSM」は、「IT 化」を利用し、需要家の機器を直接制御するなど高度な DSM を行うことである。今まで考えられてきたアドバンスト DSM は直接型 DSM による「選択的負荷遮断契約」と間接型 DSM による「リアルタイム料金」である。

「選択的負荷遮断契約」は需要家があらかじめ効用の低い電気機器をセッティングしておき、負荷逼迫時にそれらの機器を遮断する代わりに普段の電気料金を割り引いてもらうプログラムである。需要家に料金は高くてもよいから高品質の電力を望む需要家と、多少の停電は許容できるので安価な電力を望む需要家が存在するのでこのプログラムは非常に有効であるといえる。しかし、需要家の効用は時々刻々変化するため、需要家としても効用の高い機器をこのプログラムに参加させることはできず、このプログラムに参加できる需要は全体

の 10%程度だといわれている。また、自由化が進み需要家が市場から購入するようになるとこのプログラムは意味をなさなくなる。

「リアルタイム料金」は時々刻々と変化する需要に合わせて料金を変化させていく間接型 DSM であるが、これは、直接型 DSM と違い需要家が自分判断で機器を制御できるため、需要家の意思が尊重される DSM だといえる。また、機器故障時などに料金を急激に上げるなどして信頼度を保つプログラムも考えられる。しかし、間接型 DSM は直接型 DSM と違い、瞬時に負荷遮断を行うことが出来ないため負荷逼迫時に機器故障が起きたときに対応できない。また、料金の変動を嫌う需要家も多く参加者は望めない。参加者が少ないと設備量の削減を効果的に行うことが出来ず、電気料金の削減も望めないため DSM 参加者も少なくなるという悪循環となる。

そこで、本論文ではこれらの問題を解決する手法として、新しい間接型 DSM である、「報奨金型 DSM」を提案した。この「報奨金型 DSM」は、通常の負荷逼迫時だけでなく機器故障などの負荷逼迫時にも需要家の負荷削減による余剰消失の分だけ報奨金を支払い負荷を削減してもらおう新しい間接型「アドバンスト DSM」である。この「報奨金型 DSM」は間接型 DSM であるため機器故障に対して瞬時に対応することはできないが、発電機 1 台の故障に対して耐えられるように負荷制御していけば(N-1 基準)、非常に高い信頼度を保ったまま設備を削減することが可能になる。

この「報奨金型 DSM」は「自由化」後や系統への「分散型電源」導入時などの機器故障に対して使用することも可能である。

本研究では、この「報奨金型 DSM」と従来の「選択的負荷遮断契約」の 2 種類の DSM を社会余剰と環境の面から比較検討し「報奨金型 DSM」の有効性を示していく。

2章 アドバンスト DSM

2.1 現在行われているDSM

現在行われている DSM には、主に次の3つがある。

- (1) 情報提供
- (2) 季時別・時間帯別料金（間接型 DSM）
- (3) 負荷逼迫時の負荷遮断契約（直接型 DSM）

(1)は供給者側が需要側はピーク削減のための情報を提供するものである。平成16年夏に「東京電力が実施した「でんき予報」などがこれにあたる。

(2)はもっともオーソドックスな DSM であるが、ピークカットだけでなく、ボトムアップの効果もあり、工業の需要家などが積極的に参加している。しかし、事前に提示されるメニューに基づいた間接型 DSM であるので事故などの緊急時に対する効果はない。

(3)は需要逼迫、発電機故障などのときに負荷遮断する代わりに、通常時の電気料金を安くする契約である。しかし、急な負荷の全遮断は事故の危険や、生産ラインのストップを嫌う需要家が多いため参加者は非常に少なく、また、電力会社側も積極的に負荷遮断を行わず予備率を増やしているのが現状である。

2.2 アドバンスト DSM

1章で述べたように、近年急速に進む電力系統の「IT化」により高度な DSM である「アドバンスト DSM」の実現が考えられている。著者らはこれまで、アドバンスト DSM の具体的な方策として主に次の2つを検討してきた。

- (1)リアルタイム料金(間接型DSM)⁽¹⁾
- (2)選択的負荷遮断契約(直接型DSM)⁽²⁾

(1)は時々刻々と変化する需要に合わせて電気料金を変化させていく方策であり、通常の時間帯別料金よりきめ細かく負荷を制御することが可能である。また、事故時に電気料金を急騰させ信頼度を維持することも考えられる。この方策は1社独占の下ですべての需要家に対して強制的に行うと非常に効果的である。しかし、自由化が進行し需要家が料金プランや、電力購入先を選択できるようになると効果は半減する。

(2)は需要家があらかじめ負荷逼迫時に遮断する機器を決めておき、緊急時に負荷遮断をするプログラムである。通常の負荷遮断と違い、効用の低い機器(クーラーなど)のみの遮断となるので需要家の効用損失は少なく、電力会社側も積極

的に設備削減が可能となる。しかし、急な機器遮断を嫌う需要家も多いため、多数の参加者を望むことは難しく多くてもピーク負荷の 10%程度と思われる。また、自由化により新規参入の電気事業者が増えてくると、需要家の電力購入先の分散により参加者はさらに少なくなるものと思われる。

両方に共通する欠点として「事前契約が必要で多くの参加者が望めない」、「自由化による効果の減少」という問題がある。

2.2.1 選択的負荷遮断契約を用いた品質別電力供給⁽¹⁾

図 2.1 に「供給信頼度水準の要求水準と供給確率」のグラフを示す。これは、需要家の要求する信頼度とその信頼度に対する需要量である。このグラフには示されて無いが、供給信頼度が低くなるにつれて電気料金が安くなることが前提となっている。このグラフから分かるように、需要家は価格が多少高くても高品質を必要とする用途と品質は多少悪くても価格が安いことが望まれる用途があるはずである。

多種多様な需要に対して、要求水準を満たすこと(品質別供給)が実現されれば、図 2.1 において現行の電力系統での信頼度×需要の面積よりも小さくなることが分かる。つまり、品質別供給が実現されれば必要とされる品質、信頼度での供給が可能となり、全体として過剰設備となることが避けられるのではないかと期待できる。

品質別電力供給では、負荷逼迫時に強制負荷遮断プログラムが考えられるが、(1件の)需要家が全停電してしまうのは非常に効用の損失が大きく、また、金額で表せない部分も存在すると思われる。そこで、「アドバンスト DSM」で提唱されているのは、需要家があらかじめ効用の低い機器をセッティングしておき、緊急時にその効用の低い機器のみを強制負荷遮断を行うプログラムである。これは、機器故障などの緊急時にも瞬時に対応でき、信頼度確保にもつながる。しかし、需要家の効用は時々刻々変化しており、瞬時に負荷遮断されることを嫌う需要家も多いため、このプログラムにたくさんの参加率は望めない。

