



RIETI Discussion Paper Series 18-J-003

調整力市場におけるネガワット取引とエネルギー利用効率

庫川 幸秀
早稲田大学

田中 誠
経済産業研究所



Research Institute of Economy, Trade & Industry, IAA

独立行政法人経済産業研究所

<http://www.rieti.go.jp/jp/>

調整力市場におけるネガワット取引とエネルギー利用効率*

庫川幸秀（早稲田大学）・田中誠（経済産業研究所・政策研究大学院大学）

要 旨

本稿では、エネルギー利用効率の水準が電力需要者の（需給逼迫時の）節電行動に与える影響及び、ネガワット取引を含む調整力市場の効率性に与える影響を明らかにする。さらに、社会厚生を最大にするエネルギー利用効率の決定要因について比較静学分析を行う。主な結果は以下のとおりである。第一に、エネルギー利用効率の向上はベースライン需要における消費便益を増大させる一方、ネガワット価格の上昇をもたらし、調整力市場における費用効率性を低下させる。火力電源の外部費用を考慮する場合、ベースライン需要を賄う（通常時の）電力が低炭素型に移行するほど、調整力市場における（需給逼迫時の）火力発電の影響が相対的に大きくなるため、社会的に最適なエネルギー利用効率の水準は低下する。同様の理由で、通常時の電力供給における火力電力の割合が十分低い場合は、火力発電の外部費用が大きいほど、エネルギー利用効率の最適水準は低下する。また、最適な炭素税が導入されているケースと、炭素税が導入されていないケースを比較すると、後者で選択されるエネルギー利用効率の水準が過大になり、炭素税を導入することで過大なエネルギー利用効率の水準を適正水準に抑制する効果も発揮されることが明らかになった。

キーワード：ネガワット，デマンドレスポンス，エネルギー利用効率，火力電源，調整力市場，社会厚生

JEL classification: D04, D62, Q48, Q58

RIETI ディスカッション・ペーパーは、専門論文の形式でまとめられた研究成果を公開し、活発な議論を喚起することを目的としています。論文に述べられている見解は執筆者個人の責任で発表するものであり、所属する組織及び（独）経済産業研究所としての見解を示すものではありません。

*本稿は、独立行政法人経済産業研究所におけるプロジェクト「電力システム改革における市場と政策の研究」の成果の一部である。また、本稿の原案に対して、八田達夫氏（電力・ガス取引監視等委員会）、樽井礼氏（ハワイ大学）、ならびに経済産業研究所研究会、ディスカッション・ペーパー検討会の参加者から多くの有益なコメントを頂いた。ここに記して、感謝の意を表したい。

1 はじめに

エネルギー利用効率（省エネ水準）が高まれば、通常時に電力を消費する局面では、より少ない消費量で、より大きい便益を得ることが可能になる。一方、需給逼迫時に需要者に節電を促す状況を考えた場合、電力消費量を一単位削減することによる便益の損失はエネルギーの利用効率が高まるほど大きくなるため、節電を促すのに必要な節電報酬額（ネガワット価格）も大きくなることが考えられる。電力需要に応じて供給量を対応させ、需要側の行動変容（デマンドレスポンス）を重視しない従来の枠組みでは、エネルギー利用効率が節電コストに与える影響を明確に考慮する必要も低く、あまり注目されてこなかった。しかし、温室効果ガスの排出削減の要請と再生可能エネルギーの普及を背景に、電力需要者の節電量（ネガワット）を調整力として活用することが求められている。市場を介したネガワット取引の規模が拡大していく状況を考えると、エネルギー利用効率がネガワット価格に与える影響が、社会厚生において無視できない要因になる状況が生じる可能性がある。本稿の目的は、エネルギー利用効率が通常時の電力消費に与える影響と、需給逼迫時にネガワットを含む調整力に与える影響を同時に考慮し、両者の相互関係を明らかにしたうえで社会的に最適なエネルギー利用効率とネガワット取引量のバランスについて、理論的に考察することである。

本稿の分析に関連する先行研究は、2つに分類することができる。一つ目では、エネルギー利用効率が通常時の電力消費に与える影響に焦点を当て、エネルギー効率に関連する規制政策のあり方を分析している（Abrardi and Cambini, 2015; Chu and Sappington, 2013; Wirl, 1995; Wirl, 2015）。二つ目では、需給逼迫時に節電報酬型デマンドレスポンスを導入する場合の需要者行動に焦点を当てた分析を行っている（Chu and DePillis, 2013）。両者を一体的に議論している研究は見当たらない。前者では、社会的に望ましいエネルギー効率水準を達成するための規制政策のあり方を議論しているが、需要者の節電行動を調整力として活用するという視点はない。したがって、ネガワット取引や調整力市場を含む分析は行われておらず、エネルギー効率改善が需要者の（需給逼迫時の）節電コストに与える影響に対しても焦点が当てられていない。後者では、消費者が需給逼迫時の節電収入を増大させることを目的として、ベースライン需要水準を意図的に引き上げる行動に着目した分析を行っているが、節電報酬額を外生的に与えており、ネガワット取引市場のモデルを明確に組み込んだ分析は行っていない。また、エネルギー利用効率がベースライン需要水準や消費者の節電コストに与える影響も考慮されていない。

