

松 山 大 学 論 集
第 29 卷 第 3 号 抜 刷
2 0 1 7 年 8 月 発 行

リバウンド効果の理論研究のサーベイ

溝 渕 健 一

リバウンド効果の理論研究のサーベイ

溝 渕 健 一

概 要

エネルギー効率の高い製品に買い替えると、エネルギーサービス価格が低下することで、買替前に比べて、その製品をたくさん使ってしまうかもしれない。そして、この行動がエネルギー消費量を増やし、買替によって予想されるエネルギー消費削減量の一部（あるいは全て）を相殺してしまう可能性がある。この現象をエネルギー経済学では、リバウンド効果と呼ぶ。本稿では、リバウンド効果の理論研究のサーベイを行い、実証研究における注意点と、今後取り組むべき課題について提示する。特に、弾力性に基づいた直接リバウンド効果の実証研究がほとんどで、間接効果や経済拡張効果、また、時間リバウンドや資本費用を考慮したものは少ない。本稿では、今後リバウンドの実証研究が取り組むべき課題に向けて、それぞれの理論的な背景を明示することを目的としている。

1. は じ め に

地球温暖化、廃棄物、大気汚染、水質汚染、土壌汚染、騒音、生物多様性、エネルギー資源など、近年、世界では様々な環境問題が起こっている。そして、その対策としての環境政策も数多く存在する。環境政策は、その実効性である「確実性」と、実施に伴う「費用（社会的費用）」によって、「直接規制」、「経済的手法」、「自主的努力」の3つに分類することができる（図1を参照）。図1で示されているように、不確実性と社会的費用はトレードオフの関係に

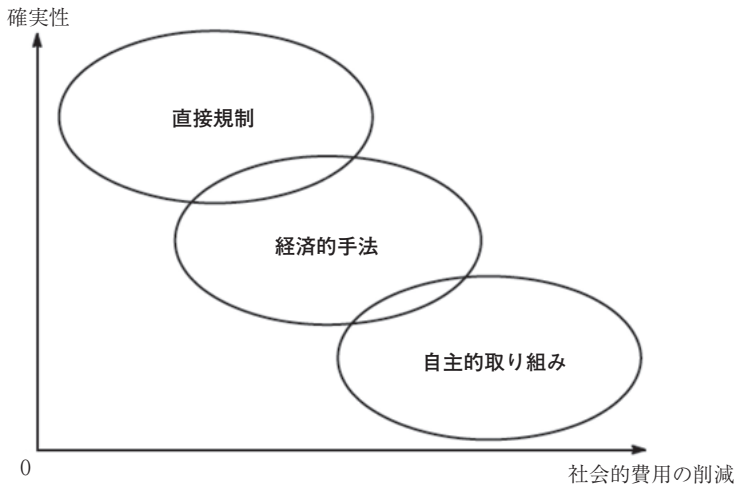


図1. 環境政策のあり方

なっており、例えば、日本で多く採用されてきた直接規制などは、不確実性は低いがその分社会的費用も高くなってしまう。しかし、多くの環境問題が存在する現代において、このような社会的費用の高い、規制的環境政策に頼りすぎず、経済的手法や自主的取り組みなども含め、社会的費用をできるだけ小さくして課題を解決する方法を検討し実行していくことが、今後の環境政策における重要な課題となってくる。

ところが、省エネルギー（以下、省エネ）政策や地球温暖化対策において、このような経済的手法や自主的取り組みを重視した環境政策を実行した場合、リバウンド効果という非常にやっかいな問題に直面することになる。リバウンド効果とは、エネルギー効率を改善させることで、新たなエネルギーサービス需要やエネルギー需要が生まれてしまい、それが予想されたエネルギー消費削減量の一部（あるいは全て）を相殺してしまう現象のことである（Khazzoom, 1980）。家計における省エネエアコン導入を例にして考えてみる。今、従来モデルよりも20%省エネのエアコンを導入したとする。もしエアコンの使用状

態（使用時間や設定温度など）が変化しなければ、省エネエアコン導入によって、電力消費量を 20%削減することができる。しかし同時に月々のエアコン使用による電気代も 20%削減されるはずである。これは、エネルギーサービス費用の低下を意味する。すると、消費者はこれまでよりもエアコンの使用時間を長くしたり、消し忘れを起こしたり、夏場であれば、設定温度を以前よりも下げたりする行動を引き起こす可能性がある。このような行動はすべて電力消費量を増加させる。よって、本来 20%削減されるはずだった電力消費量の一部が、このような追加的な需要によって相殺されてしまうのである。この相殺分がリバウンドと呼ばれる。次に、自動車を例にしてみる。自動車の燃費の改善によって、これまで走行距離を控えていた利用者が、これを契機に走行距離を増やしたりするかもしれない。また、燃費の向上による燃料費用削減を受けて、より排気量の大きな自動車を購入するようになるかもしれない。こうした反応はすべてリバウンド効果を発生させてしまい、燃費の改善効果を部分的に相殺してしまう。

エネルギー効率向上がもたらす、リバウンド効果に関する研究は、その提唱論文である Khazzoom (1980) 以降、エネルギー経済学の分野で、批判を含め、活発な議論がなされており、現在までに非常に多くの研究論文が出版されている (Lovins et al., 1988, Henly et al., 1988, Greene, 1992, Berkhout et al., 2000, Roy, 2000, Binswanger, 2001, Mizobuchi, 2008, Wang et al., 2012, Frondel et al., 2013, Chitnis et al., 2014, Chan and Gillingham, 2015, Borger et al., 2016 など)。リバウンド効果に関する包括的な議論を行っている文献として Greening (2000) や Sorrell and Dimitropoulos (2008) などがある。エネルギー効率に関する議論は、そのまま温室効果ガスなどの環境効率に関する議論につながっていく。よって、現在行われている地球温暖化問題やエネルギー問題に対する政策を適切に評価するためには、このリバウンド効果の存在を認識し、その影響の大きさを検討することが重要であると言える。

本章の構成は以下である。次節では、この節で紹介したリバウンド効果を、

経済学の理論的枠組みを用いて詳しく解説する。第3節では、リバウンド効果の定量研究につなげるための弾力性を用いた表現について解説する。そこでは、資本費用や時間費用、また、エネルギー効率の内生性など、これまであまり考慮されてこなかった課題の提起についても行う。第4節は結論である。

2. リバウンド効果の種類

リバウンド効果は一般的に次の3つに分けることができる：(1)直接効果 (direct effect), (2)間接効果 (indirect effect), (3)経済拡張効果 (economy wide effect)。

1. 直接効果 (Kahzzoom, 1980) :

エネルギー効率が向上した場合、同時に効率単位当たりエネルギーサービス¹⁾ 価格が低下し、当該のエネルギーサービス財の需要を増加させてしまう可能性がある。この当該財からのエネルギー消費量の変動のみに注目したのが直接効果である。これは消費者では代替効果と所得効果に分解できる。

2. 間接効果 (Binswanger, 2001) :

エネルギー効率向上によって、節約された実質所得が他の財やサービスの消費に費やされる可能性がある。このような他の財やサービスもその生産や消費過程でエネルギーを必要とする。間接効果とは、その他財・サービスからのエネルギー消費量の変動に注目した効果である。

3. 経済拡張効果 (Semboja, 1994) :

エネルギーサービス財の実質価格の低下は、経済を通して、中間財市場や最終財市場にも影響を与える。つまり、関連する財・サービスの価格と

1) ここでのエネルギーサービスとは、エアコンを利用したり、家電製品を利用した料理、テレビやDVDの視聴、パソコンの利用、車でのドライブなど、エネルギーを消費したサービスのことを表している。

数量調整を引き起こす。例えば、鉄鋼業における鉄の生産過程で省エネ化が起こり、鉄の生産費用が低下したとする。これによって、鉄の価格が下がり、自動車産業における鉄の要素費用が低下し、それが自動車の価格低下をもたらす。この結果、自動車の需要が増加して、これが自動車の生産増加を促す。すると生産に必要な鉄の需要が増加し、鉄鋼業ではこれまでよりも鉄の生産量が増加する。この鉄の生産増加、自動車生産量増加、自動車の需要量増加によって、各部門でエネルギー消費量がこれまでよりも増加する。これら全ての部門でのエネルギー変動に注目したのが経済拡張効果である。

この節では、リバウンド効果を経済学の枠組みでより詳しく、図や理論式を用いながら解説していく。また、簡単化のため、ここでは3つの効果のうち直接効果のみを扱うことにする。リバウンド効果は、消費者と生産者の両方で考えられる。両者のリバウンド効果は似ている部分が多いが、多少違いがある。ただし、ここでは消費者のリバウンド効果についてのみ取り扱う。

