時間帯別料金制下における 電力託送を含めたコジェネ自家発の最適挙動

正 員 秋澤 淳 (東京農工大)
正 員 茅 陽一 (慶応大)

The Optimal Behavior of Co-generation with and without Wheeling under Time-of-Use-Pricing

Atsushi Akisawa, Member (Tokyo University of Agriculture and Technology)

Yoichi Kaya, Member (Keio University)

Authors already developed a model which describes the behavior of co-generator with and without wheeling. Wheeling enables co-generators to send electricity produced by them to remote customers through the transmission lines of utility companies. In the previous study, we theoretically analyzed its optimal behavior from the viewpoint of maximizing the co-generator's benefit and numerically evaluated the effects of wheeling on the energy efficiency. In this study the model is expanded so as to investigate its behavior under time-of-use-pricing of electricity. While the previous model is of a single time period, new model has two periods, i.e. peak and off-peak periods. It is interesting to model and analyze the behavior of co-generator under time-of-use-pricing because some modes of operating co-generation depend upon the price of each period.

Expanded criterion of the behavior under time-of-use-pricing is formulated and optimized analytically based on the Kuhn-Tucker condition. The condition under which wheeling occurs and that under which electricity is purchased are also clarified. In comparison with the behavior of auto-producers which supply only electric power, co-generator expands the range in operation with respect to time-of-use-pricing. The impacts of wheeling on the energy efficiency estimated in numerical examples imply that it is socially beneficial because it increases the efficiency of the system with co-generation plants.

キーワード： コジェネ，電力託送，時間帯別料金制，エネルギー効率

1. まえがき

コジェネレーション（以下コジェネ）は省エネルギーのための有望な対策の一つと期待され、近年都市部における業務用途に導入されつつある。コジェネの省エネルギー性を発揮させるためには電力需要と熱需要とが整合している必要がある。筆者らは既に、整合性を改善する方法として電力託送に注目し、託送の有無別にコジェネの挙動をモデル化し、最適行動を比較分析した^[1]。その結果として、託送がコジェネ・システムのエネルギー効率向上に役立つことを示した。最近、電力市場への参入規制緩和の方向が打ち出されてきており、将来的に既存の電力会社以外の卸、小売の発電会社や電力託送が実現すると期待される。一方、電力会社の負荷率低下が進みつつあり、デマンドサイドマネジメントが注目されている。その一つとして現在でも一部で季時別料金制が導入されているが、今後、時間帯別料金制は一層一般化すると予想される。

前論文では主としてコジェネと電力託送の関係に注目し電力会社の事情には比重を置いていない。しかしながら、コジェネ自身が電力市場の内部で運転されることを考えれば、時間帯別料金制の影響は無視できない。前回の均一料

金制の場合とは異なり、時間帯別料金制の下ではコジェネの運転がピーク、オフピーク料金に大きく影響されることになる。コジェネではない通常型自家発の挙動については重次ら^[2]が分析しているが、熱供給の効果や託送については考慮されていない。既存の電力会社とコジェネの競合関係を議論するためには時間帯別料金制を踏まえたモデルが必要である。

そこで、本研究では時間帯別料金制、コジェネ、電力託送の3者の関係の分析を目的として、前回のコジェネ挙動モデルを2時間帯モデルに拡張した。これに基づき、通常型自家発の挙動と比較してコジェネの効果を導くとともに、1時間帯モデルと同様に託送がコジェネ・システムのエネルギー効率に及ぼす影響を示す。

2. モデル化の考え方

〈2.1〉コジェネ自家発挙動の考え方 均一料金モデルと同じく、コジェネ保有者は自己の便益を最大化するようにコジェネを運転すると考える。コジェネ保有者の便益は厚生経済学に基づいて、電力および熱の消費によって得られる効用からコストを差し引いたものとして次式の通り定式化される^[3]。

$$J = \int_0^x P_e(x)dx + \int_0^y P_h(y)dy - C(x,y) \rightarrow \text{Max.} \quad \dots (1)$$

