

分散型電源と電気料金制度

浅野 浩志

1. はじめに

電力業界は、平成4年度より需要家サイドに設置する新エネルギーの開発・普及や電気料金による需要調整、いわゆるデマンドサイド・マネジメント(DSM)をめざした料金制度の大幅な改革に動き始めた。この4月からは、太陽光発電(PV)、燃料電池など新エネルギーによる自家発からの余剰電力を買い上げるという画期的な制度を設けた。また、大口需要家を対象とした需給調整契約を拡充した。特に、東京電力は、1時間前までの要請でピークカット可能な緊急時調整契約を新設し、即時対応能力を強化した。家庭用に対しては6月から時間帯別料金制を全家庭対象に拡大した。

小論では電気事業者以外が保有する分散型電源の普及と電気料金制度をめぐる動きを解説するとともに今後の課題を抽出しその解決に資する研究の一端を紹介する。

まず電気事業が電力需給の安定を図るため、従来の供給サイド中心の対策から需要対策重視の姿勢に変わりつつある理由を探ってみよう。供給面においては電源立地の確保が困難になったり、環境問題への対応から新規電源の建設に制約がかかりつつある。一方、需要面では民生用のみならず3K対策から産業用においても冷暖房需要が増加している。またさまざまな冷暖房機器の普及によって夏季はもちろん冬季でさえ需給が逼迫している。

そこで、省エネルギー、環境保全、安定供給といった電気事業が果たすべき目的を達成する手段として、電気料金制度に対する期待が高まってきている。省エネルギーとは合理的な電気利用を意味するわけだが、そのためには料金制度に供給原価をより厳密に反映させる必要がある。季時別料金制は、重負荷と軽負荷期、および昼間と夜間で料金差を設定する(ピークロードプライシング理論)ことにより、需要家の負荷移行を促進し、負荷平準化を図るものである。また、季時別料金制は需要家間

の適切な費用分担を実現する機能をもつ。

2. 分散型電源普及の課題

地球環境問題への対応や省エネルギーの観点からPV、燃料電池といった小規模分散型電源に大きな期待が寄せられている。しかし、このような目的に照らして全体としてインパクトをもち得るには相当の普及努力が必要である。現在各方面で、分散型電源からの余剰電力の購入や系統連系の技術要件など分散型電源の普及促進に向けた制度、技術面の課題が議論されている。

いわゆる自然エネルギーによる分散型発電技術(PV、風力)の普及には技術的なブレークスルーのみならず、ある程度の量産が可能な需要規模を確保し、経済性を向上させることが不可欠である[4]。新エネルギー発電技術よりコスト上有利なコージェネレーション・システム(CGS)では、単体の総合エネルギー効率は理論上約70~80%に達するが、実際には熱需要と電力需要の時間的マッチングが難しく、その潜在的な性能を発揮し切れない。そこで、既存の電力系統に連系し、電力の双方向取引を認めれば、運用効率の向上を図ることができる。これはCGSを保有する需要家の立場に立った話であるが、社会的に見れば、到底分散型電源のみですべての需要をまかなうのは不可能であり、商用系統との連系により複合的な供給体制を構成せざるを得ない。このとき、分散型電源を保有する需要家とその他の一般の需要家の間の公平性に注意した取引条件を確立する必要がある。

3. 分散型電源に係わる電気料金問題

分散型電源とそれに係わる電気料金制度の関係は、分散型電源普及の程度に応じて次の3段階に分けられる。

(1) 系統とは独立した分散型電源

分散型電源の経済性は、電気料金の構造とは無関係にその水準のみに依存する。

(2) 系統に連系するが逆流が認められない場合

分散型電源は系統に連系することにより、周波数安定

あさの ひろし (財)電力中央研究所

〒100 千代田区大手町1-6-1

化など電力の質向上と分散型電源が稼働しない場合のバックアップを受けられるという2つのメリットを享受する。この系統接続に伴う料金はアクセス・チャージと呼ばれる。分散型電源の普及を促進する意味から、分散型電源保有需要家サイドのメリットを過大に評価することなく、一般需要家の料金が上昇しない範囲で、電力会社サイドの費用増を基準にアクセス・チャージを決めるのが望ましい。