2.1. 消費者の（直接）リバウンド効果

図2-1において、 U_1 と U_2 はそれぞれエネルギーサービス S とその他の財 Z の間の無差別曲線を示している²⁾。 S_0-Z_0 は消費者の予算制約（I）を表している。もし、エネルギーサービス S の価格を P_S 、その他の財 Z の価格を P_Z とすると、予算制約は次のように表すことができるだろう。

$$P_S S_0 + P_Z Z_0 \leq I.$$

これより、最適消費はこの予算線と無差別曲線 U_1 が接する点（ $S_1; Z_1$ ）で達成され、この点で消費者の効用は最大となる。この時、 S と Z の限界代替率

2) 例えば、 S を乗用車による移動距離、 Z を外食など。

が相対価格比 ($P_s = P_z$) に等しくなる。ここで、 $E(S)$ をエネルギーサービス S の需要によって消費されるエネルギー量とする ($E(y) > E(x)$, $y > x$)。これより、初期のエネルギー消費量は $E(S_1)$ として与えられる。いま、エネルギーサービスに対して外生的な技術進歩が起こったとする。簡単化のために、技術進歩のための費用は無視する。ここで、新エネルギー技術におけるエネルギーサービス需要量 S に対応するエネルギー消費量は $E^*(S)$ ($E^*(S) < E(S)$) で表されたとする。もし、エネルギーサービスの需要量に変化しなければ、このエネルギー効率向上によって、技術者（エンジニア）が予想するエネルギー節約率（ENS）は次のように表される。

$$ENS = \frac{E(S_1) - E^*(S_1)}{E(S_1)} \times 100\%$$

しかしながら、これは効率向上によってエネルギーサービス需要 S が変化しないと仮定しているため、実際の削減量を過大に推定している可能性がある

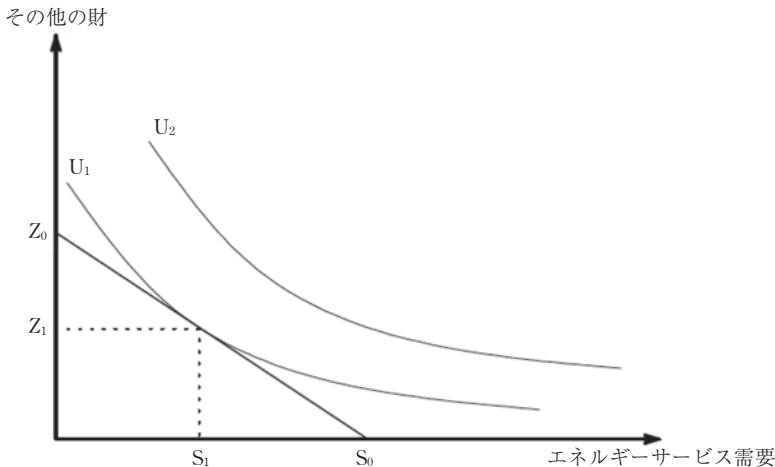


図 2-1. エネルギーサービスとその他財との代替

る。もしエネルギー価格が不変であれば、エネルギーサービス価格は効率向上によって減少するだろう ($P^*_s < P_s$)。これによって、エネルギーサービス需要も効用も増加するだろう。図 2-2 で示されているように、この時予算制約線は $Z_0 - S_0$ から $Z_0 - S^*_0$ へシフトする (名目所得は増加していないが、実質所得が増加する)。この時、最適消費点は新しい予算制約線と無差別曲線 U_2 が接する点 (S_2, Z_2) となる。エネルギーサービス消費 S は増加し ($S_2 > S_1$)、その他の財 Z の消費は減少する ($Z_2 < Z_1$)。これより、実際のエネルギー消費節約率 (ACS) は次のように表される。

$$ACS = \frac{E(S_1) - E^*(S_2)}{E(S_1)} \times 100\%.$$

ここで、 $E^*(S_2) > E^*(S_1)$ より、

$$ACS \leq ENS.$$

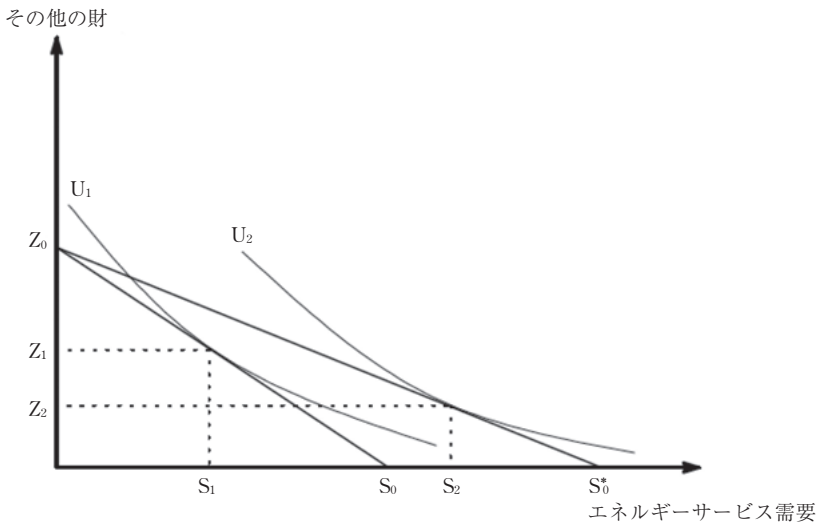


図 2-2. エネルギー効率向上による需要の変化

単位当たりエネルギー消費量が減少する ($E^*(S)/E(S) < 1$) 一方で, エネルギーサービス需要が増加するのである ($S_2 > S_1$)。ACS の大きさはこれら2つの大きさに依存するため, 符号は不確かである。つまり, エネルギー効率向上によって, エネルギー消費量は増えるかもしれないし, 減るかもしれないのである。

以上より, 個々のエネルギーサービスに対する直接リバウンド効果は次のように定義される。

$$RE_d = \frac{ENS - ACS}{ENS} \times 100\%. \quad (1)$$

ENS と ACS が等しければ, リバウンド効果はゼロとなる。一方で, ACS がゼロであれば, リバウンド効果は100%である。また, ACS がマイナスとなれば, リバウンド効果は100%以上となる。リバウンド効果が100%以上になる現象を, Saunders (1992) は, バックファイヤー効果 (back fire effect) と呼んでいる。

(1)式は次のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} RE_d &= \frac{[E(S_1) - E^*(S_1)] - [E(S_1) - E^*(S_2)]}{E(S_1) - E^*(S_1)} \times 100\% \\ &= \frac{E^*(S_2) - E^*(S_1)}{E(S_1) - E^*(S_1)} \times 100\% \end{aligned}$$

2.2. 直接リバウンド効果の分解

直接リバウンド効果の大きさの決め手になるのは, エネルギーサービス需要 S の価格 P_S に対する反応である。これは, 自己価格弾力性として次のように定義される。

$$\eta_{P_S}(S) = \frac{\partial S}{\partial P_S} \frac{P_S}{S}.$$

弾力性が高い（低い）と、価格に対する需要の変化も大きく（小さく）なる。また、弾力性は代替財の存在などによってその大きさが変わってくる。自己価格弾力性は、代替効果と所得効果に分解できる。

代替効果：

エネルギーサービスの供給価格の減少は、エネルギーサービス財とその他財との相対価格を低下させ、その他財からエネルギーサービス財への代替を引き起こす。代替効果とは、効用を一定に保つように所得が調整される時に、相対価格の変化によって消費量が変化することを表している。この時の消費の変化は、もとの無差別曲線上での変化に制約される。

所得効果：

エネルギーサービス財が効率向上によって安価になれば、消費者の購買力（実質所得）は増加する。これは無差別曲線のシフトを表す。他の財の価格や名目所得を一定とすると、所得効果は、実質所得の増加による消費の変化として表される。

この分解は理論的なもので、実際にはこれら2つの効果を足し合わせたものが観測される。図2-3の左図は代替効果を表している。相対価格の変化によって、予算制約線の傾きが変化し、エネルギーサービス消費が S_1 から S_s に増加