ただし、 $P_e(x)$: コジェネ保有者の電力の限界効用関数、 $P_h(y)$: 同熱の限界効用関数、 $C(x,y)$: コジェネ運転および買電のコスト

ここで、限界効用関数とはいわゆる需要曲線に相当するものであり、(1)式中の積分は消費者余剰、すなわち消費者側が得をした分を意味する。

〈2.2〉前提条件 本検討では電力に関して1日をピークおよびオフピークの2時間帯に区分する。熱については1日を1時間帯とした。電力託送料金はkWhに比例するものと仮定した。以下で用いる変数等を次のように定義する。

i : 時間帯区分 ($i=1$: オフピーク, $i=2$: ピーク),

X_{Ni} : i 時間帯のコジェネ発電量,

X_{Ui} : i 時間帯のコジェネ保有者の買電量,

X_{Ri} : i 時間帯の託送受け手となる別の需要家の買電量,

X_{Wi} : i 時間帯の託送電力量,

Y : 熱需要量, K : コジェネ設備容量,

γ : コジェネ固定費, η : コジェネ変動費,

δ : 熱供給固定費, ε : ボイラ追いだき用燃料費,

ρ : コジェネ熱電比 (熱出力/電力出力),

P_{eNi} : i 時間帯のコジェネ保有者の電力の限界効用関数,

P_{eRi} : i 時間帯の別の需要家の電力の限界効用関数,

P_h : コジェネ保有者の熱の限界効用関数,

P_{Ui} : i 時間帯の電力料金, P_w : 託送料金,

T_i : i 時間帯の時間数

3. 託送を含まない場合のモデル

〈3.1〉定式化 まず、託送を含まない場合についてコジェネ挙動の2時間帯モデルを定式化する。ボイラ追いだきの有無によりコスト関数が異なるため、コジェネ保有者の便益の定式化は3通りに分かれる。

(1) ケース1: 追いだきしない場合

$$J_1 = \sum_{i=1}^2 T_i \int_0^{X_{Ui}+X_{Ni}} P_{eNi}(x)dx + (T_1+T_2) \int_0^Y P_h(y)dy - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1}T_1 + X_{N2}T_2) + \delta Y \right\} - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} X_{Ui} T_i \quad \dots (2)$$

s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i=1,2) \quad \dots (3)$$

$$Y \leq \rho X_{N1} \quad (i=1,2) \quad \dots (4)$$

ここで、(2)式の第1項目は電力の効用、2項目は熱の効用、3項目はコジェネのコスト、4項目は買電のコストを示す。なお、本ケースではボイラ追いだきが行われないため、3項目には熱供給の固定費のみを含めている。(3)式は各時間帯の発電量が設備容量以下であること、(4)式は各時間帯とも熱需要がコジェネの排熱供給より小さいことを意味する。

(2) ケース2: オフピーク時に追いだきする場合

$$J_2 = \sum_{i=1}^2 T_i \int_0^{X_{Ui}+X_{Ni}} P_{eNi}(x)dx + (T_1+T_2) \int_0^Y P_h(y)dy - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1}T_1 + X_{N2}T_2) + \delta Y + \varepsilon (Y - \rho X_{N1}) T_1 \right\} - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} X_{Ui} T_i \quad \dots (5)$$

s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i=1,2) \quad \dots (6)$$

$$Y > \rho X_{N1} \quad \dots (7)$$

$$Y \leq \rho X_{N2} \quad \dots (8)$$

(5)式の各項の意味は(2)式と同じである。本ケースではオフピーク時のみに追いだきが入るので、3項目に追いだきに要する燃料費が加わっている。(7)式はオフピーク時は熱需要がコジェネの排熱供給を上回ることを示す。

(3) ケース3: ピーク、オフピーク時に追いだきする場合

$$J_3 = \sum_{i=1}^2 T_i \int_0^{X_{Ui}+X_{Ni}} P_{eNi}(x)dx + (T_1+T_2) \int_0^Y P_h(y)dy - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1}T_1 + X_{N2}T_2) + \delta Y + \varepsilon (Y - \rho X_{N1}) T_1 + \varepsilon (Y - \rho X_{N2}) T_2 \right\} - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} X_{Ui} T_i \quad \dots (9)$$

s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i=1,2) \quad \dots (10)$$

$$Y > \rho X_{N1} \quad (i=1,2) \quad \dots (11)$$

本ケースでは両時間帯ともに追いだきするので、(5)式にさらにピーク時の追いだき燃料費が追加される。(11)式はどちらの時間帯でも熱需要がコジェネの排熱供給より多いことを示す。

