

〈研究報告〉

余剰電力販売システムのゲーム論的分析

Game Theoretic Analysis of Market Systems for Surplus Electric Power

キーワード：コージェネレーション，余剰電力，ゲーム理論

桑 畑 暁 生 浅 野 浩 志

【要 旨】

近年の電力需給状況の変化に伴い、コージェネレーション・システムに代表される分散型電源と既存の電力系統との連系が注目されている。そのため近い将来、コージェネレーション側の余剰電力の有効利用という目的で電力系統への逆潮流が制度的に認可される可能性がある。本研究では、余剰電力の系統への逆潮流が認められ、電力市場がより競争的な状況にある場合に、どのような電力販売システムが社会的に望ましいかについて検討した。具体的には買取りシステムと使用料システムの2つを取り上げ、現在の独占販売の状況との比較、検討を行った。その結果、市場に参入する際の費用の大きさによっては現在の独占販売より余剰電力を市場に供給する制度の方が社会的に望ましいこと、また社会厚生を最大にする余剰電力の販売の形態は、電気事業による余剰電力の買取りシステムと電力系統をコージェネレーターに利用させながらもそのコージェネレーターと電気事業が協調行動をとる使用料システムの2つであることを示した。さらに、それらの余剰電力販売システムが成立するための参入費用の上限值を示し、また系統運用費用などの取引に関する費用についても実現可能な範囲について検討した。

【政策的含意】

自家発と系統との接続に伴い発生する価格問題としては、余剰電力購入料金や託送料金があげられるが、当面電気事業が直面する問題は前者である。余剰電力の購入についての価格形成は、理論的には回避コストによるべきだとされ、この考え方は欧米でも広く採用されている。今回のゲーム論的なアプローチからも回避コストに基づいた価格設定が適当であると考えられる。

- | | |
|---------------------|---------------|
| 1. はじめに | 3. 望ましい電力供給形態 |
| 2. 競争的電力市場 | 4. 数値実験例 |
| 2.1 買取りシステムと使用料システム | 5. おわりに |
| 2.2 最適行動と交渉モデル | |

1. はじめに

コージェネレーション (co-generation) に代表される技術革新がもたらしたエネルギー間競争を背景として、エネルギー供給、とりわけ電力供給に関する現行規制の緩和が国民経済的に望ましいとの観点から、特定供給の一部緩和な

ど規制の緩和が進められてきた。また、昨今のエネルギー需要の急増と電力の安定供給に対する制約の高まりから、より一層のエネルギー利用効率向上の必要に迫られている。コージェネレーションや種々の分散型電源など個別技術の開発とともに、それらから発生する電力・熱を有効活用するための制度の整備が急務である^[5]。

本研究では電気事業だけでなく、自家発電やコージェネレーターについても供給者とみなし、社会的に望ましい電力供給のあり方をゲーム論的に分析する^{[1][3]}。

2. 競争的電力市場

電力供給市場にコージェネレーション・システムを持つ企業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について、総余剰最大化を政府の目的とした展開型ゲームとして分析を行う。ここではゲームのプレイヤーとして政府、既存企業（電気事業）および参入企業（コージェネレーター）の3者を仮定する。

2.1 買取りシステムと使用料システム

地域独占の形態をとっている電力供給市場にコージェネレーターが参入する場合の電力販売システムについて以下のように考える。

熱と電力の二つを同時に生産するコージェネレーション・システムを所有する企業が、余剰電力を一般消費者に販売するために電力供給市場に参入した時の状況を図1に示す。

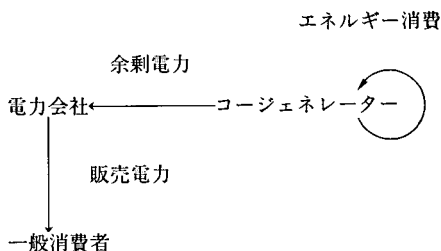


図1 参入後の電力供給市場

ここで参入企業は主として熱需要家であり、参入企業の生産した電力は一部は熱とともに自家消費され、余剰電力は既存企業（電力会社）の系統を通じて一般消費者に供給される。参入企業の電力と熱の生産比率は、コージェネレー