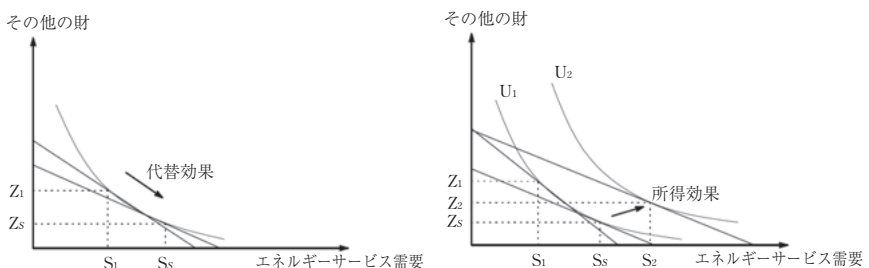


図 2-3. 代替効果と所得効果

する（ただし、これはもとの無差別曲線 U_1 上の動き）。一方で、その他財・サービス消費は、 Z_1 から Z_S に減少する。所得効果は図2-3の右図に示されている。実質所得の増加によって予算制約線が右にシフトし、エネルギーサービス消費が S_S から S_2 まで増加する。また、他の財・サービスも Z_S から Z_2 まで増加する。

代替効果はエネルギーサービス需要を常に増加させ、その大きさはその他の財との代替性に依存する。一方で、所得効果がエネルギーサービス需要を増加させるかは、財の性質に依存する。もし通常財であれば増加するが、下級財であれば減少する（例えば、バスなどは下級財であると考えられる）。

図2-4は、エネルギーサービス財が下級財のケースである。この図では、エネルギーサービス需要が所得効果によって、 S_S から S_2 に減少している。しかしながら、このケースでは代替効果を上回るほど大きくないため、総効果として、エネルギーサービスは S_1 から S_2 まで増加する。一方で、その他財は Z_1 から Z_2 まで増加する。

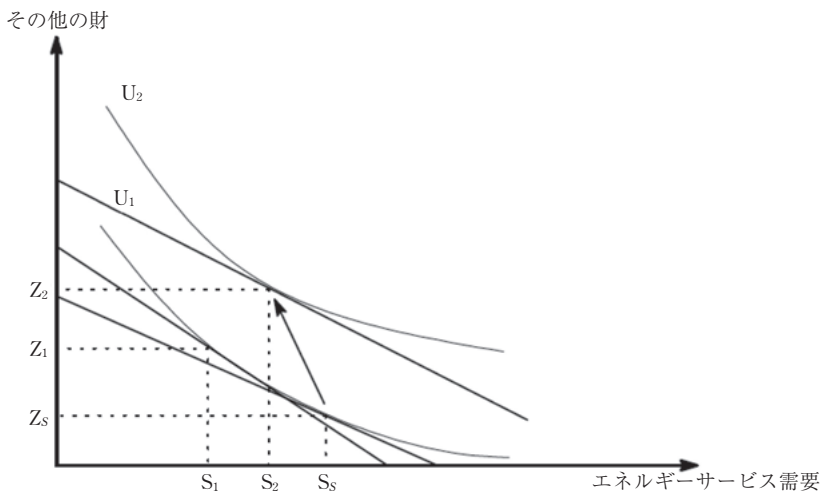


図2-4. 所得効果（下級財のケース）

理論的には負の所得効果が代替効果を上回り、総効果によってエネルギーサービス需要が減少するケースも考えうるが、現実にはそのようなケースは稀である。代替効果と所得効果への分解は、スルツキー方程式によって以下のように定式化される。

$$\eta P_s(S) = \eta^c P_s(S) - \eta_I(S) \times \frac{P_s S}{I}.$$

(総効果) = (代替効果) + (所得効果)

これは、エネルギーサービス財需要の価格弾力性が、効用を一定とした価格弾力性（補償された価格弾力性）から所得弾力性とエネルギーサービス財の所得に占めるシェアとの積を差し引いたものに等しいことを表している。

2.3. 間接リバウンド効果

前節では、エネルギーサービス S のエネルギー効率向上によって、その需要が変化したり、それに対応してその他財の需要も変化することを示した。一般的に、その他財・サービスの生産にもエネルギーが必要であるので、直接効果に加えて、このような間接効果も総エネルギー消費量を増加させる要因となる。例えば、省エネエアコン使用によって節約された電気代によって、旅行に出かけるなどである。

このような間接効果の大きさは、次のような交差弾力性によって計測できる。

$$\eta P_s(Z) = \frac{\partial Z}{\partial P_s} \frac{P_s}{Z}.$$

一般的に、もし交差弾力性が正であれば、財・サービスが代替関係にあると言われ、負であれば、補完関係にあると言われる。例えば、公共交通は乗用車の利用と代替関係にある一方で、エアコンの利用などとはそのような関係にならない。よって、前者の交差弾力性は大きく、後者は小さくなると予想される。

ここで、 $E(Z)$ をその他財・サービス消費 Z によって消費されるエネルギー量とすると、エネルギー効率向上による間接効果 (IND) は次のように表される。

$$IND = E(Z_1) - E(Z_2).$$

ここで、直接効果とは違って、間接効果の符号は、その他財・サービス需要が増加する、しないのみに依存する。以上より、直接効果と間接効果を合わせたリバウンド効果 (RE_{d+In}) は次のように表される。

$$\begin{aligned} RE_{d+In} &= \frac{[E(S_1) - E^*(S_1)] - \{[E(S_1) - E^*(S_2)] + [E(Z_1) - E(Z_2)]\}}{E(S_1) - E^*(S_1)} \times 100\% \\ &= \frac{[E^*(S_2) - E^*(S_1)] + [E(Z_2) - E(Z_1)]}{E(S_1) - E^*(S_1)} \times 100\% \end{aligned} \quad (2)$$

直接リバウンド効果のみの(1)式と比べると、(2)式では分子の $E(Z_2) - E(Z_1)$ が加わっている。もし $E(Z_2) > E(Z_1)$ であれば、効率向上による削減効果はより相殺され、リバウンド効果はさらに大きくなる。一方で、もし $E(Z_2) < E(Z_1)$ であれば、削減効果は多くなり、リバウンド効果は小さくなる。

実際、あるエネルギーサービスの効率性向上は、他の財・サービスの需要にも影響を与えると予想される。その他財・サービス需要の変化 ($E(Z_2) - E(Z_1)$) は交差弾力性によって計測できる。一方でエネルギー消費量の間接的な変化は交差弾力性とエネルギー集約度の積によって計算される。このような交差効果のリバウンド効果への影響を、個々の財で計測することは一般的に難しい。

3. リバウンド効果の理論的研究

ここでは、リバウンド効果の理論研究を紹介する。第2節において、図や数式を用いながら説明したリバウンド効果の概要を、より実証研究に使いやすい弾力性の形で紹介する。これによって、実証部分とのつながりが明確になり、

理解が容易になるものと期待される。これまでのほとんどの実証研究は3.1節で紹介する Khazzoom (1980) のリバウンドの定式化や、その派生形を用いて推定されている。これは、彼のリバウンド効果の定式化が、実証において非常に扱いやすい形をしているからである。そこで、まず Khazzoom のリバウンド効果の定義とその派生形を紹介する。その後、彼の定式化の問題点を考慮した別の理論的研究をいくつか紹介していく。ここで、3.2節に進む前に、理論研究に用いる変数の定義や、大まかな前提モデルを紹介しておく。なお、説明の簡単化のため、この節では家計を対象として議論を進める。

エネルギー需要 (E) は、暖房システム、冷蔵庫、自動車などのエネルギーサービス需要 (S) によって発生する。これらのサービスは、エネルギーと、それを使うエネルギーシステムの結合によって提供される。消費者は、これらのエネルギーサービス（エネルギー自体でなく）と、他の市場財を消費することで効用 (U) を得られると仮定する。エネルギーサービスで不可欠なのは、実用稼動 (UW) を得ることであり、これは、さまざまな熱力学的、物理的指標によって計測されるものである。これらの指標は、異なる寄与変数の関係によって、さまざまに分解される。例えば、家計が所有する車からの実用稼動は

- 走行距離で測られ、それは、車の所有台数 (NO) と、一台あたりの平均走行距離 (UTIL) に分解される。

$$UW = NO \times UTIL$$

- 乗客移動距離で測られ、それは、車の数、一台あたりの平均走行距離、一台あたりの乗客数 (LF) に分解される。

$$UW = NO \times UTIL \times LF$$

- 重量移動距離で測られ、それは、車の数、一台あたりの平均走行距離、車の平均重量 (CAP) に分解される。

$$UW = NO \times UTIL \times CAP$$

実際のこれらの指標や分解の選択は、分析の目的、集団のレベル、関連するデータの利用可能性に依存する。多くの実証研究では、実用稼動は分解していない。

Becker (1965) の“家計生産”モデルによると、家計はエネルギー (E) と資本 (K)、他の財 (O)、時間 (T) を組み合わせて、実用稼動を生産する。例えば、“移動”は、車 (K) とガソリン (E)、メンテナンス費用 (O)、運転時間 (T) の組み合わせである。同じように、“料理”もガス調理器、ガス、食材、調理時間の組み合わせによって生産される。

