

松 山 大 学 論 集  
第 28 卷 第 3 号 抜 刷  
2 0 1 6 年 8 月 発 行

エネルギー効率改善によるリバウンド効果  
研究のレビュー

溝 渕 健 一

# エネルギー効率改善によるリバウンド効果 研究のレビュー

溝 淵 健 一

## 概 要

リバウンド効果とは、エネルギー効率の高い製品に買い替えた際、エネルギーサービス価格の低下が、追加的なエネルギーサービス需要を生み出し、それが本来、技術的に予想されるエネルギー消費削減量を相殺する経済現象である。本研究は、エネルギー経済の分野における課題であるリバウンド効果について、主に家計部門を対象に、その概念とこれまで明らかになっている問題点や、今後の課題についてまとめる。また、残された課題に取り組んでいる最近のリバウンド効果の実証研究を取り上げ、今後のリバウンド効果の実証研究における参考として紹介する。本稿の結果は、これまでのリバウンド研究の総括と、今後の実証研究の方向性についてある程度示すことが出来た。

## 1. は じ め に

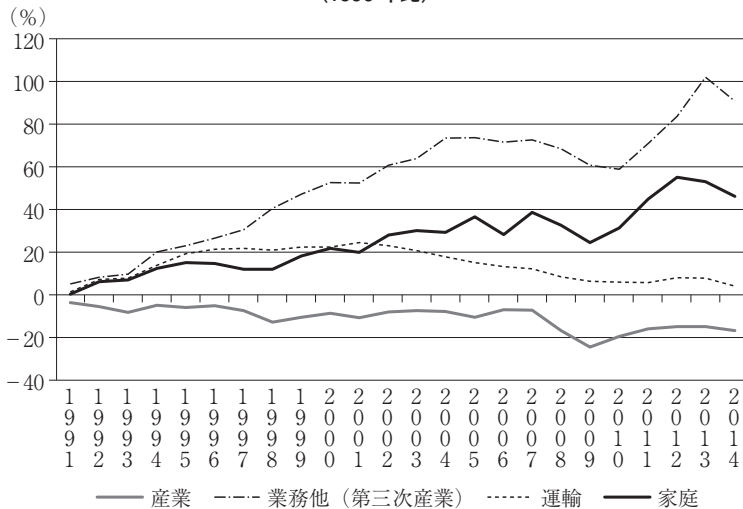
温室効果ガスインベントリオフィス<sup>1)</sup>によると、2014年の二酸化炭素（以下、CO<sub>2</sub>）排出量は、12億6,549万t-CO<sub>2</sub>であった。一方で、2015年の気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）において、日本は2030（平成42）年度に、2013年度比で26%の削減目標（約10億4,200万t-CO<sub>2</sub>）を示した。よって、2030年までに、2014年の排出量から約17.7%の削減を行う必要があ

---

1) <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html> (2016年7月15日にアクセス)

る。図1は、1991年から2014年までの、産業部門、運輸部門、業務部門、家計部門の4部門のCO<sub>2</sub>排出量の変化率（1990年基準）の推移を表したものである。図より、業務部門と家計部門の伸びが顕著に大きく、2014年では、それぞれ90.5%と46.8%であった。一方で、運輸部門は、エコカーの急速な普及などにより、2000年以降は減少している（2014年で5.2%）。また、産業部門は早くから対策が行われてきたため、1990年以降はずっとマイナスで推移していることが分かる（2014年で-15.1%）。ここで、表1はCOP21で約束した各部門の削減量の目安を表したものである。表より、削減余地の大きな業務部門と家計部門の削減率が大きく、それぞれ39.8%と39.3%であり、次いで運輸部門が27.6%、産業部門が6.5%であった。

図1. 部門別CO<sub>2</sub>排出量増加率の推移  
(1990年比)



出典：地球温暖化ガスインベントリオフィス

表 1. 各部門のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量の削減目安

		2030 年度の各部門の 排出量の目安	2013 年度	削減率
排 出 源	産業部門	401	429	-6.5
	業務その他部門	168	279	-39.8
	家庭部門	122	201	-39.3
	運輸部門	163	225	-27.6

出典：環境省「日本の約束草案(2020年以降の新たな温室効果ガス排出削減目標)」  
を著者が一部加工

ここで、もっとも目標値の高い業務部門と家計部門であるが、業務部門は第3次産業の発達による伸びが原因と考えられる。一方で、家計部門の伸びは、主に家電製品の普及や多様化が原因と考えられる。ここで、産業部門や運輸部門では、比較的早い時期から規制や対策が行われており、その効果が示されてきた。そのため、今後は第3次産業においても規制が行われれば、業務部門においても削減が進むものと期待される。一方で、家計部門は、その他の部門と比べると政府による規制が難しいため、これまで環境啓発、環境教育、省エネルギー（以下、省エネ）製品への買い替え政策（家電エコポイント制度<sup>2)</sup>など）のような、家計の自主的な行動を促進する対策のみが行われてきた。そのような対策の中で、最も有効と考えられるのが、省エネ家電への買い替えである。これは、既存のエアコンやテレビなどを、よりエネルギー効率の高い製品に買い替えることで、これまでよりもエネルギー消費量を減らすことが出来る。しかしながら、この買い替え政策の効果を通減させる要因が存在する。それがリバウンド効果である。

2) 2009年5月～2011年3月まで実施された制度。特定の環境性能を満たすエアコン、テレビ、冷蔵庫の3品目を対象に実施され、これらの家電を購入すると、その大きさにエコポイントが配布される。このエコポイントは、商品券や商品などと交換可能となっている。環境省・経済産業省・総務省（2010）によると、2011年5月時点でのエアコン、冷蔵庫、テレビを合わせたエコポイント発行件数（台数ベース）は、約4,481万台となっている。

リバウンド効果とは、省エネ製品に買い替えることで、エネルギーサービス価格が低下し、それによって、追加的なエネルギーサービス需要が発生することで、本来技術的に予想されたエネルギー消費削減量の一部が相殺される経済現象のことを表す。例えば、既存のエアコンよりも20%効率的な省エネエアコンへの買い替えを考える。もし、買い替え後も同じような使い方（設定温度や使用時間、使用時間帯など）をしていれば、買い替えにより、エアコンからの電気使用量を20%削減できる。しかしながら、この予想される使用量の削減（エネルギーサービス価格の低下）により、この家計がエアコンの使用（エネルギーサービス需要）をこれまでよりも増やす可能性がある（例えば、夏場の設定温度の低下や使用時間の増加など）。このような追加の使用により、当然、エアコンからの電気使用量は増える。そうすると、本来、買い替えによって予想された電力消費削減量（20%）の一部が、このような追加的なエアコンの使用によって、一部（あるいは全て）が相殺されてしまう。この相殺現象がリバウンド効果であり、Khazzoom（1980）によって最初に提唱されている。