ションのシステム特性に依存し、一定と仮定する。また、供給された電力の品質は既存企業、参入企業ともに同一であると仮定する。系統に供給された電力の電力量および消費量の計測に基づいて一般消費者に電力を送る契約を結ぶことが可能である。

まず政府は総余剰最大化を目的として、買取りシステムと使用料システムのいずれかを選択できるとする。買取りシステムは参入企業に一般消費者に対する直接販売を認めないシステムで、既存企業が参入企業から電力を買取って一般消費者に販売するシステムである。このとき買取り価格は単位あたり一定であり、既存企業が決定するものとする。使用料システムは参入企業に販売する権利を認めるもので、参入企業が既存企業に系統（送配電網）の使用料を支払い、参入企業が一般需要家に直接電力を販売する形態である。以後買取り料、使用料を合せて取引料と呼ぶ。

政府が使用料システムを選択した場合、既存企業と参入企業は電力供給市場で協調行動をとるか否かを判断する。協調行動とは両企業の結合利益最大化を目的として両企業が行動することを指す。買取りシステム、使用料システムいずれの場合にも取引料を両企業が交渉し、交渉が成立しない場合、参入企業は一般消費者に電力を供給しない。このモデルでは一般消費者はプレイヤーとして参加はしないが、電力の需要関数に従い、消費者余剰最大化価格で電力を購入する行動をとる。

以上の状況を参入/退出を含めた展開型ゲームとして定義する(図2)。

2.2 最適行動と交渉モデル

本節では参入が決定したあとの取引料交渉前と取引料交渉後の二つをとりあげ、各段階での

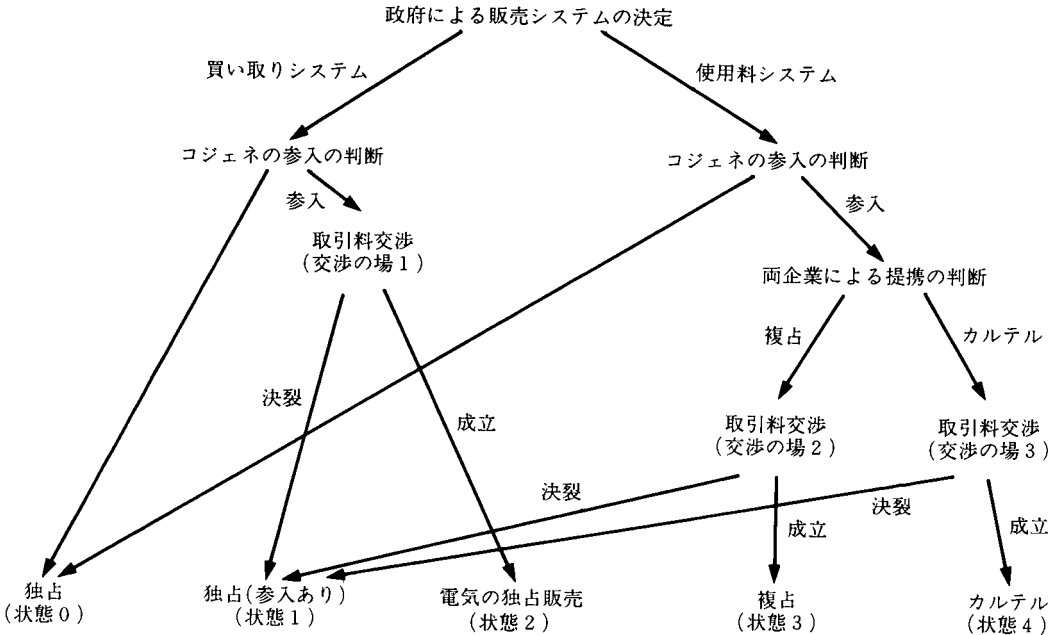


図2 ゲームの木

プレイヤーの行動について記述する。

まず交渉後の取引料交渉が決裂、または成立して取引料が与えられた際の電力供給市場のモデルを示す。ただし、以下では右下添字 i は主体を表す ($1=$ 電力会社, $2=$ コージェネ)。