今ひとつの論点は、とりこ需要家の発生をいかに回避するかという問題である。産業用や業務用需要家は、買電からコージェネレーション等の自家発へシフト（系統バイパス）しうる。このようなクリーム・スキミング現象よりベース需要が失われると、残された小規模のとりこ需要家に大きな固定費負担が課される。これによる単位需要当たりの料金上昇はさらに自家発シフトを招き、需要家の系統離脱を促進する。

この現象に対応する1つの方法は、系統バイパスを起こす恐れのある需要家に反バイパス・インセンティブ料金を適用することである。実際、米国の一部の電気事業者は共通費配分ルールを変更し、競争的な大口需要分野への負担を相対的に軽減する料金設定を実施しつつある。しかし、このような一種の差別料金は常に需要家間の公平性を脅かす危険をはらんでいる。そこで、需要家間の公平性を確保しながら、社会にとって望ましい形で、競争条件の違いに応じた個別料金設定の理論的基礎を明らかにする必要がある。文献[1]では、固定費回収に悪影響をおよぼす自家発需要家の系統離脱を引止め、かつ既存自家発の有効利用を図るため、自家発需要家向けの料金設定問題をゲーム問題として定式化し、経済厚生上望ましい料金設定を導出している。

自家発を保有する需要家は、それらの代替電源の使用を介して価格形成過程に関与してくる可能性がある。複数の主体が異なる目的関数を最適化する際、主体間の相互依存関係を分析し、主体の行動を予測しようとするのがゲーム理論である。状況設定により均衡解は複数存在するが、そのどれが現実的であるか考えるのが応用上重要である。電気事業者と自家発保有需要家とが協調して社会厚生を最大化する場合と、両者が競合する場合とを分析している。さらに競合する場合は決定権に順位のないナッシュ・ゲームと、順位のあるスタッケルベルグ・ゲームを適用した。その結果、自家発の限界費用が電気事業者の限界費用に近接する場合など、両者が競合関係にあるときは、自家発需要家にとっての最適価格は一般需

要家にとっての最適価格よりも低く設定される。これは競合関係にある場合、電気事業者が自家発需要家に割引料金を適用することは社会的にも（自家発を保有しない需要家にとっても）望ましいことを意味する。電力市場に本格的な競争が導入される場合には、競合相手の電力供給コストを陽表的に意識した料金設定が必要になることを示すものといえる。

上述のクリーム・スキミング現象は、均一料金制や昼夜間格差の小さい季時別料金制の下で起りやすい。季時別料金制を適切に設計することにより、分散型電源を年間ベース運転させることなく、むしき電力系統の負荷平準化に寄与させることも可能である。このメカニズムについては次節で紹介する。

(3) 余剰電力販売可能な場合

電力業界は平成4年4月から太陽光発電等新エネルギー発電と在来の廃棄物発電、燃料電池、コージェネレーションの2種類の分散型電源からの余剰電力購入価格メニューを導入している。今回の余剰電力購入指針は、供給安定性、時間帯、環境負荷への影響等の条件に応じた価格メニューを初めて公開し、制度化されたものと評価される。ここで対象となる分散型電源は比較的小規模で、また、電力量も電力会社と比較すると無視できるほど小さい。特定供給の範囲がきわめて限定されているため、第三者への小売供給は事実上不可能である。

将来電力供給に関する規制緩和が進んで、電力会社による託送が自由化されれば、余剰電力販売は現在のようない買取のみでなく、小売託送方式との選択が問題になる。託送が自由化されれば自家発やコージェネレーション保有者が設備規模および運用の適正化を行ないやすい。

電力供給市場にCGSをもつ企業が参入してきた場合、余剰電力の販売システムとして買取システム（電気事業者が買取り、一括販売）と使用料システム（系統使用料をコージェネレーターが負担、自由販売）のいずれが望ましいかを、ゲーム理論を応用して分析した。これについては第5節で詳述する。