このようなリバウンド効果が発生し、かつその影響が大きい場合、政府による省エネ製品への買い替え政策の効果は小さくなってしまう。このようなリバウンド効果の重要性にも関わらず、省エネ政策の効果の試算の際に、リバウンド効果は考慮されてこなかった。例えば、家電エコポイント制度の評価を行った、環境省・経済産業省・総務省（2010）では、リバウンド効果の影響が考慮されておらず、制度の効果を過大評価してしまっている可能性がある。Sorrell et al. (2009)では、これまでのリバウンド効果の研究をいくつか紹介している。彼らは、リバウンド推定には、集計データではなく、個票データを用いて推定することを推奨している。また可能であれば、パネルデータの使用を進めている。本稿では、Sorrell et al. (2009)以降におけるリバウンドに関する研究で、主にマイクロパネルデータを用いた実証研究をいくつか紹介する。

本稿の構成は以下である。第2節では、リバウンド効果の概念について再度紹介し、これまでの問題点や実証研究における推定方法などについて記載す

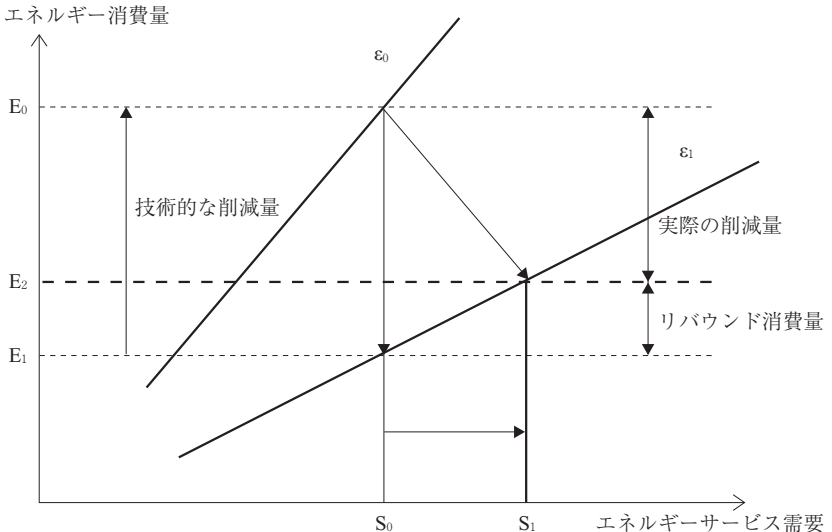
る。第3節では、最近のマイクロパネルデータを用いたリバウンド効果や、時間リバウンド効果の実証研究を紹介する。第4節は、まとめと今後の課題を示す。

## 2. リバウンド効果

### 2.1. 基本理論

前節で述べたように、リバウンドの概念は Khazzoom (1980) によって紹介された。リバウンド効果は、エネルギー効率の改善が関連するエネルギーサービス価格を下げ、それに反応して、エネルギーサービス需要が増加する現象である。図2は、リバウンド効果を描写したものである。縦軸がエネルギー消費量、横軸がエネルギーサービス需要である。今、エネルギー効率性が $\epsilon_0$ であるとする。この時、エネルギー消費量は $E_0$ 、エネルギーサービス需要は $S_0$ である。エネルギー効率性の高い製品に買い替えたとする（エネルギー効率性が

図2. 直接リバウンド効果の描写



$\varepsilon_1$ になる)。もし、エネルギーサービス需要が変化しなければ、エネルギー消費量は買い替えによって、 $E_0$ から $E_1$ まで減少する。この $E_0$ - $E_1$ が買い替えによる「技術的な削減量」である。一方で、買い替えによって予想されるエネルギーサービス価格の低下によって、エネルギーサービス需要が増加するかもしれない。例えば、 $S_1$ までエネルギーサービス需要が増加すると、それに伴って、エネルギー消費量は $E_2$ まで増加する。その結果、実際のエネルギー消費量は $E_2$ となるため、 $E_0$ - $E_2$ が「実際の削減量」となる。この時、 $E_2$ - $E_1$ がリバウンドによる追加的なエネルギー消費量になる。

Greening et al. (2000)において、リバウンド効果のいくつかの定義が紹介されている。リバウンド効果には主に3つの種類がある。1つ目は「直接リバウンド効果」、2つ目は「間接リバウンド効果」、3つ目は「設置効果」である。また、この3つを合わせて、「経済全体のリバウンド効果 (economy-wide rebound effect)」と呼ぶ。図2における説明は、このうちの「直接リバウンド効果」である。図3にそれぞれのリバウンド効果の対応を示している。図の左側の技術的なエネルギー消費削減量 (potential residential energy savings) が、買い替えによって潜在的に予想されるエネルギー消費削減量である。一方で、右側の経済全体のリバウンド効果によって、実際のエネルギー削減量が減らされてしまう。この全体のリバウンド効果は3つのタイプのリバウンド効果によって構成されている。

最初、買い替えによるエネルギー代金の減少により、関連するエネルギーサービス価格の減少がもたらされる。このエネルギーサービス価格の低下が、新たなエネルギーサービス需要を生み出す。この効果が、自己価格効果、あるいは「直接リバウンド効果 (direct rebound effect)」と呼ばれるものである (Berkhout et al., 2000, Wang, et al., 2012)。

「間接リバウンド効果 (indirect rebound effect)」は、買い替えによって節約されたお金を、他の財の消費に向けることで発生する。この家計の支出変化を、2次の効果や間接リバウンド効果と呼ぶ (Berkhout et al., 2000, Greening

et al., 2000)。この間接効果は、経済全体に跳ね返る。家計がエネルギーに使わなくなったお金を他の財の消費に回すことで、その財を供給している部門が（最終需要の変化によって）影響を受け、さらに、他の部門に次々に波及していく。よって、このメカニズムは全ての部門のエネルギー消費量に影響する。

「設置エネルギー（embodied energy）」は、省エネ投資に必要となるエネルギー消費量のことであり、生産工程や設置の段階に必要なエネルギー量のことを指す。新技術を用いた製品の方が、従来製品よりもエネルギーをより消費する可能性が高い（必ずしもそうとは限らず、省エネ製品の中にも、余分な機能などを削減したシンプルな構造のものもあり、それらは、従来製品よりもエネルギーをあまり使わずに生産していることもある）。