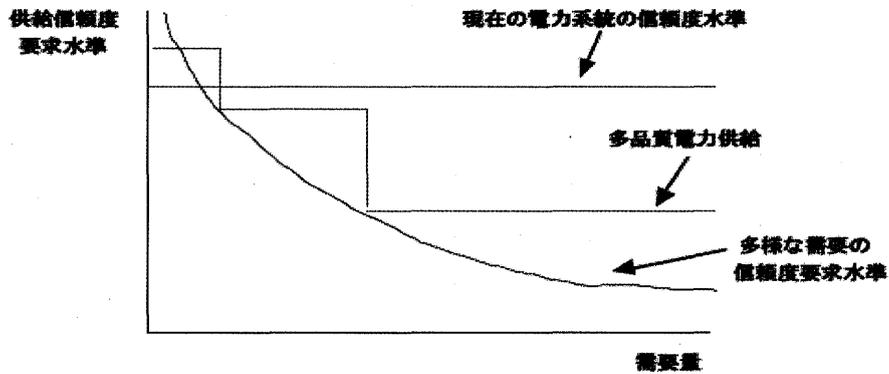


図 2.1 供給信頼度水準の要求水準と供給確率

2.2.2 リアルタイム料金

リアルタイム料金とは時々刻々と変化する需要に合わせて料金を変化させる方策である。これはピークカットとボトムアップの両方の効果があり、需要家の意思も反映することができる。また緊急時に料金を高騰させることにより信頼度の確保も可能である。これは、電力会社一社独占の下で全需要家に強制的に行うのが有効である。しかし、電気事業の規制緩和が進行し需要家に選択肢が出てくると参加率が低くなり効果が小さくなり、また、緊急時に料金を高騰させるという方策も、瞬時性が無いため負荷逼迫時に事故が起こったら対応することが出来ない。リアルタイム料金の及ぼす影響に関しては第3章で詳しく説明する。

第3章

リアルタイム料金が経済・環境へ及ぼす影響

本章ではアドバンスド DSM の中でも間接型 DSM であるリアルタイム料金に焦点を当てて、電源ベストミックスを考慮しつつ環境面と経済面から検討していく。

3.1 負荷の大きさに比例させるリアルタイム料金

3.1.1 評価手法

リアルタイム料金設定の導入効果を評価するためには、料金の変動に対応した電力需要の変動、電源構成や発電電力量の変化など、相互に影響を及ぼしあういくつかの要素を同時に考慮する必要がある。そこで、本稿では図 3.1 に示す手順で試算を行うこととした。以下に、各ステップでの計算内容を述べる。

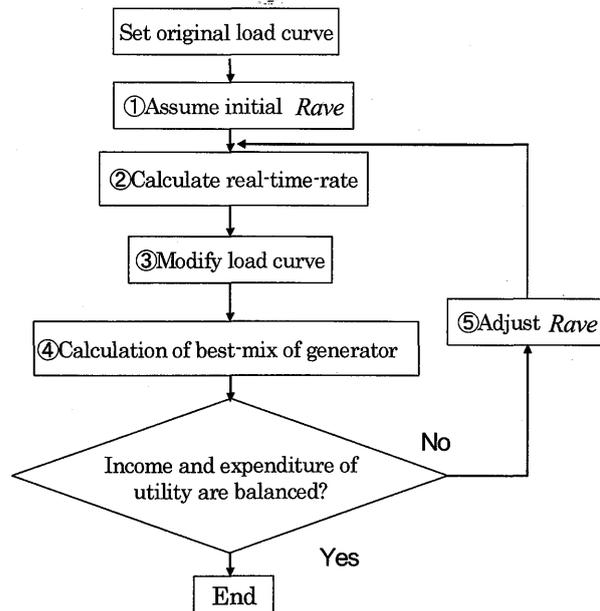


図 3.1 標準料金設定のアルゴリズム

Fig.3.1 Algorithm to set up standard rate

3.1.2 リアルタイム料金設定

リアルタイム料金設定の基本的なアイデアは、負荷の大きいときに料金を高くし、逆に負荷の小さいときに料金を安くすることで負荷の平準化を狙うことにある。本節ではリアルタイム料金 R_t の設定を次式のように平均負荷 L_{ave} とその時間の負荷 L_t との比に標準料金 R_{ave} を掛け合わせた単純なものとした。

$$R_t = R_{ave} \times \left(\frac{L_t}{L_{ave}} \right) \dots \dots \dots (3.1)$$

なお、図1の繰り返し計算における R_{ave} の初期値としては、東京電力の電気料金総合単価である 20.3[円/kWh]を用いた。

3.1.3 負荷変化

料金変化に対応した負荷の変化は価格弾力性 γ を用いて、次式のように表すことができる。

$$L_t = L_{t0} \left(\frac{R_t}{R_0} \right)^{-\gamma} \dots \dots \dots (3.2)$$

今回の試算では文献[]に従い、時間帯別にピーク、ミドル、オフピークの順に価格弾力性 γ が大きくなるよう、表 4.1 のように設定した。

表 3.1 時間帯別の価格弾力性
Table3.1 Price elasticity of time-of-day

Duration	Price elasticity γ
Peak (9:00 ~ 17:00)	0.1
middle (7:00 ~ 9:00, 17:00 ~ 23:00)	0.2
Off-peak (23:00 ~ 7:00)	0.3

表 3.2 各発電機の諸特性
Table3.2 Characteristics of generator

発電方式	可変費	固定費	CO2(建設・運用)	CO2(燃料)
単位	[円/kWh]	[円/kW/年]	[kg/kW/年]	[kg/kWh]
原子力	1.3	51000	46.3	0
石炭火力	3	39000	65.8	0.887
LNG火力	5	29000	212.2	0.478
石油火力	7	23000	50.4	0.704

3.1.4 ベストミックス

発電設備と運転時間のベストミックスはスクリーニング法を用いて求めることとする。その際に必要となる各発電機の固定費、可変費は文献[]を参考に表 3.2 のように設定した。

3.1.5 標準料金の調整

リアルタイム料金設定を行うと、電気料金収入や電源構成が変化するため、電力会社の利益が変化する。そこで、電力会社の公益性を考慮して、ここでは利益増分は標準料金の割引という形で需要家に還元することにする。当然電気料金を割り引くとそれに伴い負荷も変化し、ベストミックスも変化することになり、それをまた標準料金に反映させていかなければならない。本研究では、この計算を電力会社の利益増分が 0 になるまで繰り返すことで、最終的な料金設定を決める。

3.1.6 試算結果

以上の評価手法を用い、リアルタイム料金設定の導入効果を試算した。試算に用いた基準負荷モデルとしては、文献[]を参考に住宅負荷 50%、工業負荷 25%、商業負荷 25%から成る需要を考え、その最大負荷は文献[]を参考に 60000MW に設定した。また、各発電機の CO2 排出量の特性は文献[]を参考に表 3.2 に示すと通りとした。

試算結果として、リアルタイム料金設定導入前後の年負荷持続曲線、電源ベストミックス、各種コスト、標準料金、CO2 排出量を図 3.2、表 3.3~3.5 に示す。表 3 の電源構成が経済的に最も電力会社のコストが小さい電源構成であるが、このとき CO2 排出原単位を約 22%削減することができ、電気事業における CO2