4. 季時別料金制下のコージェネレーションシステムの運用

分散型電源として普及がいちじるしいCGSを保有する業務用需要家（ホテル、事務所など）の季時別料金制による負荷シフトのメカニズムを解析することに焦点を絞って、われわれが開発したモデルとその解析結果の概要を紹介する[2]。

現行の料金制度には、業務用需要家を対象にした一般的な季時別料金制は含まれていない。しかし、鉄鋼業など産業用需要家と同じく、代替電源またはエネルギー貯蔵設備を保有する業務用需要家は、季時別料金制によりエネルギーコストを削減できる可能性がある。

4.1 モデルの概要

季時別料金制の下で、非線形計画法によりCGSの最適機器容量を混合整数計画法により最適運用方策を求めるモデルを開発した。都市部で普及がいちじるしいガスエンジンを原動機とするCGSを解析の対象とする。同時に考慮すべき変数や制約

条件を少なくし、ワークステーションで計算できるようにするため、ペナルティ法を導入し、機器容量と運用方策を階層的に決定する(図1)。

下位レベルにある運用問題では、各代表日における購入電力量、都市ガス量および各機器の運用を最適化する。目的関数は、電力と都市ガスの従量料金の和である。制約条件は、各機器の性能特性を表わす入出力関係(1次式で近似される)および各エネルギー・フローに関するエネルギー・バランスである。上位レベルにある構成機器容量の最適化に際しては、容量を表わす変数の上下限制約と、仮想的なエネルギーを発生させないための制約条件のみをもつ非線形計画問題として定式化する。年間総経費(年間設備費と年間運用費の和)を目的関数とする。電気料金単価については業務用電力(東京電力)、ガス料金単価については空調用夏期契約料金(4~10月は従量料金を一般料金の46%に割引く)を基準とした。電気料金については夏季を7~9月、残りを冬季、また昼間を8:00~22:00、残りを夜間と時間帯を設定した。

このモデルを用いて、業務用需要を代表するホテル、病院、事務所ビルの3種類の業務用需要家の季時別料金に対する反応を解析した。対象建物の延べ床面積を22,000㎡と仮定して電力・熱需要データを設定した。

4.2 最適容量設計

現行の電気料金は、使用電力量(kWh)に応じて徴収する従量料金と契約電力(kW)に応じて徴収する基本料金(契約電力ではなく実デマンドに課すデマンド料金もある)とから成る2部料金制である。設備規模の決定に

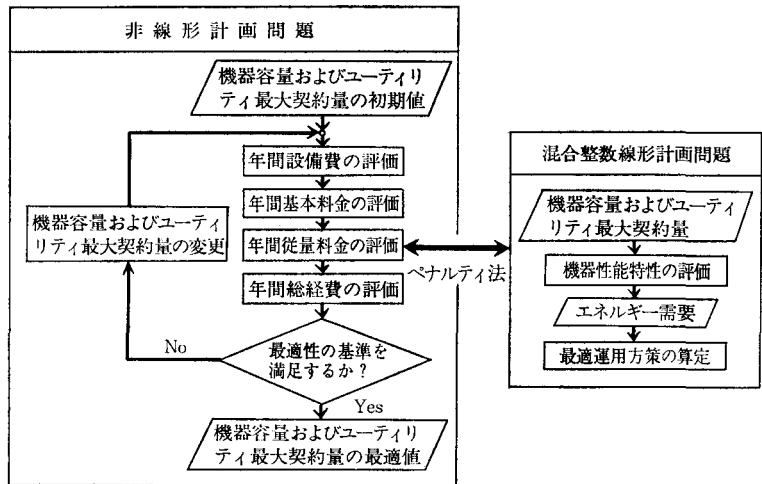


図1 ペナルティ法による機器規模および機器運用方策の階層的決定法[2]

おいては、デマンド料金が大きな効果をもつことが予想される。そこで、デマンド料金単価を9電力会社の中で基本料金が最も高い場合(1700円/(kW・月))と最も低い場合(1200円/(kW・月))について最適容量の変化を求めた。均一料金制下の場合の電力負荷パターンを変更しない場合には、年間の電力コストが等しくなるような条件(収入中立)において従量料金を調節する。季時別料金も収入中立的とし、従量料金の昼夜間比率を1~10に変化させた。