本稿では、ネガワットと火力電力から成る調整力市場を考え、エネルギー利用効率が、ベースライン需要水準における電力消費便益と、調整力市場の効率性のそれぞれに与える影響、及び両者の間で発生するトレードオフ関係を明らかにする。また、社会厚生を最大にするエネルギー利用効率の水準について比較静学分析を行い、エネルギー利用効率水準とネガワット取引量の最適なバランスについて考察する。エネルギー利用効率の向上は、節電のコストを増大させ、調整力市場均衡におけるネガワット取引量を減少させる一方、調整力としての火力発電量を増大させる。したがって、エネルギー利用効率の向上によるベースライン需要水準の削減とネガワット取引量の拡大は

トレードオフの関係になる。火力発電に伴う外部費用を考慮する場合、エネルギー利用効率向上による火力発電量（ベースライン需要への供給）の削減効果と、調整力市場での火力依存度の増大効果のトレードオフを考慮し、社会厚生を最大にするバランスを考える必要がある。通常の電力供給（ベースライン需要への供給）が低炭素型にシフトするほど、調整力市場でネガワット取引量を拡大し火力発電量を削減する相対的な重要度が高まるため、エネルギー利用効率の最適水準は低下する。逆に、ベースライン需要への供給電力において、火力電力の割合が高い場合は、調整力市場で火力依存度を低下させる（ネガワット取引量を拡大させる）ことに比べ、ベースライン需要を削減することが相対的に重要になるため、社会的に最適なエネルギー利用効率の水準は高くなる。

本稿の構成は以下のとおりである。まず第2節でモデルの概要、および消費者とシステムオペレータの意思決定について説明し、調整力市場の市場均衡を導出する。また、エネルギー利用効率市場均衡に与える影響を分析する。第3節では、社会厚生関数を導入し、エネルギー利用効率の最適水準を左右するいくつかの要因について比較静学分析を行う。さらに炭素税導入の影響について分析する。最後に第4節で本稿の結果を整理し、今後の課題を述べる。

2 モデル

電力会社、消費者、システムオペレータから成るモデルを考える。突発的な供給量の不足 ΔQ が発生した場合に、システムオペレータが調整力市場を介して火力電源からの調達 q_f と、ネガワットの調達 q_n によって供給量の不足分を補う。供給不足時の火力電源の発電費用を $C_f(q_f) = b_f q_f + c_f q_f^2/2$ とする。以下では、供給不足が生じない場合に実現する電力需要をベースライン水準とし、下付き文字 0 で表記する。

2.1 ベースライン需要量

電力利用量を q 、電力の利用効率を θ 、電力利用に伴うサービス水準を $s := \theta q$ とする*2。例えば建物の断熱性能やエアコンの性能を高めることで、より少ない電力消費量で快適な温度を実現できるが、この例では室内の温度がサービス水準、建物の断熱性能やエアコンの性能が電力の利用効率に、それぞれ対応している。 θ を電気自動車の電力消費率（電費）と考える場合、 s は走行距離になる。また、電力消費者として工場などの事業者を想定する場合、 $u(s)$ は利潤、 θ は生産におけるエネルギー効率、 s は生産した財の量になる。消費者のエネルギー利用による便益は、電力利用量 q ではなくサービス水準 s に依存し、 $u(s) := as - bs^2/2$ である。本来、エネルギー利用効率 θ の選択主体は複数考えられ、需要者、電力・エネルギー事業者が自発的に投資をするインセンティブを考慮することは重要であるが、本稿ではその前段階として、社会計画者の視点から考えた場合の最適なエネルギー利用効率の水準*3に焦点を絞った分析をする。したがって、ここでは電力需要者は、 θ を所与として行動すると考える。

*2 WirI (1995) および WirI (2015) において、このアプローチが適用されている。

*3 政策当局がエネルギー利用効率の政策目標を設定する場合に提示する水準と捉えることができる。

消費者は価格受容者として、電力価格を所与として効用を最大化する電力利用量を選択する。

$$\max_q u(s) - p_e q \quad (1)$$

効用最大化の1階条件

$$\theta u'(\theta q) = p_e \quad (2)$$

より、電力需要のベースライン水準が以下のように得られる。

$$q_0(p_e, \theta) = \frac{a\theta - p_e}{b\theta^2} \quad (3)$$

電力会社の供給費用関数を $C_e(q) := b_e q + c_e q^2/2$ とする。

ベースライン消費水準において、電力利用効率が消費者余剰に与える影響は、

$$\frac{d\{u(s_0) - p_e q_0\}}{d\theta} = u'(s_0) q_0 > 0 \quad (4)$$

であり、電力効率の向上は消費者余剰を増大させる。また、電力効率がベースラインにおける消費便益 $u(s_0)$ に与える影響は、

$$\frac{du(s_0)}{d\theta} = -\frac{[u'(s_0)]^2}{\theta u''(s_0)} > 0 \quad (5)$$

であり、電力効率の向上はベースライン消費における便益を増大させる*4。

2.2 θ の q_0 への効果

一般に、効用最大化の1階条件 $\theta u'(s_0) = p_e$ の辺々を p_e で微分すると

$$\theta^2 u''(s_0) \frac{\partial q_0}{\partial p_e} = 1$$

より、ベースライン消費における需要の価格弾力性は以下ようになる。

$$\epsilon_0 = -\frac{p_e}{q_0} \frac{\partial q_0}{\partial p_e} = -\frac{u'(s_0)}{s_0 u''(s_0)}$$