排出原単位の 20%低減の目標を達成することができる。これは負荷平準化に伴い、最も発電コストが安く、CO2 排出のない原子力発電の分担が増加したことに起因する。

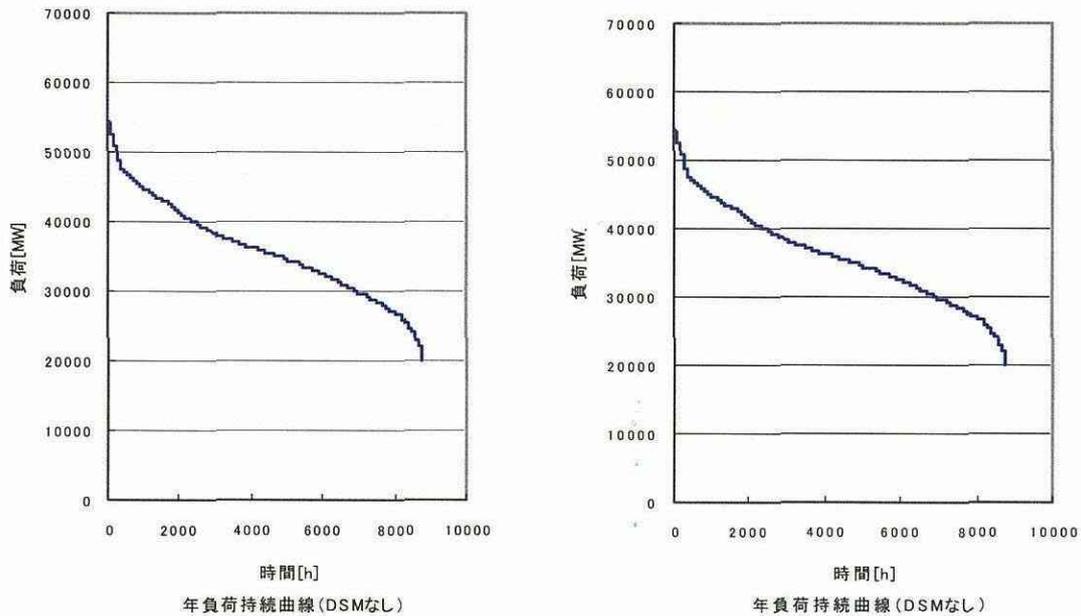


図 3.2 DSM 前後の年負荷持続曲線

表 3.3 設備コストと標準料金の変化

Table.3.3 Change of facility and generation costs and standard rate

	DSM 前	DSM 後
設備コスト[億円/年]	23104.8	22673.1
発電コスト[億円/年]	6081.312	5732.008
標準料金[円/kWh]	20.3	19.88

表 3.4 CO2 排出量の変化

Table.3.4 Change of CO2 emission

CO2 排出量	DSM 前	DSM 後
建設・運用[kg/年]	3.5×10^8	3.2×10^8
発電[kg/年]	4.4×10^{10}	3.5×10^{10}
排出原単位	0.142	0.111

3.2 低負荷時と高負荷時のリアルタイム料金の価格差を大きくすると

前節ではリアルタイム料金 R_t の設定を次式のように平均負荷 L_{ave} とその時間の L_{t0} との比に標準料金 R_{ave} を掛け合わせた単純なものであったが、この節では、低負荷時高負荷時の差を大きくしてみる。(1)式の α を大きくするにつれて最大負荷時と最小負荷時のリアルタイム料金の差が大きくなる仕組みになっている。

$$R_t = \alpha \times R_{ave} \times \frac{L_{t0} - L_{ave}}{L_{ave}} + R_{ave} \dots (3.3)$$

この式の α を変化させて行き、これにより社会余剰と CO2 排出量の推移求めていく。

3.2.1 料金の変化による社会余剰の変化

下にもう一度(3.2)式を示す。この式は R_0 と L_{t0} が定数であるため、 L_t を R_t の関数と表すことができる。この式を R_t から R_0 まで積分区間を取り R_t で積分すると、消費者余剰の変化分を求めることが出来る。これを式で表すと式(3.4)のようになる。

$$L_t = \frac{L_{t0}}{R_0^{-\gamma}} \times R_t^{-\gamma} \dots (3.2)$$

$$\Delta S = \frac{L_{t0}}{R_0^{-\gamma}} \int_{R_0}^{R_t} R_t^{-\gamma} dR_t \dots (3.4)$$

社会余剰とは供給者の余剰と消費者の余剰を足し合わせたものであるが、本節の料金設定では供給者の余剰を需要家に還元しているため、需要家の余剰増分が社会余剰の増分となる。需要家の余剰増分は(3.2)式の需要曲線を用いて、図 3.3 の斜線部分の面積で表すことが出来る。これを式で表すと(3.4)式のようになる

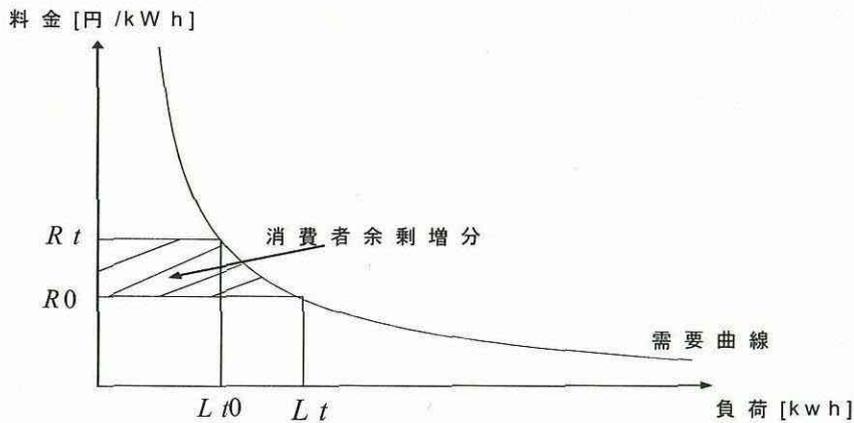


図 3.3 需要曲線と消費者余剰の変化分

3.2.2 電源構成に制限がない場合の試算結果

以上の評価手法を用い、リアルタイム料金設定の導入効果を試算した。試算に用いた基準負荷モデルは 4.1 節と同じである。

試算結果として、 α を変化させた場合のリアルタイム料金設定導入前後の負荷の変化、電源ベストミックス、料金の変化、社会余剰、CO₂ 排出量の変化を図 3.4~3.8 に示す。

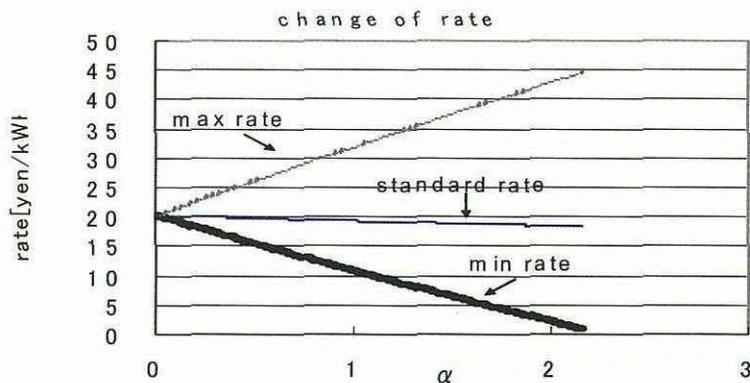


図 3.4 α の変化に対する各料金の変化

Fig.3.4 Band of real-time-rate vs α .