〈3.2〉最適解 上記の各評価関数に対応しラグランジェ乗数を導入してラグランジアンを構成し、クーン・タッカー条件から最適解を導く。ラグランジアンは次の通り。

$$H_j = J_j + \lambda_1(K - X_{N1}) + \lambda_2(K - X_{N2}) + \mu_1(\rho X_{N1} - Y) + \mu_2(\rho X_{N2} - Y) \quad (j=1,2,3) \quad \dots (12)$$

ここでは買電なし、コジェネが電力および熱供給を行う解を求めた。この結果、コジェネの最適挙動は5つのモードに分かれて得られた。

(1) モード1: ピーク、オフピークとも排熱余剰

H_1 を用いて最適条件は次のように求められる。

$$\frac{\partial H_1}{\partial X_{N1}} = (P_{eN1} - \eta) T_1 - \lambda_1 + \mu_1 \rho = 0 \quad \dots (13)$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial X_{N2}} = (P_{eN2} - \eta) T_2 - \lambda_2 + \mu_2 \rho = 0 \quad \dots (14)$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial Y} = P_h(T_1 + T_2) - \delta - \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad \dots (15)$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial K} = -\gamma + \lambda_1 + \lambda_2 = 0 \quad \dots (16)$$

これより次を得る。

$$P_{eN1} = \eta + \frac{\lambda_1 - \mu_1 \rho}{T_1} \quad \dots (17)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\lambda_2 - \mu_2 \rho}{T_2} \quad \dots (18)$$

$$P_h = \frac{\delta + \mu_1 + \mu_2}{T_1 + T_2} \quad \dots (19)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = \gamma \quad \dots (20)$$

この時、両時間帯ともコジェネ排熱が余ることから、

$$\mu_1 = \mu_2 = 0. \quad \dots (21)$$

また、オフピークは設備余裕があるため $X_{N1} < K$. ゆえに、

$$\lambda_1 = 0. \quad \dots (22)$$

したがって、(20)式より $\lambda_2 = \gamma$ となるため、

$$K = X_{N2}. \quad \dots (23)$$

以上から、本モードの最適条件は次のようにまとめられる.

$$P_{eN1} = \eta \quad \dots (24)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\gamma}{T_2} \quad \dots (25)$$

$$P_h = \frac{\delta}{T_1 + T_2} \quad \dots (26)$$

(24)(25)式はオフピーク時は発電の燃料費を負担し、ピーク時は燃料費に加えコジェネの固定費も負担することを示している. また(26)式から、追いだきがないため熱の限界価値としては熱供給の固定費となる.

本モードが最適解となる ρ の範囲は、オフピーク時に熱が余っていることから次式となる.

$$\rho > \frac{\gamma}{X_{N1}} = \frac{P_h^{-1} \left(\frac{\delta}{T_1 + T_2} \right)}{P_{eN1}^{-1}(\eta)} = \rho_1 \quad \dots (27)$$

(2) モード2: ピーク排熱余剰, オフピークは過不足なし

(17)~(20)式において、オフピーク時に排熱が過不足ない状態であるのでラグランジェ乗数が活性化する. 一方、ピーク時は不活性化状態である. すなわち、

$$\mu_1 > 0, \mu_2 = 0. \quad \dots (28)$$

また、(22)(23)式も成立する. したがって、本モードの最適条件として次を得る.

$$P_{eN1} = \eta - \frac{\mu_1 \rho}{T_1} \quad \dots (29)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\gamma}{T_2} \quad \dots (30)$$

$$P_h = \frac{\delta + \mu_1}{T_1 + T_2} \quad \dots (31)$$

(29)(31)式はオフピーク時にコジェネ排熱の需給を均衡させるため、電力需要を拡大し熱需要を抑制することを示す.

ここで、 ρ が小さくなるにつれて μ_1 は増加するが、ボイラの燃料費相当額を越えればボイラ追いだきを行った方が便益が大きい. したがって、 $\mu_1 = \varepsilon T_1$ の時にオフピーク時に追いだきが導入される. この時の熱電比を ρ_2 とすれば、本モードが最適解となる熱電比の範囲は次となる.

$$\rho_1 \geq \rho \geq \rho_2 \quad \dots (32)$$

(3) モード3: ピーク排熱余剰, オフピーク排熱不足

オフピーク時にはボイラ追いだき導入されるためコスト関数が変わる. ラグランジアン H_3 を用いて先と同じく一階微分 $=0$ を求め、最適条件として次を得る.