一方で、効用最大化の1階条件を辺々 θ で微分すると

$$u'(s_0) + \theta q_0 u''(s_0) + \theta^2 u''(s_0) \frac{\partial q_0}{\partial \theta} = 0$$

となるため、電力利用効率が電力需要量へ与える影響 $\partial q_0 / \partial \theta$ は以下のように得られる。

$$\frac{\partial q_0}{\partial \theta} = -\frac{u'(s_0) + \theta q_0 u''(s_0)}{\theta^2 u''(s_0)} = -\frac{u'(s_0)}{\theta^2 u''(s_0)} \left(\frac{\epsilon_0 - 1}{\epsilon_0} \right)$$

*4 $u(s) = as - bs^2/2$ のとき、 $du(s_0)/d\theta = p_e^2/b\theta^3$ である。

したがって、電力利用効率の上昇が電力需要へ与える効果は、

$$\frac{\partial q_0}{\partial \theta} \begin{cases} > 0 & \epsilon_0 > 1 \\ = 0 & \epsilon_0 = 1 \\ < 0 & \epsilon_0 < 1 \end{cases}$$

となり、需要の価格弾力性が1より大きい場合は電力需要を増加させ、1より小さい場合は電力需要を減少させる*5。

本稿で用いている2次の効用関数 $u(s) := as - bs^2/2$ の場合、ベースライン需要の価格弾力性は $\epsilon_0 = p_e/(a\theta - p_e)$ であるため、 p_e が $a\theta/2$ より大きければ正の効果、 p_e が $a\theta/2$ より小さければ負の効果をもたらす。多くの実証研究が、電力需要の価格弾力性が1より小さいことを示唆していることから*6、以降の議論ではベースライン需要の価格弾力性は1より小さく、エネルギー利用効率の向上によってベースライン需要量が減少するケースを想定する。そのため、選択可能なエネルギー利用効率の範囲を $[\underline{\theta}, \bar{\theta}]$ とし、 $2p_e > a\theta$ であると仮定する。

2.3 消費者による節電量の決定

供給不足時にはシステムオペレータがネガワットアグリゲータの役割を兼ねて、消費者に節電報酬を支払うことで、ネガワットを調達する。消費者はシステムオペレータが設定した節電報酬単価 r を所与として節電（ネガワット）量 q_n を決定する。ただし、節電量は通常時の需要量をベースラインとして決定される*7。節電量 q_n における効用水準は、ベースライン水準における消費者余剰に、節電による電気料金の節約分と節電報酬の獲得額の合計を加え、節電による電力消費便益の損失分を差し引いたものになる。したがって、消費者の効用最大化問題は以下のように書ける。

$$\max_{q_n} \{u(s_0) - p_e q_0\} + (p_e + r)q_n - \int_{q_0 - q_n}^{q_0} \frac{du(s)}{dq} dq \quad (6)$$

効用最大化の1階条件は以下のとおりである。

$$\{(a\theta - b\theta^2 q_0) + b\theta^2 q_n\} = p_e + r \quad (7)$$

上式左辺は、節電（ネガワット供給）の限界費用 MC_n 、右辺は節電による限界利得で、電気料金節約効果と節電報酬額の合計である。

ここで、ベースライン消費量は $a\theta - b\theta^2 q_0 = p_e$ となる水準で選択されているため、節電の限界費用は

$$MC_n = p_e + b\theta^2 q_n \quad (8)$$

である。上式から、ネガワット供給の限界費用を上昇させる要因として、小売電気料金の上昇とエネルギー利用効率の向上が挙げられる。通常時の電力料金が低いほど、消費者の電力消費量は既に

*5 Wirl (1995; 2015) を参照。

*6 Labandera et al. (2017) を参照。

*7 節電後の消費量を q_1 とすると、 $q_1 = q_0 - q_n$ である。

少ない状態で、電力消費の限界便益も高いために、ネガワット供給（節電）の限界費用は高くなる。また、エネルギー利用効率の向上は、消費者にとっての電力 1 単位当たりの価値を増大させるため、節電による便益の損失を増大させ、節電の限界費用を増大させる。