現行の均一料金、高/低デマンド料金、および昼夜間料金比5のときの各需要家毎の最適設備容量を求めた。図2にピーク電力需要に対する発電機と買電の最適容量の比率を示す。たとえば事務所ビルの発電機容量は、均一料金下で最大電力需要の約70%である。デマンド料金を安く設定したケースでは、契約電力を12%大きくし、逆にガスエンジン発電機容量を9.5%小さくする。事務所ビルの場合、ホテルや病院と比べるとデマンド料金に対する設備調整の感度が大きく、低デマンド料金ケースでは発電機容量が大幅に縮小されるため、購入電力量を増やさざるを得ない。季時別料金下では発電機容量は7%増加し、契約電力量は9%減少した。発電機容量は夏季ピーク時間帯の需要にあわせて決まるため、料金比を上げて昼間電力を高価にすると発電機容量は増大する。

三需要家の反応を比較すると、ホテルのようなフラットな需要パターンを示す需要家に対しては従量料金よりデマンド料金の方が設備容量決定に影響を与える。一方、病院のような電力需要の比率が小さい需要家はホテ

ルと逆の傾向をもつ。電力需要および冷房需要のウェイトが大きい事務所ビルでは、従量料金比とデマンド料金のいずれに対してもかなり敏感に反応する。

4.3 最適運用

前節において求めた均一料金の下でCGS構成機器の最適設備容量を固定して、季時別料金の昼夜間比を変化させ、発電機稼働と買電パターンへの影響を検討する。図3に昼夜間料金比を変えたときの年間の買電夜間率(夜間買電量/総買電量)の変化を示す。いずれの需要家についても年間を通じて料金比5で夜間率の上昇は飽和する。また、ガス料金に空調用夏期契約料金が適用される夏季ピーク日には料金比が3~5になってはじめて買電が増える。この範囲の夜間料金は、家庭用時間帯別料金や業務用蓄熱調整契約の夜間単価に近い水準である。事務所ビルの場合、夜間率の向上は他の2つの需要家(ホテル、病院)に比べて低い。

ホテル、病院の反応はかなり似通っており、冬季ピーク日の場合、均一料金下では熱需要が大きいためガス料金単価が高くてもエンジン排熱も有効に使われるため、発電機が稼働する。しかし季時別料金制下では料金比1.2~2で夜間電力が大幅に増加する。これは夜間電力単価が少しでも安くなると、電力需要は買電でまかなわれ、熱需要はガス吸収冷温水機とガスボイラーでまかなう方が発電機を運転するより経済的であることを意味する。一方料金比が大きくなっても元来低い昼間料金下で設備の最適設計が行なわれているため昼間の買電は減少しない。

事務所ビルの場合、冬季でも冷熱需要があるため温水吸収式冷凍機を稼働させて、エンジン排熱を有効に使う。温熱はガス吸収式冷温水機によってまかなわれる。このため料金比が上昇しても、買電はあまり増加しない。

次に季時別料金のエネルギーコスト(買電とガスの従量料金の和)への影響をみる。昼夜間料金比を1~5に変化させたときの電気およびガスの従量料金(年間)を図4に示す。ホテル、病院の反応はかなり似通っており、料金比を上げると安価な夜間電力が発電機の燃料であるガスと代替するため、総エネルギー