$$P_{eN1} = \eta - \varepsilon \rho + \frac{\lambda_1}{T_1} \quad \dots (33)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\lambda_2 - \mu_2 \rho}{T_2} \quad \dots (34)$$

$$P_h = \frac{\delta + \varepsilon T_1 + \mu_2}{T_1 + T_2} \quad \dots (35)$$

ここで、各時間帯で排熱が余剰もしくは不足のため、

$$\mu_1 = \mu_2 = 0. \quad \dots (36)$$

また、(20)(22)(23)式も成立する. したがって、

$$P_{eN1} = \eta - \varepsilon \rho \quad \dots (37)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\gamma}{T_2} \quad \dots (38)$$

$$P_h = \frac{\delta + \varepsilon T_1}{T_1 + T_2} \quad \dots (39)$$

本モードではオフピーク時に追いだきが行われるが、(37)式は熱供給におけるコジェネ排熱の貢献分が差し引かれていと解釈できる. また、(39)式は熱供給の固定費に加えオフピーク分のボイラ燃料費が負担されることを示す.

本モードが最適解となる熱電比の範囲は、ピーク時に排熱が余っていることから次となる.

$$\rho > \frac{\gamma}{X_{N2}} = \frac{P_h^{-1} \left(\frac{\delta + \varepsilon T_1}{T_1 + T_2} \right)}{P_{eN1}^{-1} \left(\eta + \frac{\gamma}{T_2} \right)} = \rho_3 \quad \dots (40)$$

したがって、オフピークの条件を考慮して、

$$\rho_2 > \rho > \rho_3. \quad \dots (41)$$

(4) モード4: ピーク排熱過不足なし, オフピーク熱不足
(33)~(35)式において、ピーク時のみラグランジェ乗数が活性化する. すなわち、

$$\mu_1 = 0, \mu_2 > 0. \quad \dots (42)$$

また、(20)(22)(23)式も成立する. したがって、本モードの最適条件として次を得る.

$$P_{eN1} = \eta - \varepsilon \rho \quad \dots (43)$$

$$P_{eN2} = \eta + \frac{\gamma - \mu_2 \rho}{T_2} \quad \dots (44)$$

$$P_h = \frac{\delta + \varepsilon T_1 + \mu_2}{T_1 + T_2} \quad \dots (45)$$

(44)(45)式のラグランジェ乗数による調整は、ピーク時にコジェネ排熱の需給を均衡させるためである.

このとき、モード2と同様に μ_2 とボイラ追いだき燃料費 (εT_2) が一致した熱電比においてピーク時に追いだきが導入される. この時の熱電比を ρ_4 とすれば、本モードが最適解となる熱電比の範囲は次となる.

$$\rho_3 \geq \rho \geq \rho_4 \quad \dots (46)$$

(5) モード5: ピーク, オフピークともに排熱不足

本モードではすべての時間帯でボイラ追いだきを行う. したがって、評価関数 J_5 をに基づくラグランジアン H_5 を用いて最適条件を導く. 一階の微分条件から次を得る.

$$P_{eN1} = \eta - \varepsilon \rho + \frac{\lambda_1}{T_1} \quad \dots (47)$$

$$P_{eN2} = \eta - \varepsilon \rho + \frac{\lambda_1}{T_2} \quad \dots (48)$$

$$P_h = \frac{\delta}{T_1 + T_2} + \varepsilon \quad \dots (49)$$

両時間ともに排熱のラグランジェ乗数は不活性のため、
 $\mu_1 = \mu_2 = 0$, $\dots (50)$

また、(20)(22)(23)も成立する。したがって、

$$P_{eN1} = \eta - \varepsilon \rho \quad \dots (51)$$

$$P_{eN2} = \eta - \varepsilon \rho + \frac{\gamma}{T_2} \quad \dots (52)$$

$$P_h = \frac{\delta}{T_1 + T_2} + \varepsilon \quad \dots (53)$$

本モードではピーク時・オフピーク時ともに追いだきが入るので、先と同様に(51)(52)式の電力の限界値では排熱の貢献分が差し引かれている。一方、(53)式の熱の限界値は固定費と燃料費の合計を負担することを示す。