あるエネルギーサービスの実用稼動は、エネルギーと他の投入を与えたもとで、現在の技術から得られる最大の生産量として表される、生産関数として表現できるかもしれない。ここで、性格を与えたもとで、エネルギーサービス S_i の生産関数は次のように表される。

$$S_i = s_i [E_i, K_i, O_i, T_i]$$

もし、家計の効用が単にこれらのサービスに依存すると仮定するならば、効用関数は次のようになる。

$$U = u[S_1, S_2, S_3, \dots, S_n]$$

また、家計は次のような所得制約に従うとする。

$$V + T_W P_W \geq \sum_{i=1}^n (P_E E_i + P_O O_i + \delta_K K_i)$$

ここで、 V は非賃金所得、 P_W は賃金率、 T_W は労働時間、 P_E と P_O はそれぞれエネルギーとその他財の価格を表している。 δ_K は、資本財 K の減価償却率である（よって、 $P_K = \delta_K K(A)$ は年間の資本費用）。また、家計は次のような時間制約にも直面している。

$$T = T_W + \sum_{i=1}^n T_i$$

T_i は、 S_i を生産するのに費やす時間である。Becker (1965) はお金と時間は互いに代替可能であるとし、所得と時間の2つの制約式を以下のような1つの式にした。

$$V + P_W T \geq \sum_{i=1}^n (P_E E_i + P_O O_i + \delta_K K_i + P_W T_i) \quad (3)$$

Becker (1965) の“家計生産”モデルは、多くの実証研究のもとのモデルとして使用されている。それらにはエネルギーの研究も数多く含まれている。

3.1. Khazzoom (1980) のリバウンド効果

3.1.1. 効率弾力性としてのリバウンド効果

エネルギーシステムの効率性 (ϵ) は、

$$\epsilon = \frac{S}{E}$$

と定義できる。ここで、 E は、エネルギーサービス一単位を生産するのに必要なエネルギー量である。例えば、乗用車の燃費を 10 km/l とすると、100 キロ走るのに 10 リットルのガソリンが必要である。また、このエネルギーサービスの費用 (P_S) は、

$$P_S = \frac{P_E}{\epsilon}$$

で表される。 P_E はエネルギー価格である³⁾

3) これはエネルギーサービス総費用の一部であり、本来、他にも年間の資本費用、メンテナンス費用、時間費用なども含む必要がある。Sorrell and Dimitropoulos (2008) がこのことについて詳しい。

いま、エネルギーシステムの効率性が上昇したとする ($\Delta\epsilon > 0$)。エネルギー以外の投入費用や、エネルギーサービスに対する消費行動は変化しないとする。もし、リバウンド効果がなければ、エネルギーサービスの需要量は変化せず ($\Delta S = 0$)、エネルギー消費量はエネルギー効率向上比率分だけ減少する。

$$\frac{\Delta E}{E} = -\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon}$$

しかしながら、この効率向上は、エネルギーサービス一単位あたりの費用を低下させる ($\Delta P_S < 0$)。このエネルギーサービスが通常財で、自己価格弾力性がゼロでなければ、消費者はエネルギーサービス需要を増加させるだろう ($\Delta S > 0$)。この時のエネルギー消費量の変化率は、エネルギー効率の変化率よりも小さくなる。

$$\frac{\Delta E}{E} = \left| -\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} \right|$$

ここで、効率性が変化した時に、エネルギーサービス需要がどれほど変化するかは、以下のような弾力性の概念を用いて表現できる。

$$\eta_\epsilon(S) = \frac{\partial S}{\partial \epsilon} \frac{\epsilon}{S}$$

また、同様にして、効率性が変化したときのエネルギー需要の変化は次のように表現できる。

$$\eta_\epsilon(E) = \frac{\partial E}{\partial \epsilon} \frac{\epsilon}{E}$$

ここで、 $E = \frac{S}{\epsilon}$ より、上式は、

$$\begin{aligned}
 \eta_{\epsilon}(E) &= \frac{\partial \frac{S}{\epsilon}}{\partial \epsilon} \frac{\epsilon}{\frac{S}{\epsilon}} \\
 &= \frac{\epsilon^2}{S} \left[\frac{\epsilon \left(\frac{\partial S}{\partial \epsilon} \right) - S}{\epsilon^2} \right] \\
 &= \frac{\partial S}{\partial \epsilon} \frac{\epsilon}{S} - 1
 \end{aligned}$$

となるので、簡単にすると、

$$\eta_{\epsilon}(E) = \eta_{\epsilon}(S) - 1 \quad (4)$$

が成立する。

通常、この $\eta_{\epsilon}(S)$ が、リバウンド効果を計測するために用いられている (Berkhout et al., 2000)。技術者が予測するエネルギー消費の削減量が、実際の削減量と一致するのは、この弾力性がゼロとなる時のみである ($\eta_{\epsilon}(S) = 0$)。つまり、この時、エネルギーの効率弾力性はマイナス 1 となる ($\eta_{\epsilon}(E) = -1$)。

正のリバウンド効果は

$$\eta_{\epsilon}(S) > 0, \quad |\eta_{\epsilon}(E)| < 1$$

が成り立つ時に起こっている。もし、エネルギーサービス需要が非弾力的 ($0 < \eta_{\epsilon}(S) < 1$) であれば、エネルギー効率の改善は、エネルギー消費量を削減できる ($0 > \eta_{\epsilon}(E) > -1$)。しかし、もし弾力的 ($\eta_{\epsilon}(S) > 1$) であれば、エネルギー効率の改善は、エネルギー消費量を増加させてしまう結果となる。このような現象は、バックファイアー効果と呼ばれるものである (Saunders, 1992)。

エネルギー効率の向上は、エネルギー機器数 (NO) や、平均容量 (CAP)、平均使用量 (UTIL) などを増加させてしまう可能性がある。例えば、一つの家計がいくつも車を持ったり、排気量が大きい車を選んだり、走行距離を増やしたり、同乗を避けて一人一人が、一台の車に乗ったりする行動。もし、エネ

ルギーサービスがこれらの要因に依存していた場合、(4)式は、以下のように書き直される。

$$\eta_{\epsilon}(E) = [\eta_{\epsilon}(NO) + \eta_{\epsilon}(CAP) + \eta_{\epsilon}(UTIL)] - 1$$

これらの変数の重要性は、エネルギーサービスの種類や時間の経過によって変化する。例えば、冷蔵庫の効率向上によって、年間の使用時間などは変化しないが、数や容量は時間とともに増加するかもしれない。

車による移動のリバウンド効果の実証研究では、そのほとんどがエネルギーサービスを走行距離で捉え、それを車の数と平均移動距離（一台当たり）に分解している。しかしながら、これらの研究は、(i)効率改善による平均車重の増加や、(ii)乗車率の減少などを見逃してしまっている。

エネルギーサービス消費の限界効用は、需要の増加とともに逡減しそうである。これは同時にリバウンド効果も小さくするだろう。このような現象は、飽和（satiation）の議論に関連する。例えば、家計の暖房システムのリバウンド効果は、室内温度が一定温度を超えると急速に低下するかもしれない。これが意味することとして、リバウンド効果は所得の低い層では高くなると考えられる。なぜなら、彼らは所得の制約のために、本来満足する消費水準よりもずっと低い消費をしているからである。これより、彼らのエネルギーサービス消費の飽和点までの距離が、所得の高い層の人々に比べて相対的に長いと予想される。

3.1.2. 価格弾力性としてのリバウンド効果

前節で紹介した(4)式は、エネルギー効率性 ϵ のデータが入手しづらいこともあり、実証研究では別の定義が用いられることが多い。この節では、多くの研究で用いられている2つのリバウンド効果の定義を紹介する。

$P_S = P_E/\epsilon$ より、エネルギー価格 P_E 一定のもとでのエネルギー効率 ϵ の上昇効果は、エネルギー効率性 ϵ 一定のもとでのエネルギー価格 P_E の上昇効果と