(7) と (8) より、ネガワット供給関数 $q_n = r/b\theta^2$ および逆供給関数 $r = b\theta^2 q_n$ が得られる。

2.4 システムオペレータの意思決定

供給不足 ΔQ が発生した場合、システムオペレータは、調整力市場に入札されている火力電源の限界費用曲線 MC_f とネガワットの限界費用曲線 MC_n に基づいて、調達にかかる費用が最小になるように火力電力 q_f とネガワット q_n の調達量の配分を決める。火力発電には炭素税 t が課されており、調整力市場に入札される火力電源の限界費用には炭素税も含まれると考える ($MC_f = C'_f(q_f) + t$)。したがって、システムオペレータが直面する問題は以下のように書ける。

$$\min_{q_f, q_n} \{C_f(q_f)\} + C_n(q_n, \theta) + tq_f \quad \text{s.t. } q_f + q_n = \Delta Q \quad (9)$$

ここで、 $C_f(\cdot)$ は火力電源の費用関数で、 $C_f(q_f) := b_f q_f + c_f q_f^2/2$ とする。ネガワットの費用関数は $C_n(q_n, \theta) = p_e q_n + b\theta^2 q_n^2/2$ である。内点解を想定すると、費用最小化の 1 階条件は $MC_f = MC_n$ であり、実現する調達量配分は以下のとおりである。

$$q_f^* = \frac{(p_e - b_f - t) + b\theta^2 \Delta Q}{c_f + b\theta^2} \quad (10)$$

$$q_n^* = \frac{(b_f + t - p_e) + c_f \Delta Q}{c_f + b\theta^2} \quad (11)$$

また、このとき火力電力の調達価格 p_f^* と節電報酬額 r^* は、それぞれ以下のようになる。

$$p_f^* = \frac{b\theta^2(b_f + t) + c_f p_e + b c_f \theta \Delta Q}{c_f + b\theta^2} \quad (12)$$

$$r^* = \frac{\{(b_f + t - p_e) + c_f \Delta Q\} b\theta^2}{c_f + b\theta^2} \quad (13)$$

以下では表記の簡略化のため、 $AC^* := C_f(q_f^*) + C_n(q_n^*, \theta)$ とおく。

2.5 比較静学 (θ の効果)

システムオペレータの意思決定の結果実現する市場均衡解に、エネルギー利用効率 θ が与える影響は以下ようになる。

$$\frac{dq_f^*}{d\theta} = \frac{2b\theta}{c_f + b\theta^2} q_n^* > 0 \quad (14)$$

$$\frac{dq_n^*}{d\theta} = -\frac{2b\theta}{c_f + b\theta^2} q_n^* < 0 \quad (15)$$

$$\frac{dr^*}{d\theta} = \frac{2b\theta c_f}{c_f + b\theta^2} q_n^* > 0 \quad (16)$$

$$\frac{dp_f^*}{d\theta} = \frac{2b\theta c_f}{c_f + b\theta^2} q_n^* > 0 \quad (17)$$

また、エネルギー利用効率 θ がシステムオペレータによる調達コストに与える影響は次のようになる。

$$\frac{d(AC^* + tq_f^*)}{d\theta} = \frac{\partial C_n(q_n^*, \theta)}{\partial \theta} = b\theta q_n^{*2} > 0 \quad (18)$$

以上から、エネルギー利用効率の向上は、ネガワット供給の限界費用を上昇させ、供給不足が発生した場合の調整時にネガワットから火力電源へのシフトを促す。その結果、供給不足調整時に化石燃料発電量を増加させ、同時に需給調整のための調達コストを増大させる。

前述のように、エネルギー効率の向上がベースライン需要を減少させるか、増加させるかは、需要の価格弾力性に依存するが、いずれのケースにおいてもベースラインにおける消費便益を増大させる。しかし、需給調整の局面においては逆に、ネガワット価格の上昇によって間接的に火力電源の発電量が増加する効果をもたらすと同時に、需給調整における調達コストを増大させる。

以上を整理すると以下の命題になる。

命題 1

- (i) $dq_n^*/d\theta < 0$, $dq_f^*/d\theta > 0$ であり、エネルギー利用効率の改善は、需給調整時のネガワット調達量を減少させ、火力電源調達量を増加させる。
- (ii) $d(AC^* + tq_f^*)/d\theta > 0$ であり、エネルギー利用効率の改善は、需給調整時の調達コストを増大させる。

3 エネルギー利用効率の最適水準

ここでは、社会的に最適なエネルギー利用効率の水準について考える。

全体の追従力不足分 ΔQ のうち、火力電源による部分を ΔQ_F 、再生可能エネルギーによる部分を ΔQ_R とする ($\Delta Q = \Delta Q_F + \Delta Q_R$)。社会厚生関数を、ベースラインの電力消費便益 $u(s_0)$ から、需給調整の費用、火力発電に伴う外部費用、およびエネルギー効率改善投資の費用を差し引い

たものとして、以下のように定義する。

$$SW := \{u(s_0) - C_e(\alpha q_0 - \Delta Q_F)\} - AC^* - \delta(\alpha q_0 - \Delta Q_F + q_f^*) - I(\theta) \quad (19)$$