この「直接リバウンド効果」、 「間接リバウンド効果」、 「設置エネルギー」の3つが、省エネ製品へ買い替えた際の技術的なエネルギー消費削減量を相殺し、実際のエネルギー消費削減量をより小さくしてしまう。このようなリバウンドが発生する場合には、前節でも指摘したように、政策の効果を過大評価してしまい、目標を達成できなくなってしまう可能性がある。そのため、それぞれのリバウンド効果の大きさを事前に把握しておくことは、省エネ政策において非常に意味のあることとなる。

図 3. リバウンド効果の種類

技術的なエネルギー消費削減量 (Potential residential energy savings)	実際のエネルギー消費削減量	
	経済全体の リバウンド効果 (Economy-wide rebound effect)	直接リバウンド効果 (Direct rebound effect)
		間接リバウンド効果 (Indirect rebound effect)
	設置エネルギー (Embodied energy)	



## 2.2. リバウンド効果の推定について

リバウンド効果の大きさを推定した研究は、世界中に数多く存在する。しかしながら、リバウンド効果の実証研究には、いくつかの注意点や問題点が残されている。主な問題点として、1) リバウンド効果の計測方法、2) リバウンド効果の計測対象やその範囲、3) 資本費用の考慮、4) 時間リバウンド効果などである。ここでは、それぞれについて簡単に紹介しておく。

まず、1つ目は、リバウンド効果の計測方法である。実証研究において、最も対象として選ばれるのが「直接リバウンド効果」であり、この推定には、複数の指標が存在する (Sorrell et al., 2009)。リバウンド効果の大きさを直接計測する場合、省エネ製品 (家電や断熱材、車など) の購入や買い替え前後で、対象とするエネルギー消費量を計測し、以下の式に基づいて計算する。

$$\text{リバウンド効果①} = (\text{技術的な予想削減量} - \text{実際の削減量}) / (\text{技術的な予想削減量})$$

このようなデータは、疑似実験的な方法 (quasi-experimental approach) などによって、買い替え前後のエネルギー使用量を計測し、同時に他の要因もコントロールも必要になってくる。しかしながら、このような方法で、大規模なデータセットを得ることは非常に難しい。そのため、実証研究では、二次的なデータに基づいた計量経済学の応用による方法が用いられることがほとんどである。この方法は、例えば、エネルギー効率性とエネルギーサービス需要の間の弾力性を推定し、その大きさをリバウンド効果の大きさとする方法である。Sorrell et al. (2009) では、弾力性に基づいたリバウンド効果の代替的な推定指標として、5つを紹介している。そのうちの、エネルギー効率の弾力性として、以下の2つがある。

リバウンド効果② $=\eta_{\epsilon}(E)$ ：エネルギー需要（E）の、エネルギー効率（ $\epsilon$ ）弾力性

リバウンド効果③ $=\eta_{\epsilon}(S)$ ：エネルギーサービス需要（S）の、エネルギー効率性（ $\epsilon$ ）弾力性

$\eta_{\epsilon}(S)$ については、直接リバウンド効果の推定に一般的に用いられる指標である。これは、 $S=\epsilon E$ の関係から、 $\eta_{\epsilon}(E)=\eta_{\epsilon}(S)-1$ が導かれる（Sorrell and Dimitropoulos, 2008）。もし、 $\eta_{\epsilon}(S)=0$ であれば（買い替え前と行動が変わらない）、省エネ製品への買い替えにより、本来技術的に予想されたエネルギー消費削減量が達成される（つまり、 $\eta_{\epsilon}(E)=-1$ ）。正のリバウンド効果がある場合  $\eta_{\epsilon}(S)>0$  かつ  $0>\eta_{\epsilon}(E)>-1$  となる。一方で、買い替えによりかえってエネルギー消費量が増加する「バックファイアー効果」の場合は、 $\eta_{\epsilon}(S)>0$  かつ  $\eta_{\epsilon}(E)>0$  となる。リバウンド効果は通常パーセントで表される。そのため、もしリバウンド効果が20%であれば、 $\eta_{\epsilon}(S)=0.2$  かつ  $\eta_{\epsilon}(E)=-0.8$  となり、20%の潜在的な削減量が、エネルギーサービス需要の増加によって“相殺”されたことを意味する。

一方で、ほとんどの直接リバウンド効果の研究では、 $\eta_{\epsilon}(E)$ や $\eta_{\epsilon}(S)$ ではなく、以下の価格弾力性に基づいた3つの方法によって推定されている。

リバウンド効果④ $=\eta_{P_S}(S)$ ：エネルギーサービス需要（S）の、エネルギーサービス価格（ $P_S$ ）弾力性

リバウンド効果⑤ $=\eta_{P_E}(S)$ ：エネルギーサービス需要（S）の、エネルギー価格（ $P_E$ ）弾力性

リバウンド効果⑥ $=\eta_{P_E}(E)$ ：エネルギー需要（E）の、エネルギー価格（ $P_E$ ）弾力性

ここで、 $P_S=P_E/\epsilon$ である。特定的前提の下で、④～⑥のそれぞれの弾力性は、 $\eta_{\epsilon}(S)$ の近似になりえる（Sorrell and Dimitropoulos, 2009）。価格弾力性をこの

ように用いることで、エネルギー費用が低下した際の、行動の変化として、直接リバウンド効果の大きさとしてみなすことが出来る。④～⑥の弾力性の指標のうち、どれを用いるかは、データの利用可能性に依存する。一般的に、エネルギー消費量 ( $E$ ) とエネルギー価格 ( $P_E$ ) は、エネルギーサービス需要 ( $S$ ) とエネルギー効率性 ( $\epsilon$ ) よりも入手しやすく、かつ正確なデータが手に入りやすい。また、エネルギー効率性 ( $\epsilon$ ) が入手できたとしても、その変動 (variation) は小さく、結果として  $\eta_\epsilon(S)$  の変動は大きくなってしまふ。一方で、 $\eta_{P_S}(S)$  の変動は、 $P_S$  の変動が大きいと、小さくなりやすい。 $\eta_{P_S}(S)$  は、自動車交通や、冷房、暖房などを対象とした実証研究に用いられることが多い。