一致する（つまり P_s に与える影響は同じ）。もし、他の投入要素を一定とすると、エネルギー需要は次のように、エネルギー価格と効率性のみで表現できる。

$$E = s \left(\frac{P_E}{\epsilon} \right) / \epsilon$$

もし、エネルギー価格を外生とするならば（つまり、 $\partial P_E / \partial \epsilon = 0$ ）、上の式を効率性 ϵ で微分すると、次のような別のリバウンド効果の定義が得られる。

$$\eta_\epsilon(E) = -\eta_{P_s}(S) - 1 \quad (5)$$

つまり、エネルギーの効率弾力性は、エネルギーサービスの価格弾力性に、マイナス1を加えたものに等しくなる。これより、エネルギーサービスの価格弾力性 $\eta_{P_s}(S)$ は、エネルギーサービスの効率弾力性 $\eta_\epsilon(S)$ の代理として用いることができるのである。これは、リバウンド効果の主要な定義である。例として、車での移動（S）のキロ当たりのエネルギー費用（ P_s ）弾力性が-0.1だとする。すると、ガソリン需要のエネルギー効率弾力性は、(5)より-0.9と推定される。これはつまり、エネルギー効率が10%改善しても、実際に減るガソリン需要は9%にとどまることを意味する。言い換えれば、10%の潜在的なガソリン消費量の削減は、車の利用の増加によって、一部が相殺されてしまうのである。

この表記法は、Greene et al. (1999), Berkhout et al. (2000), Binswanger (2001) などで用いられており、前述したように、データの得やすさから実証研究では、(4)式よりもこちらの方が用いられることが多い。

多くのエネルギーサービスにおいて、エネルギー財価格の時間的・横断的変動は、エネルギーシステムの効率におけるそれよりもかなり大きい。よって、エネルギー価格上昇時と、エネルギー効率減少時の消費者の反応が同じと仮定すると、(5)式は利用可能なデータがエネルギー効率の変化を持たない状況において、エネルギー効率向上におけるリバウンド効果の潜在的な大きさを推定で

きることを意味している。

ただし、(5)式に基づいた実証研究は、エネルギーサービス (S) と、その費用 (P_s) を正確に計測することが求められる。後者は、エネルギー価格と効率性に依存している。しかしながら、どのように定義するかにも依存するが、多くのエネルギーサービスの計測には問題がある。例えば、家計の暖房システムによるエネルギーサービスは、室内温度で定義されるが、実際のデータは、室外温度計で直接に、あるいは温度自動設定装置によって間接的に測られたものを用いている。このような測定では、居住者の温度に対する快適性を表す代理変数としては不正確である。また、このような快適性は、湿度や気流のような他の変数にも依存しているのでさらに注意が必要である。アメリカにおいて、乗用車を対象としたリバウンド効果の研究が広く行われているのは、エネルギーサービスとしての移動距離の質の良いデータが利用可能だからである。また、キロ当たりの燃料費用は、ガソリン価格や効率性によって簡単に推定することができることも理由の1つである (Greene, 1992)。

ここで、エネルギーサービス (S) の指標データよりも、エネルギーデータ (E) の方が一般的に利用しやすい (データを入手しやすい)。

もし、エネルギー効率を外生とすれば、 $P_s = P_E = \varepsilon$ より、エネルギー需要の自己価格弾力性に基づいた、リバウンド効果の別の定義を導くことができる。

$$\eta_\varepsilon(E) = -\eta_{P_E}(E) - 1 \quad (6)$$

この定義は Khazzoom (1980) によって提案されている。(6)式は、特定の仮定 (エネルギー効率性が外生的) のもとで、リバウンド効果が、エネルギー需要の自己価格弾力性によって近似されることを示している。この定義は、単一のエネルギーサービス財 (例えば、冷蔵庫など) に適応する場合に意味を持つ。しかし実際は、エネルギー需要は、エネルギーサービスの集合 (例えば、家計の電力使用量) として測られる。Haas et al. (1998) では、個々のエネルギーサービス需要の比率を推定している。この粗い近似にしたがって、多くの著者

は、エネルギー需要の自己価格弾力性をリバウンド効果の大きさの近似として用いている（Berkhout et al., 2000；Zein-Elabdin, 1997；Roy, 2000；Bentzen, 2004）。この問題は、Espey（1998）やDahl and Sterner（1991）などで検討されている。

ほとんどの実証研究では、エネルギー需要は非弾力的で、長期では約 -0.3 から -0.4 ぐらいであるとされている。つまり(6)式の定義によれば、エネルギー効率向上による削減量のうち、約 $30-40\%$ は、リバウンド効果によって相殺されてしまうことを意味している。しかしながら、弾力性の値は、エネルギー財、消費者、部門、国や地域の違いによって大きく変化する。Berkhout（2000）では、価格水準の増加によって、短期よりも長期の方が弾力性が大きくなることを示している。

また、弾力性が価格の上昇期には（下降期に比べて）高くなりやすいことが指摘されている。この現象の説明として、Walker and Wirl（1993）では、効率性投資の不可逆性を理由として挙げている。エネルギー価格が上昇すると、消費者や生産者は、より効率性の高い機器（例えば断熱材など）を導入しようとする。そしていったん投資してしまうと、エネルギー価格が下降したあとも取り外すことはしない（Dargay, 1992）。結果として、時系列データを用いた場合、リバウンド効果の推定は、エネルギー価格の上昇期や下降期によって、大きく変化してしまうのである（Haas and Schipper, 1995）。つまり、例えば価格上昇期のデータを用いた推定量は、リバウンド効果の大きさを過大に推定してしまう傾向がある。

これまで、多くのリバウンド効果の推定は、(5)式や(6)式に基づいて行われてきた。これらは、理論的な導出の際の仮定などを注意深く検討しないと、推定の際に偏りを持った結果を導き出してしまう可能性がある。

本節で紹介したリバウンド効果は、外生性の仮定の現実性や、その他考慮されていない要素（資本費用、時間費用）などにより、理論的に批判されている部分が多い。よって残りの節では、このような問題点について詳しく検証し、

それらを考慮したリバウンド効果の定義を紹介する。

3.2. 資本費用を考慮したリバウンド効果

個々のエネルギーサービス財において、エネルギー価格が変化したからといって、他の投入要素の変化やエネルギーサービスの消費態度が変化することはあまり考えられない。しかしながら、エネルギー効率の変化の場合、そうなるとは言えないかもしれない。実際、エネルギー効率的な機器は、そうでない機器と比較して、置き換えに必要な資本費用が高くなるだろう（つまり、 ϵ と K は正の相関がある）。例えば、同じ冷房能力 2.5 kW（7 畳～10 畳）のシャープと三菱のエアコンの例にする。前者は後者に比べて 20% エネルギー効率が上がるが、値段はそれぞれ 18 万 8,000 円と 9 万 4,800 円であり、2 倍ほど値段に差がある。エネルギー効率の高い商品は値段も高いという状況は、冷蔵庫やテレビ、照明などいろいろな製品で見られる（ECCJ, 2003）。

前節で紹介した Khazzoom のリバウンド式やその派生形は、全てこのような資本費用を考慮出来ていない。Khazzoom (1980) では、より効率的な機器に、大きな初期費用は必要ではないと主張して議論を避けた。ただし彼の説明の際、小さくて、燃費の良い、値段の低い車を例に挙げていた⁴⁾。Khazzoom (1980) による資本コストの見過ごしは、何人かの研究者によって指摘されている（Einhorn, 1982; Besen and Johnson, 1982; Lovins et al., 1988; Henly et al., 1988）。彼らは、(5)式や(6)式に基づいて推定を行うと、リバウンド効果を過大推定してしまうと主張している。Henly et al. (1988) は、年間資本費用 (P_K)

4) 一般的に、エネルギー消費削減は、エネルギー効率向上による技術進歩のほかに、エネルギーと他の要素との代替、エネルギーサービスと使用状態との代替の結果などでも起こり得ると考えられる。実際、多くのエネルギーサービスには、使用態度・使用状態（大きさ、快適性、信頼性、スピードなど）があり、それぞれがエネルギー価格に対して、ゼロでない弾力性を持っているだろう。乗用車を例にすると、ガソリン価格の上昇は、アイドリングストップ、急発進・急停止の防止などのエコドライブを促進するかもしれない。Einhorn (1982) は、エネルギー費用低下の長期の反応は、このようなエネルギーサービスとその使用状態とのトレードオフの関係にあると主張している。

をエネルギー需要方程式に入れることで、この問題を明らかにした。資本費用をエネルギー効率性の関数とすると、エネルギー需要は

$$E = s \left[\frac{P_E}{\epsilon}, P_K(\epsilon) \right] / \epsilon$$

と定式化されるので、これより、次のような、エネルギー需要の効率弾力性のもう一つの定義が導かれる。

$$\eta_\epsilon(E) = -\eta_{P_S}(S) + [\eta_{P_K}(S) \times \eta_\epsilon(P_K)] - 1 \quad (7)$$