本モードが最適解となる熱電比の範囲は次で与えられる。
 $\rho < \rho_4$ $\dots (54)$

〈3.3〉買電しない電力料金の条件 電力会社から買電せずコジェネを運転する電力料金の条件を求める。買電しない、すなわち $X_{U1} = X_{U2} = 0$ が解となるクーン・タッカー条件は各ラグランジアン H_j について以下となる。

$$\frac{\partial H_j}{\partial X_{U1}} = (P_{eN1} - P_{U1}) T_1 < 0 \quad \dots (55)$$

$$\frac{\partial H_j}{\partial X_{U2}} = (P_{eN2} - P_{U2}) T_2 < 0 \quad \dots (56)$$

したがって、次を得る。

$$P_{U1} > P_{eN1} \quad \dots (57)$$

$$P_{U2} > P_{eN2} \quad \dots (58)$$

すなわち、最適条件として得られた前述の各モードの限界値よりも電力料金が高くなった場合にコジェネのみで電力を賄う。

4. 託送を含む場合のモデル

〈4.1〉定式化 託送を含めた場合では、コジェネの発電量 X_{Ni} から X_{Wi} が託送受け手となる別の需要家に送られると想定する。また、コジェネ保有者、別の需要家ともに系統から買電可能とする。この時の評価関数は以下の通りボイラ追いだきの有無により3通りに定式化される。各評価関数の中に別の需要家の電力の効用が新たに導入されている。

(1) ケース1：追いだきしない場合

$$J_1 = \sum_{i=1}^2 T_i \left\{ \int_0^{X_{U1} + X_{Ni} - X_{Wi}} P_{eNi}(x) dx + \int_0^{X_{R1} + X_{Wi}} P_{eR1}(x) dx \right\} \\ + (T_1 + T_2) \int_0^Y P_h(y) dy - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1} T_1 + X_{N2} T_2) + \delta Y + \varepsilon \right\} \\ - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} (X_{Ui} + X_{Ri}) T_i - P_w \sum_{i=1}^2 X_{Wi} T_i \quad \dots (59)$$

s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i = 1, 2) \quad \dots (60)$$

$$Y \leq \rho X_{N1} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (61)$$

$$X_{Wi} \leq X_{Ni} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (62)$$

初めの | | 内2項目が別の需要家に関する電力の効用を示す。また、第4項目に別の需要家の買電コストが δ 、第5項目に託送コストがつけ加わっている。(62)式は託送量がコジェネの発電量を超えないことを意味する制約である。

(2) ケース2：オフピーク時のみ追いだきする場合

$$J_2 = \sum_{i=1}^2 T_i \left\{ \int_0^{X_{U1} + X_{Ni} - X_{Wi}} P_{eNi}(x) dx + \int_0^{X_{R1} + X_{Wi}} P_{eR1}(x) dx \right\} \\ + (T_1 + T_2) \int_0^Y P_h(y) dy - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} (X_{Ui} + X_{Ri}) T_i - P_w \sum_{i=1}^2 X_{Wi} T_i \\ - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1} T_1 + X_{N2} T_2) + \delta Y + \varepsilon (Y - \rho X_{N1}) T_1 \right\} \quad \dots (63)$$

s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i = 1, 2) \quad \dots (64)$$

$$Y > \rho X_{N1} \quad \dots (65)$$

$$Y \leq \rho X_{N2} \quad \dots (66)$$

$$X_{Wi} \leq X_{Ni} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (67)$$

(3) ケース3：ピーク、オフピーク時に追いだきする場合

$$J_3 = \sum_{i=1}^2 T_i \left\{ \int_0^{X_{U1} + X_{Ni} - X_{Wi}} P_{eNi}(x) dx + \int_0^{X_{R1} + X_{Wi}} P_{eR1}(x) dx \right\} \\ + (T_1 + T_2) \int_0^Y P_h(y) dy - \sum_{i=1}^2 P_{Ui} (X_{Ui} + X_{Ri}) T_i - P_w \sum_{i=1}^2 X_{Wi} T_i \\ - \left\{ \gamma K + \eta (X_{N1} T_1 + X_{N2} T_2) + \delta Y + \varepsilon (Y - \rho X_{N1}) T_1 + \varepsilon (Y - \rho X_{N2}) T_2 \right\} \quad \dots (68)$$

s.t.