エネルギー効率性のデータが入手できないか、入手できても正確なものでない場合、 $\eta_{P_E}(S)$  が用いられることが多い。しかしながら、これには、エネルギー価格 ( $P_E$ ) の上昇と、エネルギー効率性 ( $\epsilon$ ) の改善の両方で、消費者の反応が同じという仮定が必要になる。一方で、エネルギー効率性がエネルギー価格に対して外生 ( $\eta_{P_E}(\epsilon) = 0$ ) だとすると、 $\eta_{P_E}(E)$  を直接リバウンド効果の指標として用いることが出来る。しかしながら、これらの2つの指標の仮定は満たされにくく、その場合のバイアスの大きさも、財によってや、短期や長期によって大きく異なることが知られている (Sorrell and Dimitropoulos, 2008)。また、後者のエネルギー需要のエネルギー価格弾力性  $\eta_{P_E}(E)$  の指標は、直接リバウンド効果の「上限値」として用いられることもある。

リバウンド効果の2つ目の問題点として、リバウンド効果の対象地域や部門、範囲などが異なることで、同一のエネルギーサービスでもリバウンド効果の推定値が大きく異なることがある (Chitnis et al., 2014)。リバウンド効果の実証研究は、これまでにアメリカやヨーロッパの国々を対象に数多く行われてきた。しかしながら、対象が冷暖房 (Hass and Biermayr, 2000) や照明 (Mills and Schleich, 2014)、自動車 (Iwata and Matsumoto, 2016)、太陽光パネル (Caird et al., 2008) などと異なっていたり、用いている手法や、対象の地域の範囲、データの種類(クロスセクションデータ、時系列データ、パネルデータ)によっ

ては、同一のエネルギーサービスでも、リバウンド効果の大きさが大きく異なってくるケースも多い。そのため、ある研究で得られた結果を、他の地域や国に直接適応することは難しい。例えば、地域性の違いとして、発展途上国や所得の低い国では、現在のエネルギー消費量が、飽和点からかなり離れているため、リバウンド効果が大きくなる傾向があり、反対に飽和状態に近い、先進国ではリバウンド効果は低くなることが分かっている (Thomas and Azevedo, 2013)。また、同一の地域や分析手法などを用いた場合でも、対象エネルギーによって、リバウンド効果には違いが出る。Berkhout et al. (2000) によると、電力の方が、天然ガスに比べるとリバウンド効果が低くなることが示されている。

また、前節で示したように、リバウンド効果の研究は「直接リバウンド効果」の実証研究がほとんどであり、「間接リバウンド効果」や「設置エネルギー」などは、ほとんど考慮されてこなかった。Nassen and Holmberg (2009) や、Thomas and Azevedo (2013)、Chitnis et al. (2014) などは、間接リバウンド効果が無視できない大きさであることを示しており、これらを考慮してこなかった従来のリバウンド研究も、政策評価に用いる場合には注意が必要である。また、リバウンド効果を短期と長期のどちらで測るかによる違いも重要である。一般的に、長期では家族属性や住宅属性、家電の変更なども含めたエネルギー消費量の変化を考慮する必要があるため、長期に比べると、リバウンド効果は大きくなる。ここで、長期のリバウンド効果はクロスセクションデータによる推定、短期のリバウンド効果は、時系列データやパネルデータを用いることによって、推定を行うことが出来る。Gillingham et al. (2015) は、政策においては、短期のリバウンド効果を用いることを推奨している。

リバウンド効果の3つ目の問題点として、資本費用の考慮がある。Henly et al. (1988) は、省エネ製品が従来製品よりも割高なため、導入の際に追加的な資本費用が発生し、それがリバウンド効果の大きさを小さくする可能性について、理論的に指摘している。つまり省エネ製品導入による資本費用が、従来の

リバウンド効果の発生原因である、エネルギーサービス価格の低下を緩和し、その結果、リバウンド効果を小さくするのである。いくつかの研究において、この資本費用を考慮した場合のリバウンド効果が推定されているが、いずれも、資本費用を考慮しない場合と比べると、リバウンド効果の大きさは小さくなっている (Mizobuchi, 2008, Nassen and Holmberg, 2009, and Thomas and Azevedo, 2013)。しかしながら、資本費用を考慮したリバウンド効果の実証研究は、資本費用を考慮しない研究に比べると、格段に研究の蓄積が少なく、また、これまでの実証研究も、大規模なデータで示されたものは1つもない。一方で、資本費用の重要性から、これを考慮しないとリバウンド効果を過大評価してしまう可能性があるため、政策評価の観点からも、今後の実証研究の蓄積が望まれる。

リバウンド効果の4つ目の問題点として、時間リバウンド効果がある。時間リバウンド効果とは、時間節約的な技術の導入により、節約された時間をよりエネルギーの多い活動に振り分けることで、エネルギー消費量が増加する現象を表している。例えば、食洗機を導入することで、これまで手で洗っていた時間が大幅に節約されると、その時間を用いて、より料理に時間をかけたり（直接リバウンド効果）、テレビやインターネット、ゲームなどをする時間を増やしたり（間接リバウンド効果）することで、時間の再配分が行われ、それによってエネルギー消費量が増減する可能性がある。Brencic and Young (2009) では、2003年のカナダの家計データを用いて、時間節約的な機器の導入が、i) 家庭内の時間再配分に影響するかどうか、ii) エネルギー消費量に影響するかどうかの2点について、検証を行った結果、時間節約的な機器の導入は、家庭内で使う時間の再配分に影響を与えていた。一方で、エネルギー消費量への影響は限られており、しかも、サービスによっては、マイナス（エネルギー消費量が減少する）に有意な影響も見られた。このような時間リバウンド効果の研究は、それほど多くの蓄積がないが、amazonや楽天のようなインターネットのショッピングモールや、ネットスーパーなどの普及により、買い物の時間が

節約され、その分、1日に使える時間が増えてきている。また、近年では自動運転技術の開発が進んでおり、将来は運転者がいなくても人や物を運ぶ時代が来ると、運転から解放された人々は、その時間を別の行動に使う可能性が高い。このように考えると、時間リバウンド効果の影響は今後ますます重要な概念になってくるのかもしれない。次節では、時間リバウンド効果の数少ない実証研究である、Brenic and Young (2009) についても、詳しく紹介する。

### 3. リバウンド効果の実証研究

この節では、最近のリバウンド効果研究として、大規模なマイクロパネルデータでリバウンド効果を推定した研究と、近年、注目が高まっている時間リバウンド効果の推定を試みた研究の2つを詳しく紹介する。いずれも、これからのリバウンド研究のベースとなっていく研究であると期待されるものである。