(5)式や(6)式と比較すると、括弧内の項が新たに加わっていることが分かる。これは、エネルギーサービス需要の資本費用弾力性 ($\eta_{P_K}(S)$) と、資本費用の効率性弾力性 ($\eta_\epsilon(P_K)$) との積である。

1. エネルギーサービス需要の資本費用弾力性 ($\eta_{P_K}(S)$) :

負になると予想される。資本費用が高いと、エネルギーサービスの需要は減少する。おおまかな理由として、エネルギー機器の数を減らしたり ($\eta_{P_K}(NO) \leq 0$)、それらの平均容量を減らしたりする ($\eta_{P_K}(CAP) \leq 0$)⁵⁾

2. 資本費用の効率性弾力性 ($\eta_\epsilon(P_K)$) :

(エネルギー効率的な機器は高価であるという仮定のもとで) 正になると予想される。

これらの積は負となり、エネルギー需要の効率性弾力性 ($\eta_\epsilon(E)$) の絶対値を小さくする。これより、もしエネルギー効率的な機器が高価であれば、(5)式や(6)式に基づいたリバウンド効果は、その大きさを過大に推定してしまう危険性がある。このようなリバウンド効果の上方バイアスの大きさは、3つの弾力

5) 資本費用が容量の大きさに比例するという仮定が必要。

性の相対的な大きさに依存して決まる⁶⁾

このようなエネルギー効率と資本費用との相関は、エネルギーサービスの種類や時間の経過によって変化すると予想されるだろう。例えば、エネルギー効率の向上は、長期的に見ると、サービスの受け方や、資本費用の低下にも関連するからである (Triplett, 1989; Chow, 1967)。もし、消費者が購入の際の費用に直面していたら、高い資本費用はリバウンド効果を低める。反対に、もし効率的な機器の追加的費用が、すべて補助金によってまかなわれるならば、高額な初期投資は、機器の購入決定に影響を与えない。さらに、もし政府がエネルギー効率的な機器を、非効率的な機器よりも安く購入できるようにすれば、リバウンド効果はさらに大きくなる⁷⁾ この事実をサポートする実証研究として、Roy (2000) がある。

資本費用を考慮する場合、エネルギー機器の数や容量の決定も、リバウンド効果の推定に重要になってくる。エネルギー効率的な機器が、非効率的な機器よりもより高価であった場合、追加的な消費者効用の流列の現在価値が、追加的な資本費用の現在価値よりも大きい場合に限り、それを購入する。ここで、いったん省エネ機器を購入すると、資本費用は埋没し、機器の使用量とは無関係になるかもしれない。しかしながら、資本費用が高くなると、異なる投入費用間や、エネルギーサービスとその使用状態間のトレードオフによって、省エネ機器の購入量を減らしたり、容量を小さくしたりする行動が起こるだろう。

エネルギー効率の向上は、操作費用やメンテナンス費用にも関連してくるだろう。例えば、より効率的な機器は、信頼性も低く、メンテナンス費用も高くなるはずである。そうすると、リバウンド効果も小さくなるだろう。しかしな

6) Henly et al. (1988) は、エネルギー効率規制は、低所得者には反比例の影響を与えることを示している。つまり、このような規制が課せられると、彼らはより安価で効率の悪い製品を購入するのである。そのような家計は、使用費用よりも、資本費用に対してより敏感なのである。

7) $\eta_{P_K}(S)$ と $\eta_e(P_K)$ はともに負となり、それらの積が正となる。

がら、このような効率性と操作費用・メンテナンス費用が正の相関を持つという研究はない。一般的に、(5)式や(6)式に基づいたリバウンド効果の大きさや、バイアスの方向は、エネルギー効率性とその他の投入量との、相関の大きさや符号に依存するのである。例えば、もしそれらとの間に正の相関があれば、(5)式や(6)式に基づいた推定では、正のバイアスを持ち、結果として、リバウンド効果は過大推定となる。一方で、もし負の相関があれば、負のバイアスを持ち、リバウンド効果は過小推定となる。

たとえエネルギー効率向上が他の投入費用の変化に関係していなくても、ある種のリバウンド効果は、エネルギーサービス需要が増えることに対する機会費用によって制約を受けるだろう。2つの重要な例として、(i)空間の機会費用（冷蔵庫の容量が大きくなるとそれを設置するスペースが必要）と(ii)時間の機会費用（車の移動距離が増えるとそれによって失う時間が発生する）がある。どちらも、家計のエネルギーサービスの需要の物理的制約である。しかしながら、前者の“空間の機会費用”はそれほど重要ではない。なぜなら、技術の進歩が、機器をよりコンパクトにするかもしれないし（パソコンの小型化など）、また所得の増加によって、より広い居住空間が得られるかもしれない（Wilson and Boehland (2005) では、アメリカとイギリスで冷蔵庫の容量を比較している）。逆に、技術進歩がエネルギーサービス一単位あたりの必要時間を減らすかもしれないのに対して、時間の機会費用は、所得の増加と共に増加していくだろう。エネルギーサービス消費と時間制約の関係は特に重要である。

3.3. エネルギー効率の内生性を考慮したリバウンド効果

前節までのリバウンド効果の定義式(4)–(7)はエネルギー効率性を外生的と仮定して導かれたものである。しかしながら、このような仮定は現実的なのだろうか。外生性を仮定するよりも、エネルギー効率性は現在や過去のエネルギー価格に影響を受けていると考える方がより現実的ではないだろうか ($\epsilon(P_E)$)。

もしこのように考えると、エネルギー需要は次のように表される。

$$E = \frac{s[P_E/\epsilon(P_E)]}{\epsilon(P_E)}$$

これをエネルギー価格 (P_E) で微分し、(5)式の定義に代入すると、次のようなエネルギー効率性を内生化したリバウンド効果の定義が得られる。

$$\eta_\epsilon(E) = - \left[\frac{\eta_{P_E}(E) + \eta_{P_E}(\epsilon)}{1 - \eta_{P_E}(\epsilon)} \right] - 1 \quad (8)$$

この類似の表現は、Blair et al. (1984), Mayo and Mathis (1988), Small and Dender (2006) などで用いられている。(8)式は、エネルギー需要の価格弾力性 ($\eta_{P_E}(E)$) とエネルギー効率のエネルギー価格弾力性 ($\eta_{P_E}(\epsilon)$) を別々に推定することでリバウンド効果の大きさを得る。

Small and Dender (2006) は、エネルギー効率性がエネルギー価格のみでなく、他の内生変数や外生変数の関数となり、実証研究の結果にバイアスをもたらしていると指摘している。特に、エネルギー効率性がエネルギーサービス需要の関数になっている可能性が高いと指摘している。乗用車を例にすると、運転手がより遠くに旅行する場合、彼らはより燃費の良い車を選択・購入すると考えられる。これは S と ϵ の正の相関を表し、実証研究でこの問題を考慮しない場合、推定値がバイアスを持ってしまう。Small and Dender (2006) はさらに、 S と ϵ が相関を持つ場合、(5)式のロジックは循環してしまうことを指摘している。つまり、エネルギーサービス S はエネルギーサービス費用 (P_S) に依存し、さらに (P_S) はエネルギー効率性 ϵ に依存する。そして ϵ はエネルギーサービス S に依存する。

このような内生性の問題がある場合、同時方程式モデルを用いて、内生変数を同時決定する必要がある。Small and Dender (2006) では、(i)車の数、(ii)年間総走行距離、(iii)燃費を内生変数として同時方程式モデルによって推定を行っている。Small and Dender (2006) は、次のような消費者の一般的な仮定に基づいたモデルによって推定を行った。

1. エネルギーサービス (S) は, 車の数 (NO), エネルギーサービス費用 (P_S) とその他の外生変数 (X_S) に依存する。
2. 車の数 (NO) は, 車体価格 (P_K), エネルギーサービス需要 (S), エネルギーサービス費用 (P_S) とその他の外生変数 (X_N) に依存する。
3. エネルギー効率性 (ϵ) は, エネルギー価格 (P_E), エネルギーサービス需要 (S), 新しい省エネ製品への規制水準 (R_K) とその他の外生変数 (X_ϵ) に依存する。