$$X_{Ni} \leq K \quad (i = 1, 2) \quad \dots (69)$$

$$Y > \rho X_{Ni} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (70)$$

$$X_{Wi} \leq X_{Ni} \quad (i = 1, 2) \quad \dots (71)$$

〈4.2〉電力託送が生起する条件 託送を含まないモデルと同様に、ラグランジアンを次のように構成し最適条件を導く。 λ_i , μ_i , θ_i はラグランジェ乗数。

$$H_j = J_j + \lambda_1 (K - X_{N1}) + \lambda_2 (K - X_{N2}) \\ + \mu_1 (\rho X_{N1} - Y) + \mu_2 (\rho X_{N2} - Y) + \theta_1 (X_{N1} - X_{W1}) + \theta_2 (X_{N1} - X_{W2}) \\ (j = 1, 2, 3) \quad \dots (72)$$

電力託送が生起する場合は、次式で表わされる X_{Wi} に関する条件が成立するときである。なお、ラグランジアン H_j の3ケースとも同じ最適条件を与える。

$$\frac{\partial H_j}{\partial X_{Wi}} = (P_{eRi} - P_{eNi} - P_{Wi}) T_i - \theta_i = 0 \quad \dots (73)$$

$$P_{eRi} = P_{eNi} + P_{Wi} + \frac{\theta_i}{T_i} \quad \dots (74)$$

ここで、限界効用関数 P_{eNi} , P_{eRi} は単調減少関数と考えられるので、ラグランジェ乗数 θ_i はゼロとなることが証明できる。言い替えれば、コジェネで発生した電力をすべて託送に回すことはない。したがって、託送が発生する最適条件は次で表わされる。

$$P_{eRi} = P_{eNi} + P_{Wi} \quad \dots (75)$$

すなわち、託送受け手の限界価値がコジェネ保有者の限界価値に託送料金を加えた値になる。一方、別の需要家が買電せず託送を受ける電力料金の条件は次となる。

$$\frac{\partial H_i}{\partial X_{Ri}} = (P_{eRi} - P_{Ui}) T_i < 0 \quad \dots (76)$$

$$\therefore P_{eRi} < P_{Ui} \quad \dots (77)$$

したがって、各時間帯の電力料金が(75)式を超えたならば託送が生起する。逆に、それを下回る電力料金では別の需要家は買電のみで賄うこととなる。

〈4.3〉最適解 コジェネ保有者および別の需要家が買電せずコジェネが電力を供給する解は、託送を含まない場合と同じく5つのモードに分かれて得られる。コジェネ保有者の最適挙動は基本的に託送を含まないモデルで得られた解と同じ形式である。ただし、コジェネ発電量が託送分を含むことによって排熱が増加するため、モードの切り替え点となる熱電比が託送を含まない場合よりも小さくなる。

5. 2時間帯料金制におけるコジェネ挙動

〈5.1〉コジェネ自家発電の挙動 電力託送を含まない場合のコジェネ保有者の最適挙動（電力需要、熱需要）を各時間帯についてプロットしたものを図1に示す。コジェネの熱電比に対応して太線上の1点が最適解として定まる。図中の曲線で描かれている部分はラグランジュ乗数が活性化する領域である。ここで、コジェネの発電効率は熱電比に依存することに注意が必要である。総合効率を一定とすればある熱電比 ρ_0 より高い範囲では熱出力を大きくとるため発電効率は小さくなる。したがって、その範囲ではコジェネの燃料費が増加し、電力需要が抑制される傾向を持つ。図1では ρ_0 がモード1の範囲内にあると仮定して描かれており、

図1 熱電比に対応したコジェネ保有者の最適な電力需要および熱需要

Fig. 1. The optimal demand of co-generator depending on the heat-electricity-ratio.

ρ_0 以上の範囲に対するプロットはモード1の熱供給レベルで一定の直線部分に相当する。

託送が発生した場合にはコジェネの電力供給が増加するため、託送分 X_w だけ最適挙動の曲線が X_N 軸上を右にシフトする結果となる。

〈5.2〉電力料金に対する反応の通常型自家発との比較

ここでは、電力のみを供給する通常型自家発とコジェネ自家発の場合の料金反応の違いを比較する。自家発の反応は次の4通りに分かれる。

- 1) 両時間帯とも自家発を運転する。
- 2) ピーク時のみ自家発を運転する。
- 3) 自家発をベース運転（一定出力運転）する。
- 4) 両時間帯とも買電する。