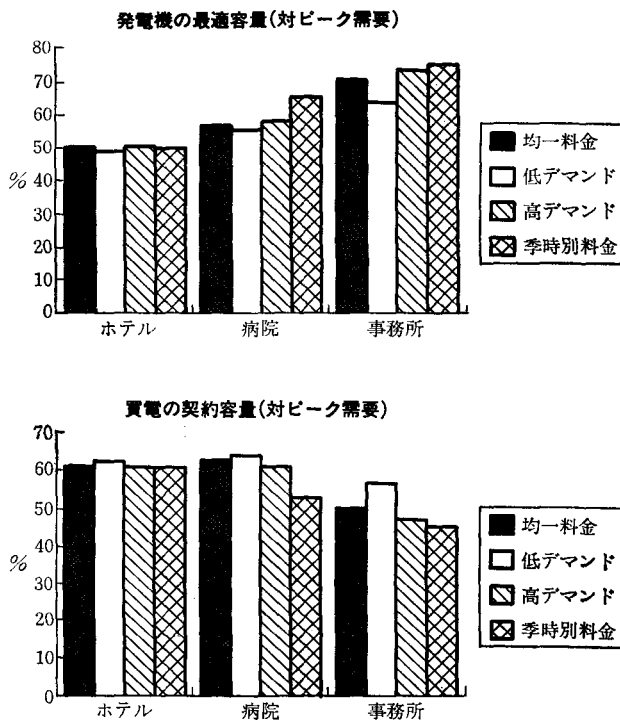


図2 各種料金制に対するCGS需要家の反応[2]

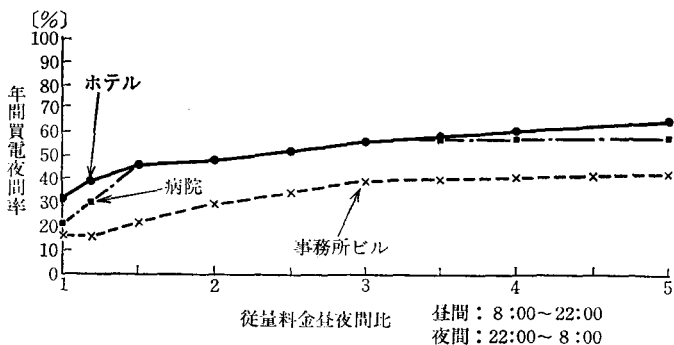


図3 従量料金の昼夜間比と年間買電夜間率[2]

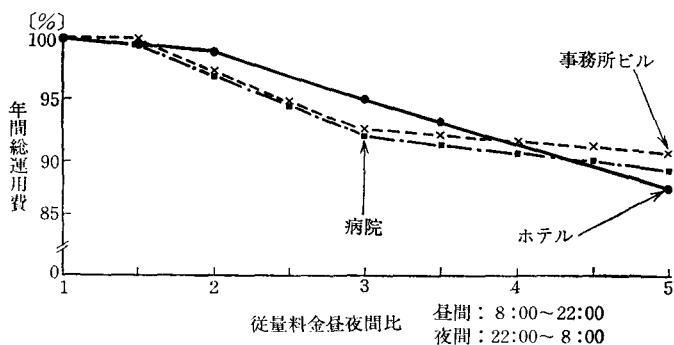


図4 従量料金の昼夜間比と年間総運用費[2]

ーコストは低減していく。ただし、夏季ピーク日はガスの夏季料金の影響で料金比が2になるまで代替が起きない。冬季ピーク日においては夜間買電が急激に増加する料金比1~1.5で、電気料金は増加するが、その増分以上にガス料金分が減少する。事務所ビルの場合、冬季ピーク日は機器がすでに有効に利用されているので代替が起きない。

従来、業務用需要は料金制度による需要の誘導は難しいとされてきた。また現状ではCGSを設続した需要家には季時別料金制は適用されないためCGSがベース運転され、電気事業者の負荷平準化には悪影響をおよぼす恐れが再三指摘されてきた。以上の需要家反応解析により、CGSを設置した要需家は季時別料金制にかなり弾力的に反応することがわかった。大口需要、電灯需要のみならず業務用需要にも季時別料金制が選択制で導入されること

が望ましいといえよう。その際、季時別料金の従量料金比は3程度で十分である。

5. 競争的電力市場のゲーム論的分析

規制緩和が進めば、これからの電気事業者は潜在的市場参入者の存在を意識して、価格設定を行なうようになる。また規制当局も電気事業者に効率的運営を追求するインセンティブを与える必要がある。既存企業に対する規制を緩め、市場を競争的に変えていくため価格メカニズムをできるだけ有効に活用する必要がある。そのとき供給者・消費者双方の電力市場参加者に電力市場のマクロな状態変数である価格シグナルを正しく伝えることが今以上に重要になる。適切な料金制度を設定すれば市場が備えている自動調整効果、すなわち市場参加者の自律的な行動の統合により社会的な便益を最大化するシナジー効果を実現することが期待されるからである。