これより, 次のような構造方程式を導くことができる。

$$\begin{aligned} S &= s\left(NO, \frac{P_E}{\epsilon}, X_S\right), \\ NO &= no\left(P_K, S, \frac{P_E}{\epsilon}, X_N\right), \\ \epsilon &= \epsilon(P_E, S, R_K, X_\epsilon). \end{aligned}$$

内生性がある場合, 2段階最小自乗法 (以下, 2SLS) のような適切な推定法を用いなければならない。また, もし内生性を無視して個々の方程式を別々に最小自乗法 (以下, OLS) で推定してしまうと, 推定値はバイアスを持ち, 一致性も失うことになる。Small and Dender (2006) は, OLS を用いて推定したところ, 短期と長期のリバウンド効果を, それぞれ 53%, 88% 過大推定するという結果を得た。

同時方程式モデルを用いると, エネルギー効率性が環境規制やエネルギー価格上昇, その他の要因によって決まることを明確にモデル上で示すことができる。新しい乗用車への排ガス規制などは, 機器のエネルギー効率に影響を与えるだろう (モデルの第 3 式)。一方で, エネルギー効率向上はエネルギーサービス需要 (機器の使用頻度など) を高めたりするかもしれない。さらに, この需要増加が再度エネルギー効率向上に影響を与えるかもしれない。つまり, 環

境規制などの要因が起点となり、複雑な過程を経て新たな均衡にたどり着くのである。このように、変数の内生性を考慮した場合、エネルギー消費需要の変化は、外生的と仮定した場合よりも大きくなるだろう。

構造方程式は、それぞれの内生変数について解くことで誘導系が導出できる。ただし、実証研究では構造系と誘導系両方ともあまり用いられない。Small and Dender (2006) では、エネルギーサービス S に関して、“部分的誘導系”を用いている。これはエネルギー効率性を間接的に含んだもので、以下のように表される。

$$S = s^*(P_K, P_E/\epsilon, X_N, X_S)$$

エネルギー効率性は内生変数なので、これを OLS で推定するとバイアスが発生する。さらに、もし資本費用 (P_K) や他の要素が S や ϵ と関連していればこのバイアスはさらに複雑になる。

3.4. 時間費用を考慮したリバウンド効果

(3)式によって表されている“家計生産モデル”は、時間の経済学に関する Becker の研究に基づいている。Binswanger (2001) によると、時間の費用や効率性は、エネルギーの使用や、特にリバウンド効果に関して重要な意味を持っている。ところが、この点を考慮した実証研究は、ほとんど行われていないのが現状である (Jalas, 2002)。

消費者にとって、時間は生産やエネルギーサービスを享受するために必要である。例えば、ある場所から別の場所へ移動したり、食品を買ったり、夕食を用意したり、洗濯をしたり、アイロンをかけたりなど、特定のエネルギーサービスの時間の総費用は、時間の機会費用や、エネルギーサービス一単位に必要な時間に依存する。“家計生産モデル”では、時間の費用は従来一時間あたりの賃金 (P_W) によって測られる。そのため、家計によってその大きさは異なる。また、エネルギーサービス一単位に必要な時間は、時間使用の効率性 (μ)

によって測られる。 μ は技術によって異なる。例えば、電子レンジは通常のオープンより短時間で調理できる、乗用車は自転車よりも、航空機は船よりも時間効率的である。これより、エネルギーサービスと時間の消費量の関係は次のように表される。

$$S = \theta T.$$

また、エネルギーサービス一単位あたりの時間費用は次のように表される。

$$P_T = \frac{P_W}{\theta}$$

これらの表現は、エネルギーサービスにおけるエネルギー消費量モデルとほとんど同じである ($S = \epsilon E$ や $P_S = P_E / \epsilon$)。

これらの前提のもとで、時間費用のエネルギーサービス総費用への影響は、時間効率性と反比例、賃金率と正比例となるべきである⁸⁾。よって消費者は、あるエネルギーサービスを享受するために、エネルギー効率性と時間効率性の異なる組み合わせを持った技術を選ぶ必要がある。時間とエネルギーの相対価格の上昇は、個々のエネルギーサービスの時間（エネルギー）効率性を高める（低める）ための技術革新の方向性に影響を与える。

この時、時間費用（賃金）がエネルギー価格よりも相対的に高くなれば、個々のサービスを生産する要素において、時間からエネルギーへの代替が起こる。言い換えると、時間集約的なサービスから、エネルギー集約的なサービスへの代替が起こるのである。過去 2, 30 年の途上国を見てみると、賃金の成長がエネルギーの成長を上回っているので、この現象は最近の特徴的な傾向であると言えるだろう (Binswanger, 2001)。多くのエネルギーサービスで、総費用に占める時間費用の増加が起こっており、これにあわせて消費者や生産者は、エネ

8) 同様に考えると、エネルギー費用は、効率性と反比例し、エネルギー価格と正比例する。

ルギー効率性より時間効率性を高めることを考えはじめた。例えば、(i)徒歩や自転車、公共交通から自動車へ、(ii)手洗いかから全自動洗濯機、(iii)従来のレストランから、ファーストフード店へ、(iv)スーパーマーケットからインターネットショッピング、手紙から E-mail などが例として挙げられる。近年の総エネルギー消費量の増加は、(経済成長によって)所得が増加し、それによって時間短縮技術へのエネルギー投入量が増加したことによって起こっているとも考えられる。

時間費用とエネルギー費用の関係は、エネルギーサービスの種類や時間の経過によって変化する。時間費用が特に重要で、交通の分野において広く研究されている。例えば、Small (1992) によると、アメリカの車輸送の平均時間費用は、総ランニング費用の3倍、総燃料費用の6倍であるという結果を示している。もし時間の価値が平均賃金に比例するならば、この傾向は、所得の高い層でより高くなるだろうし、時間と共に(経済発展と共に)増加するだろう。

一方で、家計の暖房システムなどでは、時間費用は需要の決定には影響を与えないだろう。しかしながら、この暖房サービスの時間費用は、石炭などが標準の時代には非常に大きかったと予想される。なぜなら、燃料の準備や点火などにも時間を要するからである。多くの発展途上国では、薪を集め続けるのは大きな負担である。

エネルギーと時間の関係は、エネルギー効率性の関数として時間効率性が表されるか ($\theta(\epsilon)$)、反対に時間効率性の関数としてエネルギー効率性が表されるか ($\epsilon(\theta)$) のどちらかであると考えられる。これを用いて、特定のエネルギーサービスの需要関数を書いてみると、

$$E = \frac{s[P_s(\epsilon), P_T(\theta(\epsilon))]}{\epsilon}$$

となる。これを用いると、時間費用を考慮したリバウンド効果は次のように定式化される。

$$\eta_{\epsilon}(E) = -\eta_{P_S}(S) + [\eta_{P_T}(S) \times \eta_{\theta}(P_T) \times \eta_{\epsilon}(\theta)] - 1 \quad (9)$$

(5)式や(6)式のリバウンド効果と比較すると、括弧内の項が加わっている。それぞれ次のようになっている。

1. エネルギーサービス需要の時間費用弾力性 ($\eta_{P_T}(S)$):

符号はマイナスと予想される。時間費用が高くなると、それだけ需要は減少する。

2. 時間費用の時間効率性弾力性 ($\eta_{\theta}(P_T)$):

符号はマイナスと予想される。時間効率性が高くなると、それだけ時間費用も減少する。

3. 時間費用効率性のエネルギー効率性弾力性 ($\eta_{\epsilon}(\theta)$):

符号は予想できない。エネルギーと時間には代替関係がある一方、技術の進歩は時には両方の効率性を改善する（例えば、電子レンジ）。

しかしながら、一般的には、高いエネルギー（時間）効率性は、低い時間（エネルギー）効率性によって達成される（つまり、 μ と ϵ は負の相関がある）。例えば、スポーツカーは乗用車と比べてエネルギー非効率的であるし、飛行機は船よりエネルギー効率性は悪いなどである。このような結果より、時間費用の増加は、エネルギー費用節約分を相殺し、それによって、リバウンド効果を低める結果となる。つまり、(5)式や(6)式のように、時間費用を考慮しないと、リバウンド効果を過大に推定してしまう危険性がある。

資本費用と同様、この上方バイアスは、異なる弾力性の大きさに依存して決まる。1つの重要な意味合いとして、エネルギー効率向上によるリバウンド効果は、時間とともに減少していくと考えられる。なぜなら、経済成長によって賃金率が上昇し、それによってエネルギーサービスに占める時間費用の相対的大きさが増加するからである。Small and Van Dender (2006) は、この事実を実証している。もし、エネルギー効率向上が、時間と資本の両方の費用に依存