#### 3.1. Davis et al. (2014) : 大規模マイクロパネルデータによる推定

Davis et al. (2014) では、2009年5月から2011年4月にメキシコで行われた大規模な家電買い替えプログラムの評価を行っている。実際には、この時期に190万世帯が冷蔵庫とエアコンを、エネルギー効率性の高いモデルに買い替えた。彼らは電気使用量明細データを利用して、対象となった冷蔵庫とエアコンの省エネ効果を推定している。

彼らの研究の特徴としては、1) 大規模なマイクロパネルデータであること、2) ランダム化比較実験、3) 電気使用量データの客観性などが挙げられる。まず、2節でも述べたように、これまでのリバウンド効果の研究のほとんどは、計量経済学のアプローチから、弾力性という代替的な指標によって、リバウンド効果を推定していた。しかしながら、このような方法には成立すべき仮定があり、それが満たされない場合は、バイアスが発生することが分かっている。彼らの研究は、実際に買い替え世帯と未買い替え世帯の電気使用量を比較出来ており、かつ100万世帯以上のパネルデータが利用可能であることから、

これまでの方法よりも正確で信頼性の高い結果が期待される。また、Joskow and Marron (1992) で指摘されているように、これまでの省エネに関する研究では、エネルギー使用量が自己申告データに基づくものがほとんどで、この場合、回答者がエネルギー消費量を少なく答える可能性があり、実際のエネルギー消費削減量を過大評価してしまう可能性が残る。Davis et al. (2014) では、電気使用量明細という客観的なデータを使用しているため、自己申告データで起こるような問題が発生する心配はないと言える。

彼らは、メキシコで上記の期間に行われた買い替えプログラム「Cash for Coolers: C4S」において、1) 10年以上使っている、2) 買い替え後の製品は、買い替え前と「同一タイプ」のものであること、3) 買い替え前の家電はリサイクルセンターに運ぶ、という3つの条件を満たす世帯を対象に、冷蔵庫とエアコンの買い替えに対して補助金を支給した。実際にプログラムを利用した世帯で、分析の対象となった世帯数は、約95万7千世帯であり、さらに、プログラムを利用しなかった世帯（買い替えを行っていない世帯）をランダムに抽出し、いずれの世帯にも毎月の電気使用量明細を提出してもらった。電気使用量の検針は、メキシコでは2カ月に1回なので、2カ月おきの電気使用量データとなっている。また、プログラムの対象となっているエアコンや冷蔵庫の個別の電気使用量は計測できないため、総電力消費量を対象としている。

分析に用いた回帰モデルは以下である。

$$y_{it} = \beta_1 1[\text{New Refrigerator}]_{it} + \beta_2 1[\text{New AirConditioner}]_{it} + \gamma_{i, \text{mog}} + w_i + \varepsilon_{it}$$

ここで、 $y_{it}$  は、家計  $i$  の  $t$  月における電気使用量 (kWh) を表している。 $\beta_1$  と  $\beta_2$  は、パラメータで、平均的な電力消費の変化量を表している。 $\gamma$  は世帯の月次の固定効果で、通常の時間不変効果のみならず、季節による世帯の固有効果まで捉えている。プログラム参加世帯をトリートメントグループとして、未参加世帯(ランダムに抽出)と買い替え後の電気使用量を比較している。ここで、未参加世帯は、参加グループとより正確な比較を行うため、1) 居住地域でマッ

チングした世帯グループや、2) 居住地域と事前の電気使用量の2つでマッチングした世帯グループ、3) マッチングなしの世帯グループの3つを用意して比較を行っている。この研究では、他の重要な家電製品（照明、テレビ、洗濯機、電子レンジ、電気ストーブなど）については、考慮していない。その理由としては、冷蔵庫とエアコンの重要度に比べると低いからだとしている。

回帰モデルをいくつかの定式化で推定した結果、冷蔵庫に関しては、買い替えによって節電効果が得られた（12.4 kWh/月の平均削減量）。一方で、エアコンに関しては、有意に増加がみられ、さらに夏場の係数ダミーを推定したところ、有意になっていたことから、特に買い替え後の夏場において、未参加世帯に比べて（上記の3グループのどれと比べても）、有意に増加という結果になった。彼らは、この結果に対して、5つの理由を示している。①家電の年齢、②家電の使用頻度、③家電のサイズや追加機能、④買い替え前製品の使用状態、⑤不均一効果の5つである。以下でそれぞれを簡単に紹介しておく。

まず1つ目の家電の年齢であるが、Davis et al. (2014) の表5には、1980年～2010年までの30年間における冷蔵庫とエアコンのエネルギー効率性の推移が掲載されている。これによると、冷蔵庫は67%、エアコンは30%のエネルギー効率性の改善が起こっている。そして、その多くが80年代から90年代に起こっており、最近（10年程度）は、それほど大きな改善はされていない。そのため、20年前の製品からの買い替えと、10年前の製品からの買い替えでは、予想される削減量に大きな違いが発生する可能性がある。このプログラムによる削減効果としてWorld Bankの推計を参考にしているが、World Bankの推計は、とても古い家電（25年以上前）からの買い替えを想定している。しかしながら、このメキシコの買い替えプログラムでは、買い替えの約15%のみが20年以上前の製品からのものであったため、事前の削減予想が過大評価であった可能性が高い。

2つ目の家電の使用頻度についてであるが、これは、例えば、エアコンの場合に、買い替え前が扇風機や自然換気であった可能性が挙げられる。当然のこ



とながら、このような状態からエアコンの使用に切り替えると、電気使用量は増加する。Davis et al. (2014) の図6では、月別に推定した回帰モデルの予測値から、冷蔵庫とエアコンの両方の月別の使用量の変動を示している。その図によると、冷蔵庫は、どの月を見ても家計ごとに使用量の変動は小さくなっていった。一方で、エアコンに関しては、季節によって変動が大きく、特に夏場は非常に大きく、冬場は小さいという結果となっていた。これより、エアコンの回帰分析の結果における増電効果は、「価格効果」というよりは、使い方の変化によるものであるのかもしれない。