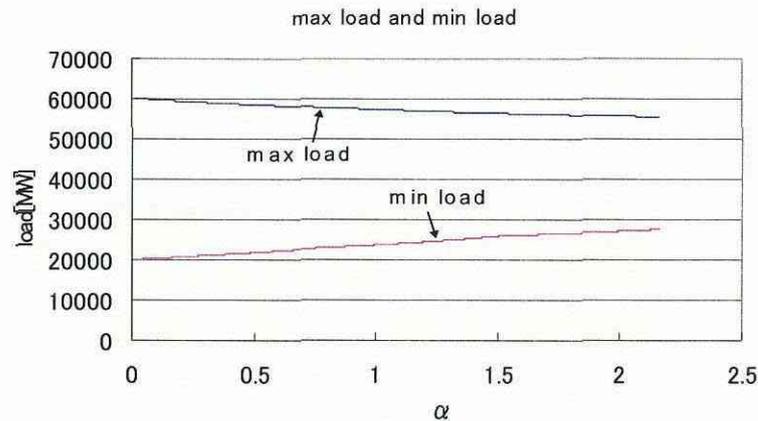


図 3.5 □の変化に対する最大・最小負荷の変化
 Fig.3.5 maximum and minimum load vs α

図 3.4 より、 α の値を大きくするにつれ、標準料金が下がっていく様子が伺える。これは、後述するように α が大きくなるにつれて供給側の利益が増加し、それが標準料金に還元されているためである。なお、 α を 2.17 以上に設定すると最低料金が負になってしまうため、以下の説明では $0 < \alpha < 2.17$ の範囲に限定することとする。また、図 3.5 では最大負荷の減少幅より最小負荷の増加幅が大きくなっているが、これは、ピーク時の価格弾性値よりオフピーク時の価格弾力性のほうが大きいからである。

このような需要の変化に伴い、電源構成は図 3.6 のように安価なベース電源である原子力発電が増加し、石炭、LNG、石油の比率が減少している様子が分かる。すなわち、リアルタイム料金を導入することで、より安価に発電することが可能となるため、 α の増加に伴い需要家の余剰も図 3.7 のように増加する。また、発電時に CO2 を排出しない原子力の比率が増加するため、CO2 排出量も図 3.8 に示すように大幅に削減できることが分かる。すなわち、電源構成に制約が無い場合には、リアルタイム料金制度を実施することで経済的にも環境的にも望ましい供給体制を構築できることが期待できる。

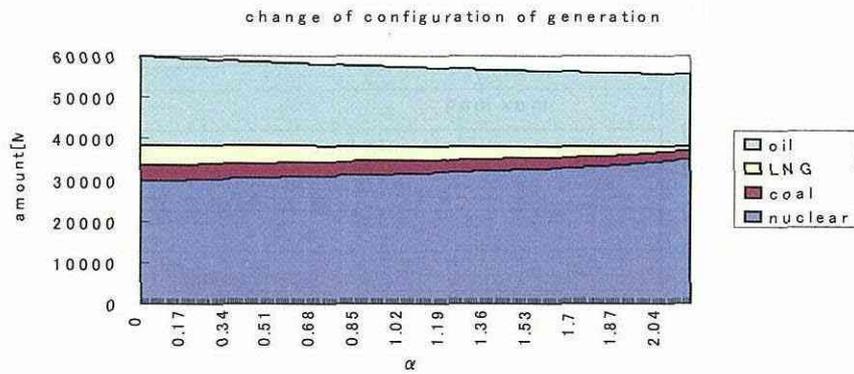


図 3.6 α の変化に対する電源構成の変化
 Fig.3.6. Change of configuration vs α

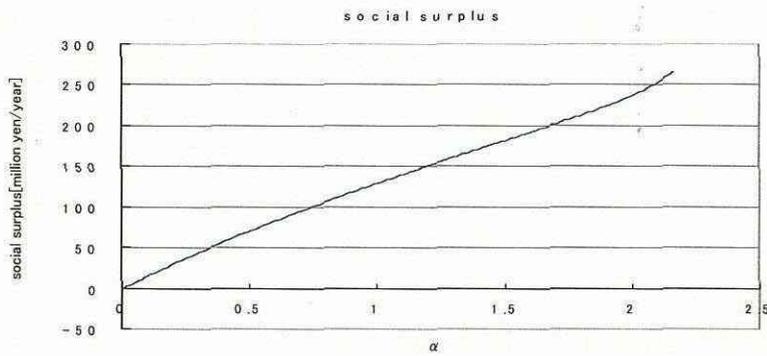


図 3.7 α の変化に対する社会余剰の変化
 Fig.3.7. Change of social surplus vs α

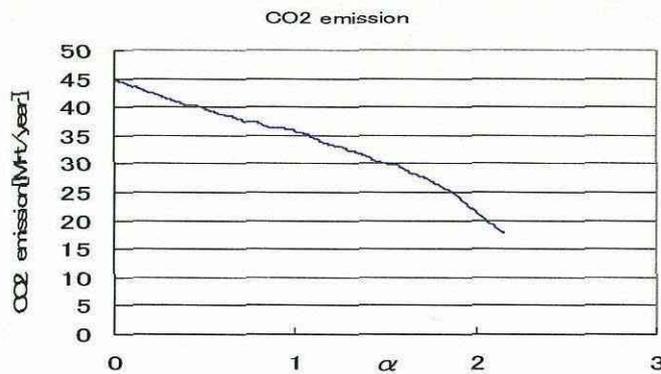


図 3.8 α の変化に対する CO2 排出量の変化
 Fig.3.8. Change of CO2 emission vs α

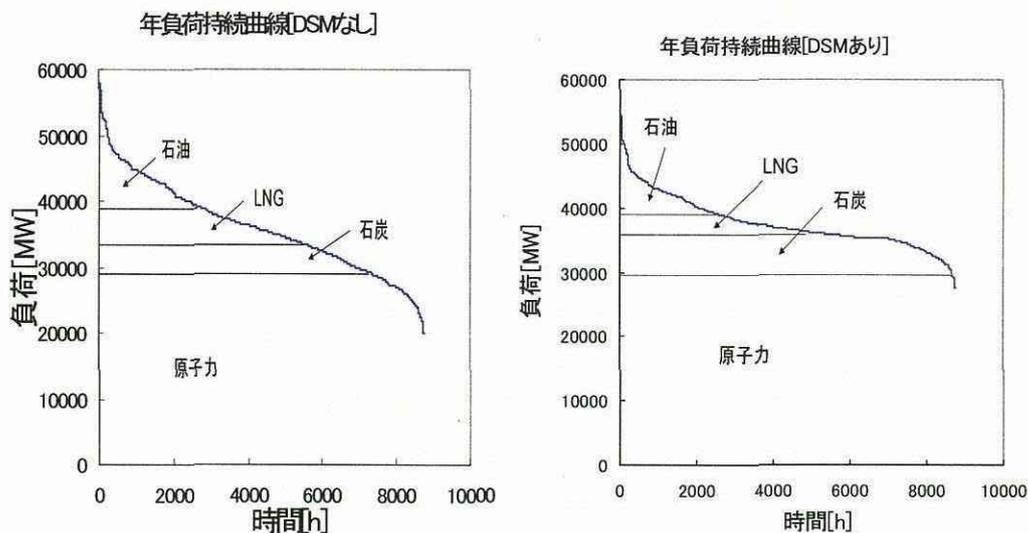


図 3.9 DSM 前後の年負荷持続曲線と電源構成

ここで、 α が最小のときと最大のときの年負荷持続曲線と電源構成を見てみる。 α が最大のとき原子力発電の割合が大半を占めており、この図からも社会余剰が増加し、CO2 排出量が減少するのも納得できる。