していれば、リバウンド効果は次のように近似できる。

$$\eta_{\epsilon}(E) = -\eta_{P_S}(S) + [\eta_{P_K}(S)\eta_{\epsilon}(P_K)] + [\eta_{P_T}(S)\eta_{\theta}(P_T)\eta_{\epsilon}(\theta)] - 1 \quad (10)$$

Binswanger (2001) で指摘されているように、時間に関してもリバウンド効果は発生する。時間効率性が向上すると、あるサービスの時間費用が低下し、それによってそのサービスの需要が増加する。これによって、本来時間効率性の向上による、時間節約分の一部が、そのような追加的な需要の増加によって相殺されてしまう。例えば、より速い乗り物によって節約される時間を使って観光をしたり、あるいはより遠くへ移動しようとする行動によって相殺されてしまう可能性がある（これは他のサービスにも適用可能である。例えば洗濯機など）。

時間に関するリバウンド効果は、効率性弾力性型

$$\eta_{\theta}(T) = \eta_{\theta}(S) - 1$$

あるいは、価格弾力性型

$$\eta_{\theta}(T) = \eta_{P_T}(S) - 1$$

で表現される。また、実証研究においても、通常のエネルギー効率向上のリバウンド効果同様、時間効率性と他の投入費用（資本やエネルギー費用）との相関や、時間効率性の内生性を考慮する必要がある。しかしながら、時間を扱うデータが整備されていないため（時間の使い方や、時間効率性など）、この分野の実証はまだ不十分である。

(i) エネルギーサービスの生産や消費におけるエネルギーから時間への代替や、(ii) 時間に関するリバウンド効果は、全体的なエネルギー消費量を増加させるだろう。実際、これらのプロセスは、通常のエネルギー効率向上によって起こるリバウンド効果よりも総エネルギー消費量に対する重要性は大きいと予想される。また、もし賃金がエネルギー価格よりも速く上昇すれば、上の2つの

効果はより重要になり、通常のリバウンド効果の重要性は減少するだろう。しかしながら、これまでの政策的、分析的な注意は、通常のリバウンド効果に偏り過ぎていたように思われる（Sorrell and Dimitropoulos, 2008）。

4. 終 わ り に

本稿では、エネルギー効率改善によるリバウンド効果の理論研究のサーベイを行った。リバウンド効果を最初に提唱した Khazzoom（1980）以降、エネルギー経済の部門において、リバウンド効果の理論研究と定量研究が進んだ。しかし実証研究の多くが、直接リバウンド効果であり、間接リバウンド効果や経済拡張効果まで検証したものは少ない。また、定量研究における直接リバウンド効果のほとんどが、一定の仮定のもとで成立する弾力性に基づいたもので、仮定が満たされない場合、弾力性の推定にはバイアスが発生することが指摘されている。本稿では、実証研究を行うに当たって、利用可能なデータから弾力性に基づいて推定した場合、どのようなことに注意を払うべきかを明らかにするために、リバウンドの理論研究をまとめた。

その際、エネルギー効率の高い機器を導入する際の資本費用を考慮しないと、リバウンド効果を過大に推定してしまうこと。また、エネルギー効率性を外生と仮定していた従来の弾力性に基づいた方法と、内生性を考慮した推定では、前者がバイアスを持つ可能性が高いことなどを明らかにした。また、ほとんど定量研究の蓄積がない、時間リバウンド効果について、理論モデルから、弾力性の形で表現した。

謝 辞

本研究は、2015 年度「松山大学特別研究助成」から補助を受けて実施したものである。

参 考 文 献

1. Bentzen J. (2004) Estimating the rebound effect in US manufacturing energy consumption. *Energy Economics* 26 ; 123-134.
2. Berkhout PHG, Muskens JC, and Velthuisen JW. (2000) Defining the rebound effect. *Energy Policy* 28 ; 425-432.
3. Besen S. M. and Johnson L. L. (1982) Comment on economic implications of mandated efficiency standards for households appliances. *Energy Journal* 3(1), 110-116.
4. Binswanger M. (2001) Technological progress and sustainable development : What about the rebound effect ? *Ecological Economics* 36 ; 119-132.
5. Blair R. D, Kaserman D. L, and Tepel R. C. (1984) The impact of improved mileage on gasoline consumption. *Economic Inquiry* 209-217.
6. Borger, B. D, Mulalic, I, and Rouwendal, J. (2016) Measuring the rebound effect with micro data : A first difference approach. *Journal of Environmental Economics and Management*, 79, 1-17.
7. Chan, N. W, and Gillingham, K. (2015) The Microeconomic Theory of the Rebound Effect and its Welfare Implications. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*. 2(1), 133-159.
8. Chitnis, M, Sorrell, S, Druckman, A, Firth, S. K, and Jackson. (2014) Who rebounds most ? Estimating direct and indirect rebound effects for different UK socioeconomic groups. *Ecological Economics*, 106, 12-32.
9. Chow G. C. (1967) Technological change and the demand for computers. *American Economic Review* 57, 1117-1130.
10. Dahl C, and Sterner T. (1991) Analyzing Gasoline Demand Elasticities-a Survey. *Energy Economics* 13, 203-210.
11. Einhorn, M. (1982) Economic implications of mandated efficiency standards for household appliances : an extension. *Energy Journal* 2(1), 103-109.
12. Espey M. (1998) Gasoline demand revisited : an international meta-analysis of elasticities. *Energy Economics* 20, 273-295.
13. Frondel, M, Ritter, N, and Vance, C. (2012) Heterogeneity in the rebound effect : Further evidence for Germany. *Energy Economics*, 34, 461-467.
14. Greene DL. (1992) Vehicle use and fuel economy : How big is the rebound effect ? *The Energy Journal* 13 ; 117-143.
15. Greene DL, Kahn JR, and Gibson RB. (1999) Fuel Economy Rebound Effect for U. S. Household Vehicles. *The Energy Journal* 20(3), 1-31.
16. Greening LA, Greene DL, Difiglio C. (2000) Energy efficiency and consumption-The rebound effect : A survey. *Energy Policy* 28, 389-401.

17. Henly J, Ruderman H, Levine MD. (1988) Energy saving resulting from the adoption of more efficient appliances : A follow-up. *The Energy Journal* 9, 163-170.
18. Khazzoom J. D. (1980) Economic implications of mandated efficiency standards for household appliances. *Energy Journal* 1 ; 21-40.
19. Lovins A. B, Henly J, Ruderman H, and Levine M. D. (1988) Energy saving from more efficient appliances : another view. *Energy Journal* 9 ; 155-162.
20. Mayo J. W, and Mathis J. E. (1988) The Effectiveness of Mandatory Fuel Efficiency Standards in Reducing the Demand for Gasoline. *Applied Economics* 20, 211-219.
21. Mizobuchi K. (2008) An Empirical Study on the Rebound Effect Considering Capital Costs. *Energy Economics*, 30, 2486-2516.
22. Roy J. (2000) The rebound effect : some empirical evidence from India. *Energy Policy* 28, 433-438.
23. Saunders H. D. (1992) The Khazzoom-Brookes postulate and neoclassical growth. *The Energy Journal* 13(4), 131-148.
24. Semboja H. H. H. (1994) The effects of an increase in energy efficiency on the Kenyan economy. *Energy Policy* 22(3), 217-225.
25. Small KA. (1992) *Urban transportation economics* Harwood Academic Publishers Chur.
26. Small K, and Dender VK. (2007) Fuel Efficiency and Motor Vehicle Travel : The Declining Rebound Effect. *The Energy Journal* 28(1), 25-52.
27. Sorrell S, and Dimitropoulos J. (2008) The rebound effect : Microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics* 65, 636-649.
28. Triplett J. E. (1989) Price and technological change in a capital good : a survey of research on computers. *Technology and Capital Formation* (Landau D.W.J.a.R. Ed), MIT Press, Cambridge MA. 90.
29. Walker I. O, and Wirl F. (1993) Irreversible price-induced efficiency improvements : Theory and empirical application to road transportation. *Energy Journal* 14, 183-205.
30. Wang, H. Zhou, P. and Zhou, D. Q. (2012) An empirical study of direct rebound effect for passenger transport in urban China.
31. Wilson A, and Boehland J. (2005) Small is Beautiful : U. S. House Size, Resource Use, and the Environment. *Journal of Industrial Ecology* 9, 277-228.
32. Zein-Elabdin E. O. (1997) Improved stoves in Sub-Saharan Africa : the case of the Sudan. *Energy Economics* 19, 465-475.