コジェネ自家発の時間帯別電力料金に対する挙動は、基本的に前述した最適条件を与える限界価値よりも電力料金が下回った場合に買電が行われる。オフピーク料金だけが下回ればコジェネはピーク時のみに運転され、オフピーク時は買電で賄われる（上記の2）。自家発のベース運転では両時間帯ともコジェネが運転されるが、コジェネ容量を越えるピーク時の需要は買電により補う（上記の3）。このため、ピーク時の限界価値は電力料金に一致する点に注意が必要である。この場合が生起する条件は次の通りとなる。

$$P_{eN1} = \eta + \frac{\lambda_1 - \mu_1 \rho}{T_1} < P_{U1} \quad (0 \leq \mu_1 \leq \epsilon T_1) \quad \dots (78)$$

$$P_{U2} = P_{eN2} = \eta + \frac{\lambda_2 - \mu_2 \rho}{T_2} < \eta + \frac{\gamma - \mu_2 \rho}{T_2} \quad (0 \leq \mu_2 \leq \epsilon T_2) \quad \dots (79)$$

ここで、(20)式においてベース運転のため設備容量制約が活性化し λ_1, λ_2 が正となることを考慮した。さらに(78)(79)式と(20)式から λ_1, λ_2 を消去し、次の条件を得る。

$$\gamma + \eta(T_1 + T_2) - (\mu_1 + \mu_2)\rho < P_{U1}T_1 + P_{U2}T_2 \quad \dots (80)$$

一方、通常型自家発の時間帯別料金に対する挙動は、コジェネの場合の ρ をゼロとみなせばよい。以上から得られたコジェネの場合および通常型の場合それぞれの挙動を図2に示した。ピーク時、オフピーク時もコジェネの方が運転される料金の下限が引き下げられている。言い替えれば、自家発の運用範囲が拡大されており、排熱利用を行うことによる有用性が表われている。

電力託送の挙動は前述した託送の生起条件から求められる。自家発ピーク運転時にはピーク時のみ託送が発生する。自家発ベース運転時には、ピーク時にはコジェネ側限界価値が電力料金に等しいため託送は発生せず、オフピーク時のみに託送が生起する。託送の挙動を図3に示す。

6. 数値例

〈6.1〉需要関数の推定 事務所ビルの需要を対象に、電力および熱の限界効用関数を推計する。限界効用関数は1次関数を仮定した[2]。これは次式のように表される。

図2 コジェネ保有者および通常型自家発保有者の時間帯別料金に対する反応

Fig. 2. The behavior of co-generator and auto-generator with respect to Time-of-Use-Pricing with two periods.

図3 別の需要家の時間帯別料金に対する反応

Fig. 3. The behavior of remote customer with respect to Time-of-Use-Pricing with two periods.

$$P_i(x_i) = \left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right) P_0 - \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{P_0}{X_{0i}}\right) x_i \quad \dots (81)$$

ただし、 ε ：価格弾性値、 P_0 ：現在の電力価格、 X_{0i} ：現在の時間帯*i*の需要量

事務所ビルの需要事例[4]から現在の需要量を求め、電力および熱の限界効用関数を推計したところ次式を得た。ただし、価格弾性値は文献資料[5][6]に基づき電力、熱ともに $\varepsilon=0.3$ と仮定した。限界効用関数の単位は(円/kcal)、 x と y の単位は(kcal/h/m²)である。また、別の需要家も事務所ビルとし、限界効用関数は(82)(83)式と同じと仮定する。

$$P_{eN1}(x_{N1}) = 0.101 - 0.0143 x_{N1} \quad \dots (82)$$

$$P_{eN2}(x_{N2}) = 0.101 - 0.00332 x_{N2} \quad \dots (83)$$

$$P_h(y) = 0.0217 - 0.00122 y \quad \dots (84)$$

電力託送に関するコスト実績はないので、電力託送単価はkWhあたり1円と仮定した。

(6.2) コジェネ最適挙動 今回の数値例では最適挙動における電力供給は、熱電比の変化に対してそれほど変わらない。また、ピーク、オフピーク時とも排熱が過不足ない状態となる熱電比の範囲は狭い。この点は図4におけるモード2またはモード4の運転状態から確認できる。