ここで、 δ は火力発電に伴う限界外部費用、 $\alpha \in [0, 1]$ はベースライン需要を賄うための電源構成における火力発電の割合、 $I(\theta)$ はエネルギー利用効率を改善するための投資費用で、 $I(\theta) := k(\theta - \underline{\theta})$ とする*8。また、 $C_e(\cdot)$ は通常時の火力発電の費用関数で、 $C_e(q) := b_e q + c_e q^2/2$ とする。

3.1 最適な炭素税 ($t \equiv \delta$) が導入されているケース

まずはじめに、最適な炭素税が導入されているケース ($t \equiv \delta$) における、最適なエネルギー利用効率について考える。(19) を目的関数として、社会厚生を最大にするようなエネルギー利用効率

$$\theta^o(\delta, \alpha) = \arg \max_{\theta} SW(\theta, \delta, \alpha) \quad (20)$$

が選択される。

3.1.1 α の θ^o への効果

以下の議論では、選択可能なエネルギー利用効率の範囲 $[\underline{\theta}, \bar{\theta}]$ において、社会厚生が極大値をとる最適水準 $\theta^o \in [\underline{\theta}, \bar{\theta}]$ が存在すると想定する。内点解を想定して、社会厚生最大化の1階条件 $\partial SW / \partial \theta = 0$ を辺々 α で微分して整理すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial \theta^o(\delta, \alpha)}{\partial \alpha} = - \frac{\partial^2 SW / \partial \theta \partial \alpha}{\partial^2 SW / \partial \theta^2} \quad (21)$$

社会厚生最大化の2階条件より、右辺分母は負である。したがって、(21) の符号は右辺分子の符号と一致する。(21) の分子は

$$\frac{\partial^2 SW}{\partial \theta \partial \alpha} = -(\delta + C'_e + \alpha C''_e q_0) \frac{dq_0}{d\theta} > 0 \quad (22)$$

であるため、以下の命題が得られる。

命題 2

$\partial \theta^o(\delta, \alpha) / \partial \alpha > 0$ であり、 α が高いほど最適なエネルギー利用効率の水準は高くなり、 α が低いほど最適なエネルギー利用効率の水準は低くなる。

この命題は、再生可能エネルギーの普及などにより、通常時の電力供給における火力電力の割合が低下するのに伴い、ベースライン需要を削減することによる環境負荷の低減効果が小さくなり、逆に調整力市場でネガワット取引量を拡大して火力依存度を低下させることによる環境負荷の改善効果が大きくなるために、社会的に最適なエネルギー利用効率の水準が低下することを意味してい

*8 エネルギー利用効率を向上させるための望ましい投資水準を定量的に導くためには、より精密な関数形を考える必要があるが、本稿では理論的な比較静学分析に焦点を当てるために、単純化した関数形を用いる。

る。 α の変化が、最適なエネルギー利用効率 θ^o の変化を介して、市場均衡に与える影響は以下のようになる。

$$\frac{\partial q_0}{\partial \alpha} = \frac{\partial q_0}{\partial \theta} \frac{\partial \theta^o(\alpha, \delta)}{\partial \alpha} < 0, \quad (23)$$

$$\frac{\partial q_f^*}{\partial \alpha} = \frac{\partial q_f^*}{\partial \theta} \frac{\partial \theta^o(\alpha, \delta)}{\partial \alpha} > 0, \quad (24)$$

$$\frac{\partial q_n^*}{\partial \alpha} = \frac{\partial q_n^*}{\partial \theta} \frac{\partial \theta^o(\alpha, \delta)}{\partial \alpha} < 0, \quad (25)$$

$$\frac{\partial r^*}{\partial \alpha} = \frac{\partial r^*}{\partial \theta} \frac{\partial \theta^o(\alpha, \delta)}{\partial \alpha} > 0, \quad (26)$$

$$\frac{\partial p_f^*}{\partial \alpha} = \frac{\partial p_f^*}{\partial \theta} \frac{\partial \theta^o(\alpha, \delta)}{\partial \alpha} > 0. \quad (27)$$

上式の直観的な説明は、以下のとおりである。 α が大きいほど、ネガワット取引（調整力としての節電）よりエネルギー利用効率の向上（省エネ）を優先させ、ベースライン需要を削減するのが効率的である。 α が小さい（通常の電力供給が低炭素型にシフトする）ほど、エネルギー利用効率の向上（省エネ）による需要削減より、ネガワット取引（調整力としての節電）の拡大と調整力市場での火力依存度の低下を優先させるために、エネルギー利用効率を低めに抑えるのが望ましい。

3.1.2 δ の θ^o への効果

火力発電の限界外部費用 δ が、エネルギー利用効率の最適水準 θ^o に与える影響は、社会厚生最大化の 1 階条件 $\partial SW / \partial \theta = 0$ を δ で微分して整理することで、以下のようを得られる。

$$\frac{\partial \theta^o(\delta, \alpha)}{\partial \delta} = - \frac{\partial^2 SW / \partial \theta \partial \delta}{\partial^2 SW / \partial \theta^2} \quad (28)$$