一般消費者に関する電力需要の逆需要関数は(1)式のとおりであり、またコージェネを熱需要家の集まりとして解釈し、その集団におけるエネルギー価格は次の逆需要関数で決定されるものとする。

$$\text{電力需要} : P = a - b \cdot S \quad (1)$$

$$\text{熱需要} : P_h = a_h - b_h \cdot H \quad (2)$$

ただし、 $P(h)$: 電力(熱)の市場価格、 $a(h)$ と $b(h)$: 市場価格のパラメータ、 S : 電力の市場供給量、 H : 熱需要家集団内のエネルギー需要量(電力の自家消費分を含む)とし、 $a(h)$ 、 $b(h)$ は所与とする。

参入企業、既存企業ともに市場の形態のいかにかわららず費用関数を次のように定める。

$$\text{電力会社} : C_1 = f_1 + c_1 \cdot q_1 + c_s \cdot S \quad (3)$$

$$\text{熱需要家} : C_2 = f_2 + c_2 \cdot q_2 \quad (4)$$

C_i : プレイヤー i の総コスト ($i=1, 2$)

c_i : プレイヤーの限界コスト

f_i : プレイヤーの固定費

q_i : プレイヤーの販売可能な電力量

c_s : 電力会社のネットワーク運用の限界コストと定める。ここで、 c_i 、 f_i 、 c_s は所与とする。ただし、参入企業の場合、 f_i は参入費用を含む。

また、市場に供給された電力は必ず消費されると仮定して、市場清算条件を設ける。

$$S = s_1 + s_2 = Q = q_1 + q_2 \quad (5)$$

s_i : プレイヤー i の販売電力量

さらに、コージェネレーターのシステム特性 h を、 $h \equiv H/q_2$ (一定) と定める。このシステム特性の具体的な意味を次に述べる。熱需要家はコージェネによって、自分で消費する熱需要を賄い、さらにその需要に比例して熱需要家内の電力需要が一定の割合で発生すると仮定する。そのときコージェネが一定の比率で熱と電力を生産するとすれば、余剰電力は熱需要家内のエ

エネルギー需要に比例して発生する。

このゲームのプレイヤーは政府、既存企業、参入企業の3者であり、それぞれの戦略変数と目的関数を次のように定義する。

政府：{買取りシステム，使用料システム}

の選択

目的関数＝総余剰→最大化

(総余剰＝消費者余剰＋既存企業の利得
＋参入企業の利得)

既存企業：{複占行動，カルテル行動}
(電力会社)

の選択

目的関数＝利得→最大化

参入企業：{参入，非参入}の選択
(コージェネ)

{複占行動，カルテル行動}の選択

目的関数＝利得→最大化

また、参入企業が実際に市場に参入し、既存企業、参入企業共に複占行動を取ったとき場合に比べて、協調してカルテル行動を取った場合の方が利得が大きい場合にのみカルテル行動を選択する(図2参照)。

以上のモデル化の下で、各企業の利得は次の式で表される。

$$\Pi_1 = \{P(S) - c_s\} \cdot q_1 - f_1 - c_1 \cdot q_1 - r \cdot q_2 \quad (6)$$

$$\Pi_2 = \int_0^g P_h(H) dH + (r - c_2) \cdot q_2 - f_2 \quad (7)$$

ただし、 r は取引料を示し、参入企業が市場に参入しない場合は $f_2=0$ 、 $r=0$ とする。

次にコージェネと電力会社とが取引料を交渉する際の交渉モデルを考える。交渉解の概念としてここではLP的解^[7]を採用する。LP的解は両プレイヤーの基準点(状態0)からの効用の増分の和を最大化している解として定義される。交渉解は個人合理性(プレイヤーが単独で行動するよりも協調行動をとるほうが、個人の効用