3.2.3 原子力発電の量を制限した場合

図 3.9 で α が最大のとき、原子力発電の設備量が 6 割以上を占めている。しかし現実的には立地上や運用上の制約により、原子力発電の設備量が制限される場合が考えられる。この節では原子力発電の設備量を $\alpha = 0$ のときの 29670MW に制限した場合を想定して試算した。

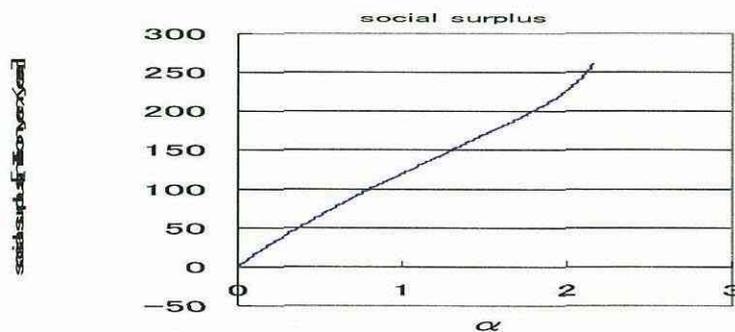


図 3.10 α の変化に対する社会余剰の変化
Fig.3.10 Change of social surplus vs α

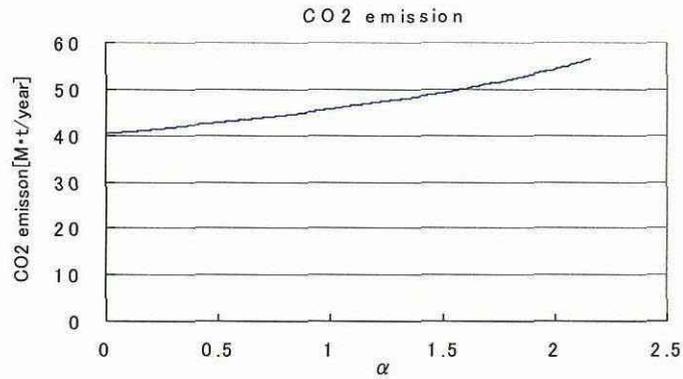


図 3.11 α の変化に対する CO2 排出量の変化
 Fig.3.11. Change of CO2 emission vs α .

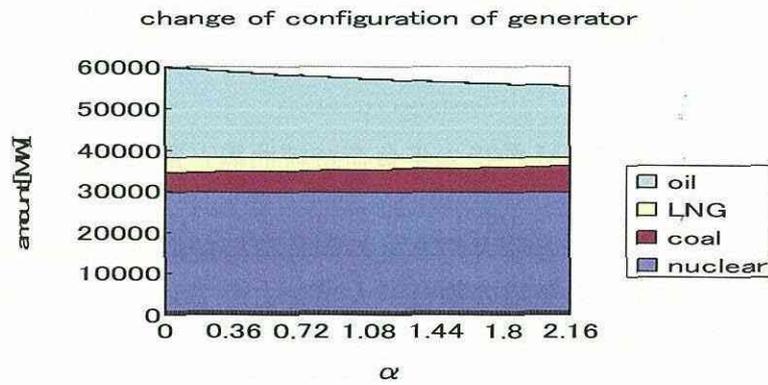


図 3.12 α の変化に対する電源構成の変化
 Fig.3.12. Change of configuration of generator vs α .

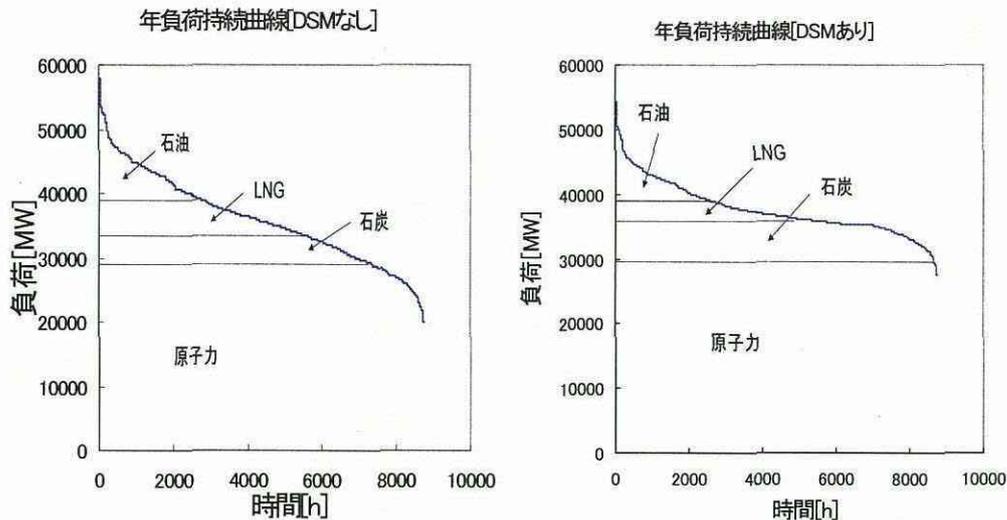


図 3.13 DSM 前後の年負荷持続曲線と電源構成

図 3.10～図 3.13 に α が変化した場合における、社会余剰、CO₂ 排出量、電源構成の変化を示す。図 3.10 を見ると α を大きくするにつれて図 3.7 と同様社会余剰が増加するが、図 3.11 を見ると CO₂ 排出量も増加していくのが分かる。

これは図 3.12 のように α を大きくするにつれて原子力の設備量を増加する代わりに、原子力発電の次に発電費用が安く、CO₂ 排出量が最も多い石炭火力の発電量が増加していることに起因する。

これにより立地条件や運用制約があり原子力発電の設備量に制約がある場合には、リアルタイム料金を行うと、消費者の余剰的には望ましくなるが環境的に悪化していくことが分かる。

環境面と消費者余剰のどちらに重みをおくかで、リアルタイム料金を行うべきかどうかの選択が分かれる。この2つの重み付けを変化させ、どのようなリアルタイム料金設定が最も社会的に望ましいかを調べるのが今後の課題として残る。