3つ目の家電のサイズや追加機能であるが、買い替えプログラムは本来、冷蔵庫であれば。買い替え対象は $9\text{ m}^3$ から $13\text{ m}^3$ の大きさを想定しており、買い替えによって、 $2\text{ m}^3$ 以上は大きさは増えないと想定していた。しかしながら、Mexican Consumer Protection Officeが27の冷蔵庫をメキシコでの販売を調査した結果、販売された冷蔵庫の平均サイズは $13.5\text{ m}^3$ で、27のうち17は $13\text{ m}^3$ 以上の大きさだった。そのため、ほとんどの世帯は、買い替え前の製品よりも大きな冷蔵庫を使っている可能性があり、それによって電気使用量が想定していたものよりも減らなかった可能性がある。また、サイズの増加以上に重要なのが、追加機能である。例えば製氷機能や両開きドアなどがあり、これらはサイズの増加以上に電気使用量を増やす要因になる。一方で、エアコンにおいても、急速冷房機能やリモート機能、夜間機能などさまざまな機能が加わったことで、より電気使用量が増えたり、より便利になったことで、エアコンを使用する頻度が増え、それに伴って電気使用量も増えてしまった可能性がある。

4つ目が買い替え前製品の使用状態であり、プログラムでは、冷蔵庫とエアコンの買い替え前の使用量の基準を示しているが、実際には、古いものは使っていなかった可能性も高い。その場合、新しい製品がエネルギー効率的であったとしても、買い替えによって、エネルギー使用量が増加してしまった可能性がある。

最後が家計の不均一効果である。これは、プログラムに参加している世帯の属性によって、買い替え後の冷蔵庫やエアコンの使用状況が異なる可能性を指摘したものである。推定において、家計の所得水準や買い替え前の家電の年齢、買い替え時期などを入れた結果から、以下の事が明らかになった。まず、所得水準の違いであるが、「冷蔵庫」は、高所得世帯ほどたくさん削減がなされており、反対に低所得世帯の削減量は小さかった。「エアコン」では、どの所得層もエネルギー消費量が増加していた。次に、買い替え前の家電の年齢の効果 (age effect) では、過去のものであるほど、古いため、削減効果が大きいと予想されるものである。「冷蔵庫」はどの所得層も削減されており、「エアコン」はどの所得層も増加する結果となった。増加の原因としては、過去のものほど、小さく機能が少ないため、それが年齢の効果 (age effect) を打消したのかもしれない。最後に、買い替え時期の違いを検討したところ、「冷蔵庫」と「エアコン」の両方で、買い替え時期がプログラムの後半になるほど、削減効果が弱まる (増電効果が強まる) 結果となった。これは、古い家電を持っている世帯ほど、早めにプログラムを利用して買い替え、(比較的) 新しいものを持っている世帯は、後半にプログラムを利用した可能性が考えられる。

Davis et al. (2014) の結果として、家計部門は政府による削減規制が難しいため、補助金による省エネ製品の普及促進が効果的だと考えられがちだが、メキシコのケースでは、冷蔵庫では(予想よりも)少ない削減で、エアコンでは、増電する結果となってしまった。この研究は、大規模データでしかもランダム化比較実験によって行われた精度の高い研究であると言える。リバウンド効果の大きさ自体を正確に測っているわけではないが、冷蔵庫では、買い替えによって8%の削減で、事前予測の約4分の1の削減のみだったこと (つまり、リバウンド効果は約75%)、エアコンでは、買い替えによって、以前よりも電気使用量が増加してしまった (つまり、バックファイア効果) ことが明らかになった。これまでのリバウンド研究のほとんどが、第2節で示したような代替的な指標に基づくものがほとんどであったが、今後はこのようなランダム化

比較実験などによる、大規模マイクロパネルデータに基づく推定が主流になってくるのではないかと考えられる。

### 3.2. Brencic and Young (2009) : 時間リバウンド効果の推定

Brencic and Young (2009) は、第2節でリバウンド効果の問題点の4つ目に挙げた、時間リバウンド効果に関して、計量分析を用いた定量化を試みた数少ない研究の1つである。家計内生産には、時間とエネルギーなどの重要な投入要素が必要であり、そこに時間節約技術が導入されると、それによって節約された時間が、家計内生産や余暇時間に分配され、その行動の追加によって、新たにエネルギー需要の増減が発生する可能性がある。仮に、エネルギーの少ない行動から、よりエネルギーを必要とする行動に時間が配分されれば、エネルギー消費量は増加する。これを時間リバウンド効果と呼ぶ。彼らは、カナダの家計データを用いて、時間節約技術(家電)の保有が、時間の配分やエネルギー消費量にどのような影響をもたらすのかを定量的に検証している。

これまでの数十年で、多様な家電製品が導入・改善されてきた。最近では、食洗機や衣類乾燥機、自動掃除機、自動運転技術など、時間節約型の技術が開発・普及している状況である。このような技術を導入した場合、節約される時間が発生し、それが何らかの別の行動を生み出すかもしれない。その行動がエネルギー消費量を増加させることを、時間節約技術導入による時間リバウンド効果と呼ぶ。Aguiar and Hurst (2007) や Hamermesh (2007) は、時間節約技術が、家庭内の生産(家事など)に分配する時間に影響を与えることを示した。また、Gronau and Hamermesh (2008) では、節約された時間によって、家計内行動が増加することを示している。時間リバウンド効果については、Binswanger (2002), J alas (2002), Sorrell and Dimitropoulos (2008) などと言及されているが、定量的な研究は非常に限られている。最近だと、通常のリバウンド効果と似たような概念として、Davies (2008) において、古い洗濯機から、新しい洗濯機に買い替えるフィールド実験を用い、エネルギー効率性の向上(より時間

短縮的でもある?)が、新しい洗濯機の利用頻度を増加させ、本来のエネルギー削減量を相殺した結果を示している。

時間リバウンド効果の一般的なフレームワークは、Becker (1965) の家庭内生産モデルをもとに定式化している。そこでは、時間は家庭内生産サービスや余暇行動の投入要素のうちの1つとして扱っている。家計は  $n$  財(食事, 洗濯, 掃除, 余暇など)を消費することで効用を得ているとする。また、それぞれの財は、時間, エネルギー, 他の要素, 資本ストックによって生産されるとする。この時、家庭内生産サービスは次のように定式化される。

$$S_i = f_i(t_i, e_i, k_i(A_i), x_i), \text{ for } i=1, \dots, n \quad (1)$$

ここで、 $S_i$  は家庭内生産サービス  $i$  の需要量、 $t$  は時間、 $e$  はエネルギー消費量、 $k$  は資本ストック、 $x$  はその他の投入要素を表している。家庭の効用関数は次のように表される。

$$U = U(S_1, S_2, \dots, S_n), U' > 0, U'' < 0 \quad (2)$$

また、予算制約は次のようになる。

$$V + T_w P_w \geq \sum_{i=1}^n (P_e e_i + P_x x_i + \delta_k k_i(A_i)) \quad (3)$$