電力供給市場にCGSをもつ企業（コージェネレーター）が参入してきた場合、政府がどのような販売システムを設定すべきかを、ゲームとして分析を行なった[3]。このゲームのプレイヤーは【政府、既存企業（電力会社）、参入企業（コージェネレーター）】である（図5）。電力および熱需要の需要関数、電力会社およびコージェネ

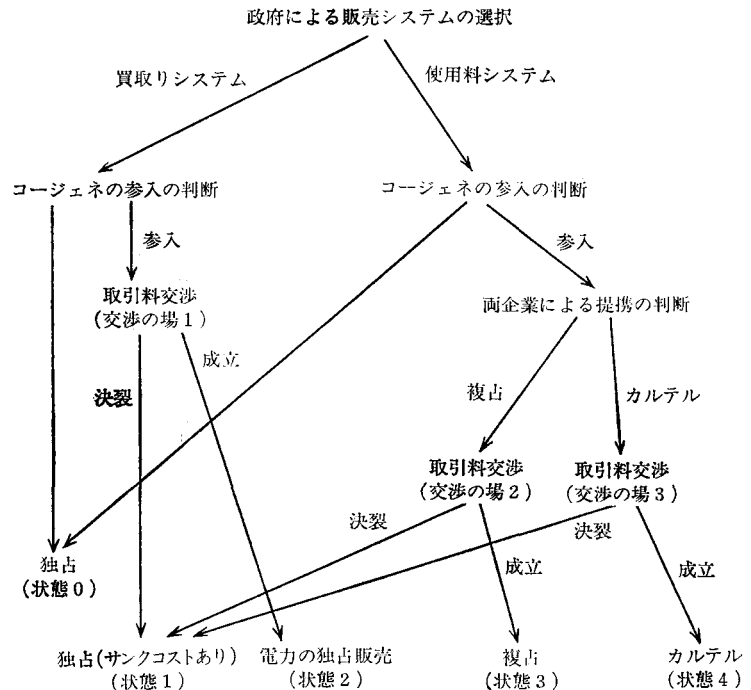


図5 ゲームの木[3]

ーターの費用関数を仮定する。各プレイヤーの戦略変数と目的関数を次のように定義する。

- (1) 政府：【買取りシステム、使用料システム】の選択
目的関数＝社会厚生→最大化
(社会厚生＝消費者余剰＋既存企業の利得＋参入企業の利得)
- (2) 電力会社：【複占行動、カルテル行動】の選択
目的関数＝生産者余剰→最大化
- (3) コージェネレーター：【参入、非参入】および【複占行動、カルテル行動】の選択
目的関数＝生産者余剰＋エネルギー消費余剰→最大化とする。

政府は、一般需要家の代理人としてその電力消費の効用、すなわち消費者余剰と両企業の利得をあわせた社会的な純便益（社会厚生）を最大化する。コージェネレーターの利得は、余剰電力販売による利潤と熱および電力消費の効用の和となる。

コージェネレーターと電力会社は取引料（買取り価格または使用料）を交渉する。交渉解の概念としてここではLP的解およびナッシュ交渉解を採用する。LP的解は両プレイヤーの基準点からの効用の増分の和を、またナッシュ交渉解はその効用の増分の積を最大化する解とし

て定義される。参入企業が電力市場に参入するか否かの意思決定を行ない参入したならばその時の販売システムの形態に従って互いに利得を最大化するためにそれぞれの生産量を決定しその上で電力の取引料を決定する。

このようにゲームを定義すると最終的な政府、企業の最適行動は、それぞれの行動の結果得られた目的関数の比較によって判断できる。ここでは独占供給、独占販売、複占、カルテルの各状態に至ったと仮定し、そこからそれぞれの企業の最適反応を導きだし、最適行動、均衡取引料を導く。またプレイヤーは、需要関数やお互いの費用関数などの情報はすべて把握しており、また常に最適な行動をとる完全情報を仮定している。