3.2.4 本節のまとめ

本節では、負荷平準化の方策の1つとして期待されている DSM の中でも特に、リアルタイム料金制度に焦点をあて、その導入効果を経済性・環境性の観点から検討した。その結果、立地条件や運用制約に問題が無く自由に電源構成を決定できる場合は、リアルタイム料金の最大料金と最小料金の差を大きくすれば、社会的にも環境的にも望ましくなるということが分かった。しかし、立地条件や運用制約により原子力発電の設備量に制約がある場合には、リアルタイム料金の最大料金と最小料金の差を大きくすると、消費者の余剰的には望ましくても、環境的に悪化していくという結果が出た。

第4章

報奨金を用いた間接型アドバンスト DSM

第2章で述べた通り、アドバンスト DSM に直接型、間接型の2種類があり、それぞれに長所・短所があることが分かっている。本章ではそれらの短所を補う手法として「報奨金型 DSM」を提案した。本章ではこの「報奨金型 DSM」と従来の「選択的負荷遮断契約」、「DSMなし」の3つのプログラムを経済・環境の面から比較・検討した。

4.1 アドバンスト DSM の問題点

ここでもう一度、直接型 DSM・間接型 DSM の長所・短所をおさらいしておこう。

- ・ 直接型 DSM(選択的負荷遮断契約)

長所：瞬時に負荷遮断が出来るため、発電機故障などの緊急時には特に有効である。

短所：需要家の効用は時々刻々変化するため、緊急時に必ず効用の低いものから遮断できるとは限らない。そのため、多くの需要家の協力が得られない。

- ・ 間接型 DSM(リアルタイム料金)

長所：需要家が料金を見てから機器を制御できるので、需要家の意思が反映される。また、緊急時に料金を急激に高くするプログラムも考えられる。

短所：需要家が料金を見てから機器を制御するため、発電機故障などの緊急時には適用できない。また、電力自由化後には多くの協力者を望むことは出来ない。

- ・ 両方のプログラムに共通する欠点は「多くの参加者を望めない」「自由化による効果の減少」である。特に自由化は世界的に進行しており、それに対応できる DSM を考案することは至上命令である。

4.2.1 報奨金を用いた間接型 DSM

これらの問題を解決する手法として、報奨金を用いた間接型アドバンスト DSM(以下報奨金型 DSM)というものを考える。報奨金型 DSM とは、負荷逼迫時に需要家に負荷削減要求を行い、協力してくれた需要家に対してはそれに見合った報奨金を払う新しいアドバンスト DSM である。

「報奨金型 DSM」の特徴は、事前の契約が不要であり、自由化により需要家の電力購入先が分散するようになってもすべての需要家の協力を得ることが出来る。問題点としては、間接型 DSM であるため事故時に瞬時に対応できないという問題点がある。この問題を解決する手段として本論文では発電機 1 台故障に耐えられるように需要を制御することを考えた(N-1 基準)。これにより非常に高い信頼度を維持することが可能である。N-1 なので基本的には多重事故発生時にのみ停電の危険が残っているが、多重事故の発生時期がある程度ずれている場合には、最初の事故発生後に他の事故に備えて再度予備力(ここでは遮断用負荷の契約)を確保するので(つまりこの時点では N を元の設備数とすれば N-2 になっているので)引き続き起こる事故にも対応可能であるため N-1 基準でも非常に高い信頼度を維持することが可能である。電子マネーが流通している現代においてこれらのプログラムを行うことはそれほど困難なことではないと思われる。

4.2.2 報奨金の設定

図 4.1 に需要曲線と負荷削減による消費者余剰損失を示す。定額料金 R_{before} のとき需要は L_{before} である。これを、負荷削減目標である L_{after} にするためには、料金を R_{after} まで増加させないといけない。この関係を式で表すと式(4.1)のようになる。式(4.1)の描く軌跡を需要曲線として扱う。ここで、 L_{before} の需要を L_{after} へ削減することを考える。これを式で表すと式(4.1)を変形して式(4.1')のように表すことができる。このときの需要家の余剰消失 ΔS_{con} は式(4.2)で表せ図 4.1 の斜線部分の面積となる。この余剰消失分以上の報奨金を払えば需要家は負荷を削減すると考えられる。報奨金の額としては、消費者余剰消失分支払えばもっとも払う報奨金としては少なくなるが、だが、そうすると各需要家別に単位削減量あたりの報奨金の額が異なり不公平が生じるため現実的ではない。そこで本論文では、すべての需要家に単位削減量あたり $R_{after} - R_{before}$ の報奨金をあたえることを考える。時間断面の報奨金の総額は図の四角形(incentive の部分)の面積となる。このようにすると報奨金の総額は多くなるが報奨金の総額から負荷削減によく消費者余剰消失分を引いた分が消費者の余剰増分となるため社会余剰は変化しない。

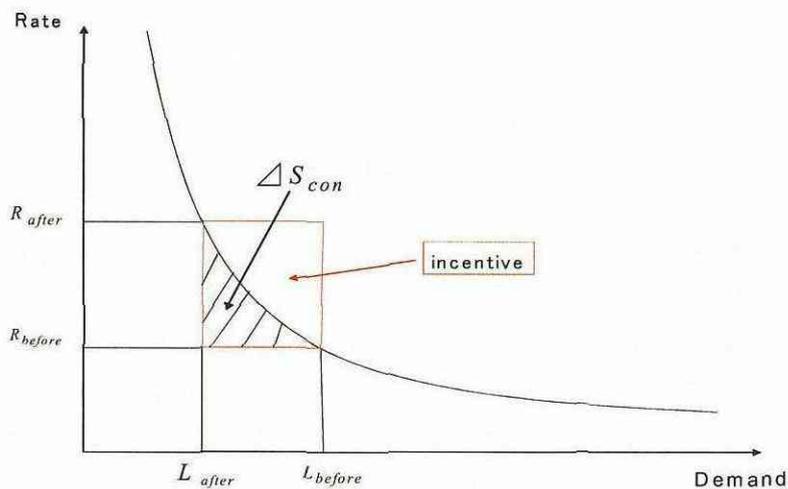


図 4.1 負荷削減と余剰損失

$$\frac{R_{after} - R_{before}}{R_{before}} = -\gamma \left(\frac{L_{after} - L_{before}}{L_{before}} \right) \dots (4.1)$$

$$L_{after} = L_{before} \left\{ -\gamma \left(\frac{R_{after} - R_{before}}{R_{before}} \right) + 1 \right\} \dots (4.1')$$

$$\Delta S_{con} = \int_{L_{before}}^{L_{after}} L_{after} dL_{after} + R_{ave}(L_{before} - L_{after}) \dots (4.2)$$

γ : 価格弾力性

L_{before} : 逼迫時の需要[MWh]

L_{after} : 報奨金による目標とする負荷[MWh]

R_{after} : L_{after} のときの料金[MWh/yen]

R_{before} : 定額料金[MWh/yen]

ΔS_{con} : 消費者余剰の損失[yen]

4.2.3 モデル

表 4.1～表 4.3 に試算に用いたモデルを示す^{(2)~(6)}。料金は定額 20yen/kWh、負荷は最大 60000[MW]で住宅 50%,商業 25%,工業 25%とする。設備容量は原子力については運用上の制約を考え、最低負荷の 20000[MW]とし、その他の電源はスクリーニング法で求めた値に従う。初期の設備率は 105%とし、そこから予備率を減らしていくとする（石油火力の発電機を 1 台ずつ削減していく）。