ここで、 $V$  は非労働所得、 $T_w$  は労働市場での時間を表している。家庭はこの制約のもとで、効用を最大化している。

時間リバウンド効果には2種類ある。1つは直接時間リバウンド効果、もう1つは間接時間リバウンド効果である。例として、食洗機の購入を考える。食洗機の利用により、手で洗っていた時間が節約される。この節約された時間を、より手の込んだ食事の準備に充てると、(食器洗いも料理の1つの過程とすると)料理のサービスに導入された時間節約技術による節約時間が、料理の1部の工程の時間に配分されたということで、これを直接時間リバウンド効果と呼ぶ。これに対し、節約された時間が、洗濯や掃除、テレビ鑑賞に充てられ

ると、これは他のサービスに時間が配分されたので、間接時間リバウンド効果と呼ぶ。

Brencic and Young (2009) では、カナダの家計における、家庭内生産と余暇サービスの時間配分決定と、それによるエネルギー需要を検証している。カナダでは、2003年時点で、家庭部門からのエネルギー消費量は全体の11.8%で、電気が28.4%、天然ガスが26.5%である。また、家電に利用されるエネルギーの97.3%は電力である。ここで、家電に利用されるエネルギーの割合は、食洗機で1.6%、洗濯機で1.4%、乾燥機で18.3%、コンロで18.4%、電子レンジとテレビ、ステレオ、パソコンを合わせて29.8%である。彼らは分析に2種類のデータセットを用いている。1つ目は Survey of Household Energy Use (SHEU-2003) で、これには、住宅属性、家庭内での行動、いくつかの家電の所有状況や利用状況、家電の使用時間、電気やガスの使用量などのデータを含んでいる。一方で、家庭外での行動については含まれていない(家庭外での活動の情報はない)。2つ目は電力や天然ガスの価格データとして、Canadian Building Energy End-Use Data and Analysis Centre (CBEEDAC) からデータを入力している。

前述したように、時間リバウンド効果には2種類ある。キッチンでの時間節約技術の導入による節約時間を、キッチンでの作業時間に振り分けるなら、直接時間リバウンドとなり、節約時間を洗濯や掃除などの時間に振り分けるなら、間接時間リバウンドとなる。この2つの時間配分に関するリバウンドを検証するための計量モデルは以下である。

$$time\ use_i = \alpha_0 + \sum_j \alpha_j\ time\ -\ saving\ appliance_j + \alpha'X + u \quad (4)$$

ここで、time use は家電の使用頻度(電子レンジのみ使用時間)。ここでの対象家電は、食洗機、洗濯機、衣類乾燥機、自動洗浄機能付きオーブン、電子レンジの5つである。ここで、 $\alpha > 0$  なら、時間節約技術(家電)の導入が、家庭内生産や余暇行動に配分されていることになる。ここで2つの注意点がある。

1つは、古い家電を使っている場合、時間リバウンド効果が小さくなることである。古い家電ほど時間節約効率が悪いからである。2つ目は、高所得者は時間費用が高いので、節約された時間をより他のサービスに振り分けやすいことがある。一方で、高所得者は節約時間の多くを、外出や仕事に使う可能性も高い。

計量モデル(4)の推定結果から、直接効果と間接効果の両方が確認出来た。直接効果だと、自動洗浄機能がついたオーブンを所有している低所得世帯は、所有していない世帯に比べ、1ヵ月当たりの平均で1.9時間料理に使う時間が増えている。これは、自動洗浄機能により、自身で行う必要がなくなった時間を使い、より複雑な料理に時間を費やせるようになったからだと考えられる。間接効果だと、食洗機を所有している世帯は、洗濯や乾燥により多くの時間を使うことが示されている。例えば、冬場、食洗機を持っている高所得と低所得の世帯は、洗濯に週平均0.6~0.8時間余分に使っている。また、同じ世帯において、乾燥に週平均で0.5~0.6時間余分に使っていた。一方で、家電の年齢も、家庭の時間利用に影響していた。例えば、古い食洗機や乾燥機を所有している世帯は、それらの利用頻度が少ない(弾力性では、 $-0.15$ )。また、古い食洗機を使っている世帯は、季節によって乾燥機の利用が少なかった。また、古い乾燥機を使っている世帯は、洗濯機の利用が少なく(ただし、弾力性も小さい： $-0.04$ から $-0.07$ )、古いオーブンを使っている世帯は、電子レンジの使用は多かった。他にも、いくつかの興味深い結果が得られている。例えば、電力価格は時間節約技術の使用頻度と正の相関があることや、世帯構成人数が多いほど、家庭内生産に時間を用いること、また、持ち家世帯は、賃貸世帯に比べ、衣類乾燥機を用いる頻度が少ないなどである。

一方で、時間節約技術(家電)の使用が、余暇行動への時間配分に与える影響も確認された。例えば、高食洗機を保有している高所得世帯は、そうでない世帯よりも2.4時間余分にVCRの利用に時間を使うこと、食洗機を持っていない低所得世帯は、持っている世帯より、5.6時間余分にテレビを見ているこ

と、洗濯機と乾燥機を両方所有している世帯は、そうでない世帯より、ステレオシステムを1時間多く使うこと、高所得で、衣類乾燥機と食洗機を持っている世帯は、そうでない世帯より、0.5時間余分にVCRを利用していること、自動洗浄オープンを持っている高所得世帯は、そうでない世帯より、20分少なくテレビを見ているなどである。また、家電の年齢と余暇活動への時間配分についてはほとんど確認されなかった。一方で、家族構成人数によっては、テレビやパソコンの利用時間に影響を与えることが分かった。さらに、持ち家世帯は、賃貸世帯に比べ、テレビを見る時間が有意に少なかった。

最後に、時間節約技術(家電)の導入が、家庭のエネルギー消費量に与える影響を検証している。対象エネルギーは電力と天然ガスで、計量モデルは以下である。

$$\begin{aligned} & \text{energy use per sq ft of heated dwelling area} \\ & = \beta_0 + \sum_j \beta_j \text{ time-saving appliance}_j + b'X + u \end{aligned} \quad (5)$$