社会厚生最大化の 2 階条件より、右辺分母は負である。したがって、(28) の符号は右辺分子の符号と一致する。(28) の分子は

$$\frac{\partial^2 SW}{\partial \delta \partial \theta} = - \left(\frac{dq_f^*}{d\theta} + \alpha \frac{dq_0}{d\theta} \right) \quad (29)$$

であるため（導出過程は補論を参照のこと）、以下の命題が得られる。

命題 3

- (i) $dq_f^*/d\theta + \alpha \cdot dq_0/d\theta > 0$ なら $d\theta^o(\delta)/d\delta < 0$, $dq_f^*/d\theta + \alpha \cdot dq_0/d\theta = 0$ なら $d\theta^o(\delta)/d\delta = 0$, $dq_f^*/d\theta + \alpha \cdot dq_0/d\theta < 0$ なら $d\theta^o(\delta)/d\delta > 0$ である。
- (ii) $\alpha = 0$ のとき $d\theta^o(\delta)/d\delta < 0$ であり、火力電源の外部費用が高いほど、エネルギー利用効率の最適水準は低くなる。

エネルギー効率が向上すると、ネガワット供給の限界費用が高まるため、調整力市場において、システムオペレータは調達費用を低く抑えるために、火力電力の調達量配分を増加させる ($dq_f^*/d\theta > 0$)。一方、エネルギー効率の向上によってベースライン需要は減少するので、通常時の電力供給における火力電源の発電量は減少する ($\alpha \cdot dq_0/d\theta \leq 0$)。前者（調整力市場における

火力依存度増大)が後者(ベースライン需要低減に伴う火力発電量の減少)を上回る場合は、エネルギー効率の向上によってトータルの火力発電量が増加する。前者が後者を下回る場合は、その逆で、エネルギー効率の向上によってトータルの火力発電量が減少する。例えば再生可能エネルギーや原子力発電など低炭素型の発電技術で通常時の全電力を賄う場合($\alpha = 0$)、もしくは、通常時のほぼ全電力を低炭素型の発電技術で賄い、 α が十分小さい場合は、前者が後者を上回るケースに相当すると考えられる。この場合はエネルギー効率が向上するほど、トータルの火力発電量が増加するため、火力発電の限界外部費用(環境負荷)が大きいほど、社会的に最適なエネルギー利用効率の水準は低くなる。

エネルギー効率向上によって、調整力市場において火力依存度が増大する効果が、ベースライン需要低減に伴って火力発電量が減少する効果を上回るケースでは、火力発電の環境負荷がトータルで増大するケースが発生し得ることを、この結果は示唆している。

3.2 炭素税導入の影響

次に、炭素税が導入されていないケース($t = 0$)と、最適な炭素税が導入されているケース($t = \delta$)におけるエネルギー利用効率の最適水準を比較する。任意の炭素税の水準 $t \in [0, \delta]$ において、(19)が表す社会厚生を最大にするエネルギー利用効率の水準、

$$\theta^o(t) = \arg \max_{\theta} SW(\theta, t) \quad (30)$$

が選択されると考える。社会厚生最大化の1階条件 $\partial SW / \partial \theta = 0$ を辺々 t で微分して整理すると(28)と同様に、

$$\frac{d\theta^o(t)}{dt} = -\frac{\partial^2 SW / \partial \theta \partial t}{\partial^2 SW / \partial \theta^2} \quad (31)$$

となる。社会厚生最大化の2階条件より、 $d\theta^o(t)/dt$ の符号は(31)右辺分子の符号と一致する。(31)右辺分子は、

$$\frac{\partial^2 SW}{\partial t \partial \theta} = (t - \delta) \frac{\partial^2 q_f^*}{\partial t \partial \theta} \leq 0, \quad \text{ただし、等号成立は } t = \delta \text{ のときのみ。} \quad (32)$$

である(導出過程は補論を参照のこと)。したがって、火力電源の外部費用 δ に等しい水準に炭素税を設定する場合($t = \delta$)と、炭素税を導入しない場合($t = 0$)を比較すると、以下の命題が得られる。

命題 4

$\theta^o(\delta) < \theta^o(0)$ であり、炭素税が導入されていない場合、エネルギー利用効率の水準は過大になる。

この結果は、エネルギー利用効率向上によるベースライン需要便益の増大と、ネガワット取引量の拡大が、トレードオフの関係にあることに起因している。逆にいうと、エネルギー利用効率の向上と、調整力市場での火力発電量の増加が連動していることを表している。炭素税が導入されていない