が大きくなる可能性があること)とパレート最適性(他のプレイヤーの効用を下げることなく、自己の効用を増大させることができない状態)を満たす実現可能領域(効用空間)の点の集合(交渉領域)の中から選ばれる。

この枠組みのもとで、参入企業が電力市場に参入するか否かの意思決定を行い、参入したならばその時の販売システムの形態に従って、既存企業と取引料 r を交渉し、決定する。両者は互いに利得を最大化する水準にそれぞれの生産量を決定し、その上で電力の取引価格、系統使用料を決定する。

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(状態0もしくは1)、独占販売(状態2)、複占(状態3)、カルテル(状態4)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行動を導きだし、ひとつ前の手番に戻るというフィードバックを行いながら分析を行い最適行動、均衡取引料を導く。またこのゲームは自分のみならず他のプレイヤーの費用関数や需要関数等について3者ともに把握している状態(完全情報)を仮定している。

3. 望ましい電力供給形態

前節でモデル化したゲームを実際に解き、各企業の最適行動と利得を計算した結果^[4]、買取りシステムを選択した場合と、使用料システムを選択し協調行動を取った場合の利得は一致し、その社会厚生は次のようになる。

$$W = CS^m + \Pi_1^m + \Pi_2^m + c_1 \cdot q_2^m + \frac{c_1}{2b_h \cdot h^2} \quad (8)$$

ここで CS^m 、 Π_1^m 、 Π_2^m 、 q_2^m はそれぞれ独占状態

のときの消費者余剰、既存企業の利得、参入企業の利得、電力生産量を表す。

さらに、コージェネを所有する需要家が市場に参入するかの条件はその参入費用 f_2 の大きさに依存する。その条件は

$$f_2 \leq c_1 \cdot q_2^m \quad (9)$$

となり、この条件を満足した場合に、市場参入が起こる。

市場参入が生じた場合、電力系統利用に関する交渉の場では取引料 r に関する交渉が行われるが、余剰電力の買取り独占の場合はその取引価格は既存企業の限界費用に等しく設定される。またカルテルに関する交渉を考えると、交渉が失敗すれば状態1の独占になるので、交渉が成立するのはカルテルのとき、それぞれの利得が状態1のときの利得を上回る必要がある。つまり、次の(10)、(11)式を満たしたとき交渉は成立する。

$$\begin{aligned} \Pi_1 - \Pi_1^m &= \frac{(a_h \cdot h - c_2 + c_1)(2r + c_1 - a - c_s)}{2b_h \cdot h^2} \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Pi_2 - \Pi_2^m &= \frac{c_1 \cdot (a_h \cdot h - c_2) - (a_h \cdot h - c_2 + c_1)(2r - a - c_s)}{2b_h \cdot h^2} \\ &\geq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

カルテルの場合、共同利得を念頭に置くので使用料額 $r \cdot q_2$ はその受け手と支払い手の利得の総和である共同利得の中で相殺されて、 r はその共同利得を最大にするように一意には決められない。ただ、共謀することでそれぞれの利得が下がらなければ、共謀は引合うことになる。つまり取引料金(託送料金) r は(10)、(11)式を満たすように決められる。よって r が次式を満たせば共謀は成立する。

$$\frac{a + c_s - c_1}{2} \leq r \leq \frac{a + c_s}{2} + \frac{(a_h \cdot h - c_2) \cdot c_1}{2(a_h \cdot h - c_2 + c_1)} \quad (12)$$