社会余剰の算出は下式のように行う。本来は供給側の余剰を需要家に還元しなければならないが、ここでは、社会余剰のみを考えているのでそれは考慮に入れないこととする。

- ・ 社会余剰 = 供給側の余剰 + Δ 需要家の余剰
- ・ 社会余剰 = 供給側の売り上げ - 発電費用
- 需要家の余剰損失

表 4.1 発電容量と故障データ

Generator type	capacity [MW]	number	accident probability [%]	accident continuance time [h]
oil	500	49	2	56
LNG	500	7	2	56
coal	500	30	2	56
nuclear	1000	20	2	56

表 4.2 各発電機の固定費と可変費

generator type	variable cost [¥/kWh]	fixed cost [¥/kW/year]
oil	1.3	23000
LNG	3.0	29000
coal	5.0	39000
nuclear	7.0	51000

表 4.3. 各発電機のCO2 排出特性

generator type	construction [kg/kW/year]	generation [kg/kWh]
oil	50.4	0.704
LNG	212.0	0.478
coal	65.8	0.887
nuclear	46.3	0

4.2.4 直接型 DSM との比較

この節では「報奨金型 DSM」の効果を示すため、従来の「DSM なし」「選択的負荷遮断」の3つを社会余剰・環境の面から比較・検討していく。

- ・ DSM なしのモデル

まず、負荷逼迫時に何も対策を行わないモデルを考える。この場合供給支障電力量を0にすることを考えると事故時の運用を考え、設備率は100%以上にしなければならない。事故が起こって復旧するまでのことを考慮しなければならないので、かなり設備率が多くなる。

- ・ 直接型 DSM モデル

このプログラムで削減できる負荷は最大でも10%程度と思われるため、ここでは10%を負荷遮断可能として扱う。このプログラムでは緊急時に負荷遮断が可能であるため、設備率を100%下回ることも可能である。しかし、設備率が90%下回ると確実に供給支障が起こること。事故時から、復旧まで強制負荷遮断が行われていることなどが問題である。

4.2.5 結果と考察

図 4.2 に設備率をパラメータとした、1年あたりの供給支障電力量[MWh/year]を示した。「DSM なし」は設備率100%、「選択的負荷遮断」は設備率90%を下回るころから供給支障が出始めてくるが、「報奨金型」は設備量を削減しても供給支障はほぼゼロであることが分かる。これは、先ほど述べたように「報奨金型」で(n-1)基準の下で需要を制御していくと非常に高い信頼度を維持できることを意味している。

日本では電源が原因での停電はほとんど0であるため、供給支障がほぼ0である範囲を有効範囲として扱うことを考える。ただし、乱数を使用しているため設備量を多くしても供給支障が起こる場合がある。その辺りを考え1万年シミュレーション

シミュレーションを行った中で 100 年間あたり 1000MWh(原子力発電機 1 台分)の供給支障まで許容することとする。各方式の有効範囲は DSM なし(63500～61500[MW])、選択的負荷遮断(63500～56000[MW])、報奨金型(63500～39500[MW])である。各プログラムでの評価を元に最適設備量を求めていくが、社会余剰が最大の設備量を最適設備量として扱う。

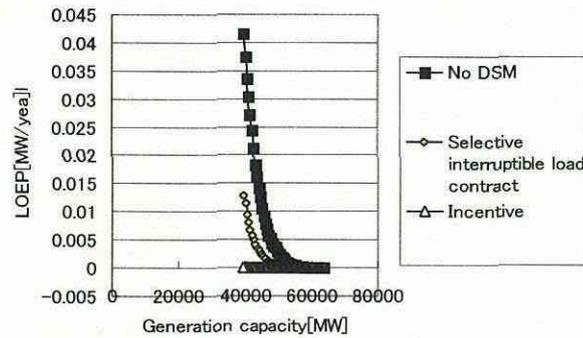


図 4.2 方策別の供給支障電力量

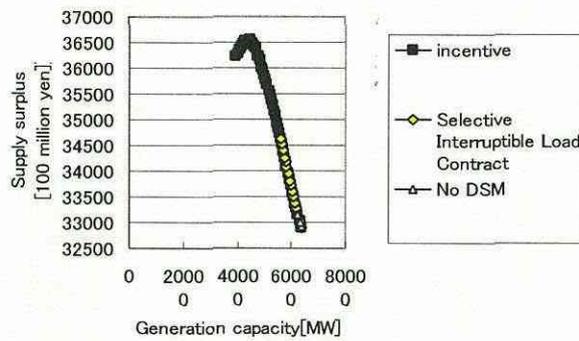


図 4.3 方策別の供給者余剰

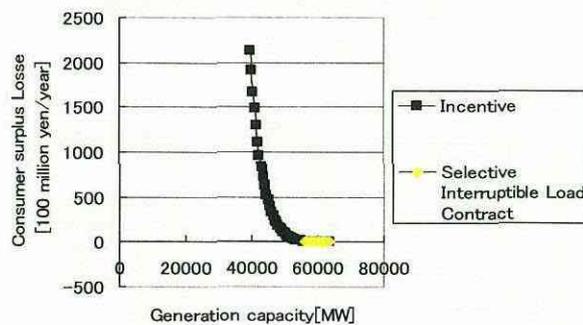


図 4.4 方策別の消費者余剰の消失

図 4.3 に方策別の供給者余剰を示した。「DSM なし」と「選択的負荷遮断」は有効範囲のなかで最も設備量が小さいとき最大となることが分かる。また、「報奨金型」はあるところまでは設備量を削減すると供給者余剰は増加するが、そ

れ以上削減すると供給者余剰が減少するのが分かる。これは設備を削減したことによる発電コスト(固定費+可変費)の減少分よりも、需要の減少に伴う売り上げの減少の方が大きくなることに起因する。

図 4.4 に方策別の消費者余剰の消失を示した。「DSM なし」の場合消費者余剰の消失が無いのでここでは除くとする。設備量を削減するにつれ指数関数的に消費者余剰の消失が大きくなるのが分かる。これは、設備量が小さくなるにつれ負荷削減の回数が多くなることと 1 回の負荷削減量が大きくなることに起因する。図 4.3 に示したように負荷削減による、消費者余剰の消失は負荷削減量に指数関数的に大きくなることとも深い関連がある。

図 4.5 に方策別の設備量と社会余剰、図 4.6 に方策別の設備量と CO2 排出量を示す。図 4.5 で報奨金型はある一定のところまでは、設備量を削減するほど社会余剰が大きくなるが、設備量を削減しすぎると、社会余剰が減少していくのが分かる。これは設備削減による余剰の増加より、売り上げ減少による供給者の利益の減少と負荷削減による需要家の余剰損失が多くなることに起因する。また、CO2 排出量は当然ながら設備量を少なくするほど減少していく。