い場合、システムオペレータは火力発電の社会的限界費用を過少に評価するため、調整力市場において火力発電の調達量配分が過大になり、ネガワットの調達量が過小になる。これは、ネガワット取引量拡大の社会的価値が過少に評価されることを意味している。エネルギー利用効率はネガワット供給の限界費用を左右する要因だが、ネガワット取引拡大の社会的価値が過少に評価されることで、エネルギー利用効率を高めてベースライン需要での消費便益を増大させることの相対的価値が過大に認識されるため、エネルギー利用効率の水準 $\theta^o(0)$ は $\theta^o(\delta)$ に比べて過大になる。最適な炭素税が導入されることで、火力発電の社会的限界費用が適正に認識されるため、ネガワット取引量を拡大するためにネガワットの供給コストを低減させることの相対的重要度が高まり、エネルギー利用効率の水準も適正水準に抑制される。すなわち、炭素税を導入することで、過大なエネルギー利用効率の水準を抑制する効果が発揮される。これは、エネルギー利用効率の向上が調整力市場では温室効果ガス排出削減に逆行する要因であることを示している。

4 まとめ

本稿では、エネルギー利用効率の水準が、ネガワット取引を含む調整力市場の費用効率性に与える影響を考慮したうえで、ベースライン需要における電力消費便益に与える効果とのトレードオフ関係を明らかにし、社会的に最適なエネルギー利用効率水準とネガワット取引量のバランスについて理論的に分析した。おもな結果は以下のとおりである。

まずはじめに、エネルギー利用効率の向上はベースライン需要における消費便益を増大させる一方、節電コストを上昇させるため、調整力市場においてネガワットから火力電力への調達量のシフトを生み出し、同時に調整力市場の費用効率性を低下させることを示した。

次に、再生可能エネルギーの普及などにより、通常の電力供給が低炭素型にシフトするほど、エネルギー利用効率の向上（省エネ）によるベースライン需要の削減が社会厚生を改善する効果は縮小し、ネガワット取引（調整力としての節電）を拡大させて調整力市場での火力依存度を低下させることの相対的な重要度が高まるため、エネルギー利用効率を低めに抑える方が効率的になることを明らかにした。ベースライン需要への電力供給において火力電力の割合が大きい場合は逆に、調整力市場におけるネガワット取引量の拡大よりベースライン需要の削減を優先させ、エネルギー利用効率を高い水準に引き上げるのが効率的となる。従来の政策議論でも目に注目されてきたのは後者のケースであり、前者のように調整力市場での火力依存度の低下、ネガワット取引量の拡大が相対的に重要になる局面では、エネルギー効率の改善が従来考えられてきたのとは逆の影響をもたらすことが明らかになった。

ベースライン需要への電力供給において火力電力の割合が十分に低い場合は、火力発電に伴う外部費用が大きいほど、エネルギー利用効率を引き下げることによって、調整力市場におけるネガワット取引量を増大させ、火力調達量を減少させる方が効率的になる。また、火力発電の外部費用に等しい最適な炭素税を導入する場合と、炭素税を導入しない場合を比較すると、炭素税を導入しない場合に選択されるエネルギー利用効率の水準が過大となることも明らかになった。この結果は、炭素税を導入することで、過大なエネルギー利用効率の水準を適正水準に抑制する効果ももたらされるこ

とを意味しており，エネルギー利用効率の向上が調整力市場の火力依存度を増大させる要因になっていることに起因している。

これまでの政策議論において，エネルギー利用効率の改善をもたらす効果は，おもに電力消費の視点から捉えられることが多かった。すなわち，エネルギー利用効率が増加することで，電力消費量の削減と，それに伴う化石燃料発電量の削減が期待でき，同時に電力消費便益を増大させることができる。しかし本稿の分析結果は，エネルギー利用効率の改善が節電コストを引き上げることによって，従来期待されてきたものとは逆の効果をもたらすことを示している。例えば，調整力市場におけるネガワット取引量の減少は調整力としての火力電力への依存度を高める。炭素税が導入されていないケースでは，火力発電の社会的限界費用が過少に認識され，したがってネガワット取引拡大の価値も過少に評価されるため，過大なエネルギー利用効率水準が選択され，最適な炭素税を導入することで，エネルギー利用効率の水準を適正水準に是正する効果が期待できる。この結果は，エネルギー利用効率の改善（省エネの推進）が温室効果ガスの排出削減と逆行する要素になっていることを意味しており，これまでの一般的な認識とは逆の結果といえる。調整力として節電（ネガワット）取引を活用することを考える場合，エネルギー利用効率の改善が電力消費の局面でもたらす影響に加えて，節電（ネガワット供給）の側面でもたらす影響を考慮することが求められる。

本稿の分析では，供給が不足するケースのみを対象として調整力市場の効率性を考察したが，実際は再生可能エネルギー大量導入に伴い，供給が過剰となるケースにおける調整力確保の問題も考える必要がある。また，調整力としての蓄電池の普及により，電力需要者は節電以外に，蓄電という選択肢も含めて，自らの利得を最大にするよう行動することが考えられ，これらの要素を含んだ分析は今後の課題である。

補論：(28) 式・(31) 式分子の導出

$$\begin{aligned} TC_0 &:= C_e(\alpha q_0 - \Delta Q_F) + \delta(\alpha q_0 - \Delta Q_F) + I(\theta) \\ TC_1 &:= AC^* + \delta q_f^* \end{aligned}$$