両者にとって(12)式を満たすように r を決めることはそれぞれの利得の増加につながるので合理的といえる。

r の設定による生産者余剰の配分次第で、電力会社とコージェネレーターのそれぞれの利得が変化する。共同利得の増分を両プレイヤーで折半する方式で託送料金を決めることも考えられる。このような利益折半方式は、実際の電力会社間の電力融通取引ではよくみられる。カルテル状態におけるコージェネレーターの電力生産量(=販売量) q_2 と共同利得PSから託送料金は次のように求まる。

$$q_2 = q_2^m + c_1 / b_h \cdot h^2 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} PS &= \Pi_1 + \Pi_2 \\ &= \Pi_1^m + \Pi_2^m + c_1 q_2^m / 2 + \\ &\quad c_1 (a_h \cdot h - c_2 + c_1) / 2b_h \cdot h^2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} r &= \Delta PS / 2q_2 \\ &= \frac{c_1 [q_2^m + (a_h \cdot h - c_2 + c_1) / b_h \cdot h^2]}{4(q_2^m + c_1 / b_h \cdot h^2)} \end{aligned} \quad (15)$$

次に、以上の条件が満たされた状況について、最終的に販売システムを規制する政府の判断を考える。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(図2参照)、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。この場合は独占状態よりも総余剰は増大する。

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共に状態4のカルテル行動を選択する。

最終的に上記の二つの状態2と4を比較した場合、政府の目的である総余剰は、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。また、この二つの状態について消費者余剰にも差は認められない。

ただし、本研究における参入企業の参入/退出の分析については十分とは言い難く、今回の分析では買取りシステム、使用料システム共に参入するための参入費用の大きさに関する条件を提示したにすぎない。もし、参入費用の大きさが条件(9)式を満たさない場合、電力会社が独占生産、独占販売をおこなう状態0が選択され、コージェネレーターが市場に参入しないことも考えられる。

4. 数値実験例^{[2][8]}

買取り価格は電力会社の発電の限界費用に等しいの、昼間で11~17円/kWh、夜間で4~8円/kWh程度である。一方、託送料金は(12)式のように上下限が与えられるか、あるいは利益折半方式で一意に決まるが、数値例でその妥当性を検討してみる。

電力会社の費用関数など本モデル中に現れるパラメータの幾つかは実データにより計測可能であるが、熱需要関数等の推定については実際上不可能に近い。そのため、ここでは幾つかの条件にもとづいて諸パラメータを仮定する。

電力および熱の逆需要関数のパラメータは、基準となる単価と価格弾力性を与えることによって定まる。電力の単価は、大口電力の従量料金並みで10円/kWhとする。熱供給価格は冷熱、温熱の違いや地域により大きくばらつくが、ここでは都市ガス料金並みとし、電力単価の1/2とする。熱需要の価値は電力より低く、電力、熱需要の長期価格弾力性をそれぞれ-0.8、-0.4とする。

固定費用については、託送料金の計算においては不要なため設定しない。発電の限界費用はピーク時間帯の限界費用とみなし、10~20円/kWhとする。ネットワーク運用コストは、米国の託送サービス料金(託送単価は販売単価の約1割)を参考に $c_s=1\sim3$ 円/kWhとする。コージェネレーションの運転費用は石油燃料、ガスの特約料金を参考に5~10円/kWhとする。システム特性 h については、ガスエンジン発電機の熱電比を参考に $h=1.6$ とする。

まず、標準ケースとして、 $c_1=20$ 円/kWh、 $c_2=5$ 円/kWh、 $c_s=2$ 円/kWhのとき、託送料金は2.25~17.60円/kWhと非常に広い範囲で交渉が成立する。また、利益折半方式では託送料金は7.67円/kWhであり、その中間に収る。標準ケースにおける消費者の買電価格 P は22.5円/kWhである。託送料金の下限値では、電力会社は託送に伴い $r-c_s=0.25$ 円/kWhの利得を得る。託送料金の上限値では、コージェネレーターは $P-r-c_2=-0.1$ 円/kWhとコスト割れで余剰電力を販売することになる。しかし、このときの販売収入-販売費用=-1.17百万円/hとなり、その損失は独占時の費用8.98百万円/hより小さいので余剰電力を廃棄するより有利である。