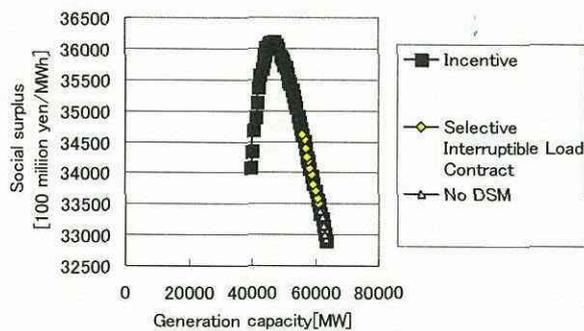


図 4.5 方策別の社会余剰

F

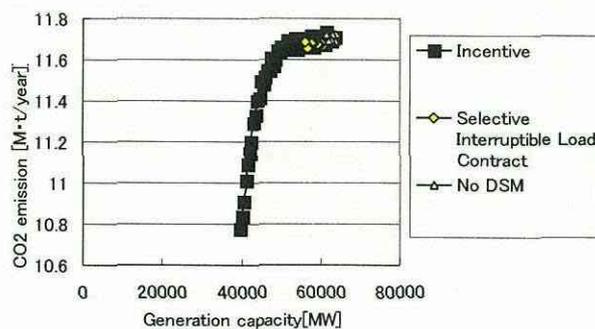


図 4.6 方策別の CO2 排出量

図 4.7～図 4.9 に各プログラムの「最適設備量」「最適設備量のときの社会余剰」「最適設備容量のときの CO2 排出量」を示した。最適設備容量であるが「報奨金型」が設備容量を 100%を大きく下回っているのが分かる。報奨金型では N-1 基準を守りながら需要家を制御していくことで、高信頼度を保ったまま設備を削減できることが分かる。それにより稼働率が悪い設備を削減でき「社会余剰」の増加が見込め、負荷平準化効果により「CO2 排出量」の削減を見込める。「経済」・「環境」どちらの指標でも「直接型 DSM」より、「報奨金型 DSM」のほうが優れているといえる。

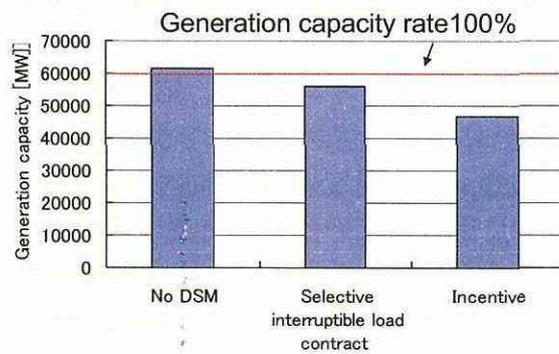


図 4.7 方策別の最適設備量

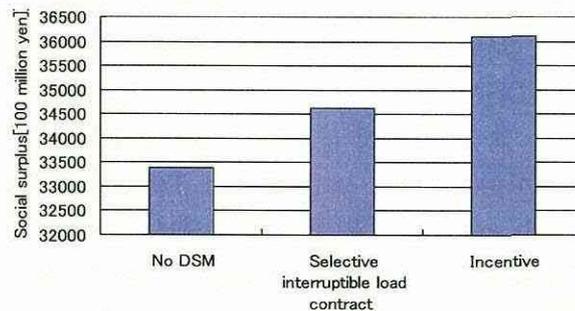


図 4.8 最適設備容量のときの社会余剰

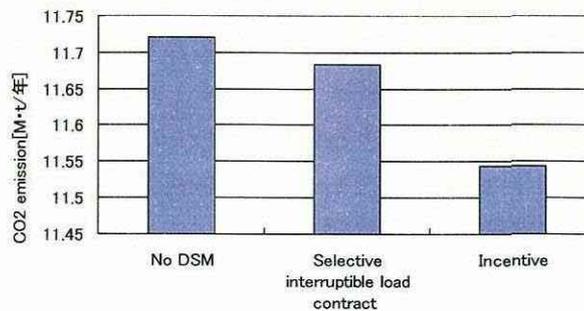


図 4.9 最適設備容量のときの CO2 排出量

第5章

結論

本論文では、将来、系統に FRIENDS 等が導入されたとき実現可能となるサービスの一つである「アドバンスト DSM」の中でも、主に「間接型 DSM」に焦点を当て、第3章では「リアルタイム料金」、第4章では新しい間接型 DSM である「報奨金型 DSM」について検討を行ってきた。「リアルタイム料金」は1社独占の下で行うと社会余剰、環境の面で非常に大きな効果を持つことが分かった。しかし、世界的に進行している電気事業の自由化の波の中で、すべての需要家に「リアルタイム料金」を強制することは不可能で、その中で今回提案した「報奨金型 DSM」は今後の DSM の中で主流になっていくものと筆者は確信している。

間接型 DSM は、直接型 DSM と違い需要家の意思が尊重される DSM であり、今後の DSM の中でも中心となっていくのが望ましいと思われる。間接型 DSM は直接型 DSM と違い、緊急時に瞬時に負荷を遮断することが出来ないため、信頼度維持の面で直接型 DSM より劣る面があるが、その点についても、この「報奨金型 DSM」を用い、需要家を(N-1 基準)を用い制御していくことで、高い信頼度を維持できることが分かった。本論文では「報奨金型 DSM」と「選択的負荷遮断契約」の比較を行ったが、「報奨金型 DSM」はすべての需要家の協力が得られるという利点を生かし、「直接型 DSM」と比べて多くの設備量の削減、それに伴う社会余剰の増加、CO₂ 排出量の低減が実現できることが分かった。

本論文では、主に「間接型 DSM」の利点を述べてきたが、電力系統の最適運用を考えた場合「直接型 DSM」も必要不可欠である。本論文第5章では発電機の事故のみを考えたが、配電系統の事故を考えた場合、瞬時の負荷遮断が必要になってくる場合が多い。また、本論文では(N-1 基準)の下で負荷制御を行ってきたが、「直接型 DSM」の適用できる範囲で2つの「アドバンスト DSM」併用すれば設備量の限界の下で運用していくことも可能である。この辺りの問題を解決することが今後の課題といえるだろう。

参考文献

- [1]中村他「需要家端における選択的負荷遮断契約が需要家側・供給側に与える影響」,電気学会研資,PE-02-81,PSE-02-91,PP37-40 (2002)
- [2]東京電力株式会社広報部「数表で見る東京電力」(2003)
- [3]加藤他「負荷調整ならびにその電源計画に与える影響」電学論 B,101 巻 2 号,p9-16(1981)
- [4]鎌田他「環境負荷低減の観点に基づいた電力系統における分散電源の導入評価に関する検討」電学論 B,122 巻 3 号,p351-358,(2002)
- [5] 電力系統モデル標準化調査専門委員会編：「電力系統標準モデル」, 電気学会技術報告第 754 号 (1999)

発表文献

[1]近藤,原,大山：“リアルタイム料金が経済・環境へ及ぼす影響”
平成 16 年電気学会全国大会講演論文集

[2]近藤,原,大山：“リアルタイム料金設定が環境と社会余剰へ及ぼす影響”
平成 16 年電力技術・電力系統技術合同研究会