とおくと，社会厚生関数は以下のように書ける。

$$SW := u(s_0) - TC_0 - TC_1 \tag{33}$$

(1) $t \equiv \delta$ のケース

まずはじめに， $u(s_0)$ への効果は，

$$\frac{\partial u(s_0)}{\partial \theta} = \frac{p_e^2}{b\theta^3}, \quad \frac{\partial^2 u(s_0)}{\partial \delta \partial \theta} = 0 \tag{34}$$

である。

次に, TC_0 への効果は以下のとおりである.

$$\frac{\partial TC_0}{\partial \theta} = \{\alpha C'_e(\alpha q_0 - \Delta Q_F) + \alpha \delta\} \frac{\partial q_0}{\partial \theta} + k, \quad \frac{\partial^2 TC_0}{\partial \delta \partial \theta} = \alpha \frac{\partial q_0}{\partial \theta} \quad (35)$$

最後に, TC_1 への効果は

$$\frac{\partial TC_1}{\partial \theta} = \frac{\partial TC_1}{\partial q_n} \frac{\partial q_n^*}{\partial \theta} + b\theta q_n^{*2}, \quad \frac{\partial^2 TC_1}{\partial \delta \partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \delta} \left(\frac{\partial TC_1}{\partial q_n} \frac{\partial q_n^*}{\partial \theta} \right) + 2b\theta q_n^* \frac{\partial q_n^*}{\partial \delta} \quad (36)$$

である. ここで, システムオペレータの意思決定における費用最小化 1 階条件より, 任意の δ について $\partial TC_1 / \partial q_n = 0$ である. したがって,

$$\frac{\partial}{\partial \delta} \left(\frac{\partial TC_1}{\partial q_n} \frac{\partial q_n^*}{\partial \theta} \right) = 0$$

である. また, (11) と (14) より,

$$2b\theta q_n^* \frac{\partial q_n^*}{\partial \delta} = \frac{\partial q_f^*}{\partial \theta}$$

である. これらを (36) に代入すると以下のとおりである.

$$\frac{\partial^2 TC_1}{\partial \delta \partial \theta} = \frac{\partial q_f^*}{\partial \theta} \quad (37)$$

(34), (35), (37) より,

$$\frac{\partial^2 SW}{\partial \delta \partial \theta} = - \left(\frac{\partial q_f^*}{\partial \theta} + \alpha \frac{\partial q_0}{\partial \theta} \right)$$

である.

(2) $t \leq \delta$ のケース

まずはじめに, $u(s_0)$ への効果は,

$$\frac{\partial u(s_0)}{\partial \theta} = \frac{p_e^2}{b\theta^3}, \quad \frac{\partial^2 u(s_0)}{\partial t \partial \theta} = 0 \quad (38)$$

である.

次に, TC_0 への効果は以下のとおりである.

$$\frac{\partial TC_0}{\partial \theta} = \{\alpha C'_e(\alpha q_0 - \Delta Q_F) + \alpha \delta\} \frac{\partial q_0}{\partial \theta} + k, \quad \frac{\partial^2 TC_0}{\partial t \partial \theta} = 0 \quad (39)$$

最後に, TC_1 への効果は

$$\frac{\partial TC_1}{\partial \theta} = \frac{\partial TC_1}{\partial q_n} \frac{\partial q_n^*}{\partial \theta} + b\theta q_n^{*2}, \quad \frac{\partial^2 TC_1}{\partial t \partial \theta} = (\delta - t) \frac{\partial^2 q_f^*}{\partial t \partial \theta} \quad (40)$$

である。ここで,

$$\frac{\partial^2 q_f^*}{\partial t \partial \theta} = \frac{2b\theta}{(c_f + b\theta^2)^2} > 0$$

であるので, (38), (39), (40) より,

$$\frac{\partial^2 SW}{\partial t \partial \theta} = -(\delta - t) \frac{\partial^2 q_f^*}{\partial t \partial \theta} \leq 0, \quad \text{ただし, 等号は } t = \delta \text{ のときのみ成立.}$$

である。

参考文献

- [1] Abrardi, L., Cambibi, C., 2015. Tariff regulation with energy efficiency goals. *Energy Economics* 49, 122-131.
- [2] Chao, H., DePillis, M., 2013. Incentive effects of paying demand response in wholesale electricity markets. *Journal of Regulatory Economics* 4., 265-283.
- [3] Chu, L. Y., Sappington, D., 2013. Motivating energy suppliers to promote energy conservation. *Journal of Regulatory Economics* 43, 229-247.
- [4] Labandeira, X., Labeaga, J. M., López-Otero, X., 2017. A meta-analysis on the price elasticity of energy demand. *Energy Policy* 102, 549-568.
- [5] Wirl, F., 1995. Impacts of regulation on demand side conservation programs. *Journal of Regulatory Economics* 7, 43-62.
- [6] Wirl, F., 2015. White certificates—Energy efficiency programs under private information of consumers. *Energy Economics* 49, 507-515.