利益折半方式の託送が実施されたとき、1kWhの託送にともなう電力会社とコージェネレータ

一の利得の変化は、

$$\text{電力会社} : r - c_s = 5.67 \text{円/kWh}$$

コージェネレータ : $P - r - c_2 = 9.83 \text{円/kWh}$
である。

託送料金の水準は、電力会社およびコージェネレーターの限界費用に大きく依存するため、感度解析を行った。表1に示すようにコージェネレーターの限界費用に比して電力会社の限界費用が高くなるほど、託送料金の範囲は広がり、水準も上がる。

表1 託送料金の数値例 (単位: 円/kWh)

	r_{\min}	r_{\max}	r_{ss}
c_1			
10	7.25	15.73	4.24
15	4.75	16.79	6.02
20	2.25	17.60	7.67
c_2			
5	2.25	17.60	7.67
10	2.25	16.66	7.37
c_s			
1	1.75	17.10	7.67
2	2.25	17.60	7.67
3	2.75	18.10	7.67

註) r_{\max} , r_{\min} は託送料金の上下限值
 r_{ss} は利益折半方式の託送料金

これは、コージェネレーターがコスト的に有利になるほど、市場参入の機会も増えることを意味する。一方、コージェネレーターの限界費用は、電力会社の限界費用ほど託送料金に影響を与えない。電力会社のネットワーク・コストは託送料金の上下限値をスライドさせるが、利益折半方式では、ネットワーク・コストは共同利得の最大値に無関係であるため、託送料金に影響を与えない。

5. おわりに

電力供給市場が新規参入事業者に対しても開放され、電力の買取り、託送などが認められる

とした場合の販売システムを分析した。その結果、コージェネレーターが余剰電力を電力供給市場に供給できる発電設備を持ち、その価格が市場の需給で決定されるならば、政府は電力の生産の一部をコージェネレーターに分担させ、電力システムの使用料を電力会社に支払い、直接一般消費者に電力を供給する協調的な形態と、電力会社が電力を独占的に販売し、生産の一部をコージェネレーターが担う独占販売の形態の二つの形態のいずれでも、社会厚生上は同等である。この二つの状態は、電力会社の独占生産・独占販売の状態と比較して社会的に望ましい。もちろんこの際の条件として、参入費用がある程度低く抑えられる必要がある。

今後は、系統電力と自家発、コージェネレーションの電力の質の違いを反映した価格形成、時間帯による需給状況の違いを考慮したモデルへの拡張などを検討する予定である。またカルテル状況における既存企業と新規参入者間の利益配分などについても検討を要する。

【参考文献】

- [1] 浅野, 桑畑: 将来の電力取引形態に関するゲーム論的分析, 第7回エネルギーシステム・経済コンファレンス(1991.1)
- [2] 浅野: 自家発保有需要家向け料金のゲーム論的分析, 電力中央研究所報告Y91004, 1991.
- [3] 伊藤, 鈴木, 川久保, 高橋: 電力市場における規制緩和の影響に関するゲーム論的分析, 電力中央研究所調査資料(1988)
- [4] 桑畑, 渡辺: 電力供給市場における参入企業と既存企業の競合に関する考察, 理論・計量経済学会1990年度大会(1990)
- [5] 伊藤, 清野 他: 産業政策の経済分析, 東京大学出版会, 1988.
- [6] Sharkey, William. W: The theory of natural monopoly, Cambridge University Press, 1982.
- [7] 鈴木編: 競争社会のゲームの理論, 勁草書房, 1970
- [8] 前田, 茅: 自家発を考慮した電力季時別料金制の

ゲーム論的考察, エネルギー・資源研究会第9回研究発表会講演論文集, 199/204(1990)

〔 くわはた あけお
情報システム部 経営情報研究室
あさの ひろし
経済部 エネルギー研究室 〕