(6.3) 限界価値 最適挙動を与える電力の限界価値の変化を図4に示す。この結果は1時間帯モデルがそれぞれの時間帯に適用されたように見てとれるが、 p_0 がモード3に含まれているため、オフピーク時の限界価値の変化がゆがんでいる。ピーク時の熱電比0.2付近やオフピーク時の熱電比1.1付近では限界価値が最も低い。したがって、比較的低位の熱電比を持つコジェネにおいて、相対的に低い電力料金から託送が導入されると予想される。

(6.4) 託送のエネルギー効率に与える影響 託送の有無によるコジェネシステム(託送受け手も含む)のエネルギー効率の差異を図5に示した。なお、コジェネの発電効率は最大0.35、コジェネ全体のエネルギー効率は最大で0.8と仮定した。図より熱電比0.2~1.5程度の広い範囲でエネルギー効率が改善され、熱電比0.3において最大の約0.04の向上となる。熱電比1.7以上でエネルギー効率が逆に低下するのは排熱余剰と発電効率の低下に起因する。効率改善に2つのピークが表れている点は2時間帯モデルであることに起因する。多時間帯に拡張すれば一様に改善効果が現れることが予想される。熱電比0.3のコジェネはエネルギー効率が低い一方、熱電比1.3では効率が高いため、この結果から元々の効率の高いものにも低いものにも電力託送はコジェネの効率改善に対して有効と考えられる。

7. おわりに

本研究では筆者らが作成した電力託送を含めたコジェネ挙動モデルを1時間帯から2時間帯に拡張し、時間帯別料金

図4 電力の限界価値の挙動例

Fig. 4. Numerical results of marginal value of electricity.

図5 託送の有無によるエネルギー効率

Fig. 5. Energy efficiencies with and without wheeling.

制に対する最適挙動を導いた。なお、今回は電力需要を2時間帯、熱需要を1時間帯としたが、これは排熱需給のギャップを持たせるためで本質的ではない。今回の結果から熱需要を2時間帯にした場合も予想可能である。

時間帯別料金制を考慮した分析によりコジェネであることは通常型自家発に比べ稼働範囲が大きくとれることが示され、熱併給の効果が確認できた。また、時間帯別料金制の下での電力託送の発生条件およびその挙動を明らかにした。1時間帯に比べて2時間帯では運転モードが多様化するが、ピーク需要抑制のためピーク料金はある程度高く設定されると考えられるのでピーク時において託送が発生する可能性が大きい。その点からピーク時に熱需要を持つ需要家は託送送り手として有望と考えられる。電力託送はコジェネの効率改善をもたらすため省エネルギー推進の面から社会的に望ましいのみならず、さらに整合性を考慮して需要家を結合すれば、より効果的にエネルギー効率改善を図れると期待できる。

(平成6年9月28日受付、平成7年3月2日再受付)

文 献

- (1) 秋澤・茅：「電力託送を含めたコジェネレーション自

家発挙動のモデル分析」, 電学論B, vol.114, no.10 (1994)

(2) 重次・茅：「自家発電を考慮した電力時間帯別料金」, 電学論B, vol.112, no.12 (1992)

(3) M.A.Crew, P.R.Kleindorfer: "The economics of public utility regulation", Macmillan Press (1986)

(4) 「コージェネレーション負荷推計手法」, 日本コージェネレーション研究会 (1989)

(5) Maeda, Kaya: "GAME THEORY APPROACH TO USE OF NON-COMMERCIAL POWER PLANTS UNDER TIME-OF-USE PRICING", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, no. 3 (1992)

(6) 浅野・桑畑：「非電気事業者の電力市場参入—時間帯別供給分担の解析—」, エネルギー・資源学会第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 (1993)

秋澤 淳

(正員) 1961年12月29日生まれ。87年3月東京大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)三菱総合研究所入社。平成7年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月東京農工大学工学部講師。博士(工学)。主としてエネルギーシステムの分析を対象とした研究に従事。計測自動制御学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, エネルギー・資源学会, 日本シミュレーション学会会員。

茅 陽一

(正員) 1934年5月18日生まれ。62年3月東京大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年4月同大学工学部講師, 63年4月同助教授, 78年同教授。平成7年4月より慶応大学大学院政策・メディア研究科教授。工学博士。システム制御工学, エネルギー, 電力システムの計画・分析, および地球温暖化対策の評価に関する研究に従事。電子情報通信学会, 計測自動制御学会, エネルギー・資源学会, IEEE会員。