コージェネレーターが市場参入をしなければ電力会社の独占供給状態(状態0)になる。状態1は、コージェネレーターが参入を決心し、系統連系設備を設置したにもかかわらず参入に失敗した場合である。状態0に比して、このサンクコストの分だけコージェネレーターの利得は減少する。

もし、政府が買取りシステムを選択すると電力会社、コージェネレーターはともに自身の利得が増大する状態2、つまりコージェネレーターが余剰電力を売り、電力会社が独占的に販売する形態が両企業の合意で選択される。買取価格は電気事業者の限界費用に等しく定めることが導出された(LP的交渉解)。これは、米国の公益事業規制政策法(PURPA, 1978年制定)による買取価格の設定と同じ思想である。

この場合コージェネレーターは独占時に廃棄していた余剰電力を販売できることにより利得を増加させる。総電力供給量および電力会社の利得は独占状態と変わらずコージェネレーターの増分利得だけ社会厚生は増大する。

一方、政府が使用料システムを選択すると、電力会社は複占行動を選択しようとするが、その場合、コージェネレーターは、状態1の電力会社の独占生産、独占販売の場合と比較して利得が低下してしまうので、カルテル行動を選択しようとする。電力会社がこれを拒否して状態1の独占に陥ってしまうと電力会社自体の利得がカルテルを選択した場合よりも低下してしまう。よって電力会社、コージェネレーターともに状態4のカルテル行動を選択する。

カルテル状態の総電力供給量は独占時と等しく、消費者余剰は変化しない。さらに電力会社とコージェネレーターの電力生産のシェアも買取り独占の場合と同じで生産者余剰も同じ大きさになるが、それぞれ利得の大きさ

は使用料の設定により幅をもつ。最終的に状態2と4を比較した場合、政府の目的である社会厚生は、カルテル行動と独占販売のいずれについても等しくなる。したがって、政府は買取りシステム、使用料システムどちらを選択しても無差別となる。このゲームでは2つの均衡点が存在する。

以上のように電気の小売価格を自由化し、コージェネレーションをもつ独立発電事業者の参入を認めた場合、買取り独占とカルテルとが電力供給市場の最適な市場形態になることがわかった。

ただしこの場合、たとえ独立発電事業者の参入があっても電気の一般需要家である消費者は何の利益を享受することはできない。使用料システムの下での複占市場(状態3)のとき、消費者余剰は最も大きく、電力会社にとってもカルテルより利得が大きくなる場合があるので大多数の者にとって好ましい。しかしコージェネレーターは、託送料金の負担が大きく状態1の独占よりも利得を減らしてしまうので決してそのような市場は形成されることがない。

6. 結 語

電気料金は、電気事業経営の根幹にかかわる重要な問題であり、従来から公益事業論の中で論じられてきた。一方、分散型電源は電源計画など技術評価の領域やエネルギー経済論で重要なトピックとなってきた。しかし、分散型電源にかかわる料金問題は、現在進行中の規制緩和の流れを背景に検討する必要がある、理論の確立にはなお相当の努力を要する。従来この分野ではOR手法の適用が十分なされてきたとは言いがたい。小論を通じて数理計画法やゲーム理論の有効性が示されたのであれば筆者の望外の喜びである。

参 考 文 献

- [1] 浅野浩志：自家発保有需要家向け料金のゲーム論的分析，電中研研究報告Y91004 (1991)
- [2] 浅野浩志，今村栄一，佐賀井重雄：コージェネレーション設置需要家の季時別料金制に対する反応解析，電中研研究報告Y91001 (1991)
- [3] 浅野浩志，桑畑暁生：コージェネレーターの電力市場参入に関するゲーム論的考察，第8回エネルギーシステム経済コンファレンス講演論文集 (1992)
- [4] 山地憲治：長期的視点からみた新エネルギーの意義—自然エネルギーとリサイクルエネルギー—，原子力工業，Vol.38, No.5 (1992)