通常、このようなエネルギー需要モデルには、1) エネルギー価格、2) 社会経済変数(所得、教育、家族構成人数など)、3) 住宅の属性(種類、断熱性能など)、4) 環境特性(気温、居住地域など)を含めることが一般的である(Parti and Parti, 1980, Branch, 1993, Biesiot and Noorman, 1999, Weber and Parrels, 2000, Larsen and Nesbakken, 2004)。この研究でもできるだけ対応する変数は含めている。推定結果より、時間節約技術(家電)の導入は、エネルギー消費量に対してそれほど幅広く影響を与えないことが分かった。影響を受けている行動は2つで、1つ目は、洗濯機を所有している低所得世帯で、所有していない世帯よりも電力消費量が少なくなった。2つ目は、洗濯機と乾燥機を所有している世帯で、所有していない世帯に比べ、電気とガスの使用量が少なくなっていた。いずれにしても、時間節約技術(家電)の導入によって、エネルギー消費量は増えることはなかった(つまり、時間リバウンド効果は発生していない)。また、推定結果からいくつかの面白い結果が得られている。例えば、天

然ガスの価格弾力性は有意にマイナスだが、電気は有意にならなかったこと、家計構成人数が増えると、電気もガスも使用量が増加すること、持ち家かどうかは、エネルギー消費量に影響しないことなどである。

Brencic and Young (2009) の結果からは、時間節約技術の導入が、エネルギー消費量を増やすという証拠は得られなかった。これは、政策決定者にとっては朗報で、エネルギー効率の高い家電の導入によって、時間リバウンド効果が、本来の省エネ効果を妨げることはなさそうだということが示されている。

#### 4. まとめと今後の課題

近年、省エネ製品の開発と普及が急速に進んでいる。これらは、地球温暖化防止やエネルギー問題に対する有効な対策の1つと考えられるが、一方で、省エネ技術導入によって、技術的に予想されるエネルギー削減効果の一部（あるいは全て）が相殺され、実際の削減量が予想されたものよりも小さくなってしまふ現象をリバウンド効果と呼ぶ。このリバウンド効果が発生していた場合、省エネ製品の普及によるエネルギー消費削減効果を過小評価してしまう可能性があり、政策決定者にとって、このリバウンド効果の大きさを把握しておくことは非常に重要であると言える。

本稿では、エネルギー効率改善によるリバウンド効果について、その基礎理論や残された課題、最近のリバウンド効果のサーベイの1部について詳しく紹介した。リバウンド効果には「直接リバウンド」、「間接リバウンド」、「設置エネルギー」の3種類があり、それぞれの大きさを推定する研究が進んでいる。一方で、1) リバウンド効果の計測方法、2) 計測対象やその範囲、3) 資本費用の考慮、4) 時間リバウンド効果など、残された課題は数多くある。本稿の第3章では、Davies et al. (2014) と Brencic and Young (2009) の2つの最近のリバウンド研究を紹介した。前者は大規模なランダム化比較実験により、エアコンと冷蔵庫のリバウンド効果を推定したもので、従来の代替指標よりも正確な推定方法である。今後はこのようなランダム化比較実験データや、マッチン



グによる比較方法が、リバウンド推定の主流になってくるものと思われる。一方で、後者の論文は時間リバウンド効果の推定を試みた研究である。リバウンド効果は、その存在や大きさなどを推定する研究は多いが、実際にどのような行動がリバウンドとなっているのかについての検討はほとんどされていない。時間リバウンドはそのような、家計の実際の行動に注目した研究であり、今後、エネルギー効率改善により、どのような行動の結果が、新たなエネルギー消費を生み出しているのかを検証していく必要が出てくるはずである。Brenic and Young (2009) では、限定的な時間データでの検証であるが、その行動の一部を明らかにしたところに貢献がある。今後は、彼らが対象と出来なかった家庭内サービスや、外での行動、仕事時間などの詳細なデータで、時間リバウンド推定の研究が期待される。

## 謝 辞

本研究は、2014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

- ・環境省・経済産業省・総務省, 2010. 家電エコポイント制度の政策効果等について.  
<http://www.meti.go.jp/press/2011/06/20110614002/20110614002-2.pdf>
- ・Aguiar, M., Hurst, E., 2007. Measuring trends in leisure: the allocation of time over five decades. *Quarterly Journal of Economics*, 122, 969-1006.
- ・Becker, G. S., 1965. A theory of the allocation of time. *The Economic Journal*. 75, 493-517.
- ・Berkhout, P. H. G., Muskens, J. C. and Velthuis, J. W., 2000. Defining the rebound effect. *Energy Policy*, 28, 425-432.
- ・Binswanger, M., 2002. Time-saving innovations and their impact on energy use: some lessons from a household production-function approach. "Series A" Working Paper, Solothurn University of Applied Science Northwestern Science.
- ・Biesiot, W., Noorman, K. J., 1999. Energy requirements of household consumption: a case study of the Netherlands. *Ecological Economics*, 28, 367-383.
- ・Branch, E. R., 1993. Short run income elasticity of demand for residential electricity using

- consumer expenditure survey data. *Energy Journal*, 14, 111-121.
- Brencic, V. and Young, D., 2009. Time-saving innovations, time allocation, and energy use : Evidence from Canadian households. *Ecological Economics*, 68, 2859-2867.
  - Caird, S., Roy, R. and Herring, H., 2008. Improving the energy performance of UK households : Results from survey of consumer adoption and use of low- and zero-carbon technologies. *Energy Efficiency*, 1, 149-166.
  - Chitnis, M., Sorrell, S., Druckman, A., Firth, S. K. and Jackson, T., 2014. Who rebounds most ? Estimating direct and indirect rebound effects for different UK socioeconomic groups. *Ecological Economics*, 106, 12-32.
  - Davis, L. W., 2008. Durable goods and residential demand for energy and water : evidence from a field trial. *RAND Journal of Economics*, 39, 530-546.
  - Davis, L. W., Fuchs, A., Gertler, P., 2014. Cash for coolers : Evaluating a large-scale appliance replacement program in Mexico. *American Economic Journal : Economic Policy*, 6, 207-238.
  - Gillingham, K., 2015. The rebound effect and energy efficiency policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 10, 68-88.
  - Gonzales, J. F., 2010. Empirical evidence of direct rebound effect in Catalonia. *Energy Policy*, 38, 2309-2314.
  - Greening, L. A., Greene, D. L. and Difiglio, C., 2000. Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey. *Energy Policy*, 28, 389-401.
  - Gronau, R., Hamermesh, D. S., 2008. The demand for variety : a household production perspective. *Review of Economics and Statistics*, 90, 562-572.
  - Hamermesh, D., 2007. Time to eat : household production under increasing income inequality. *American Journal of Agricultural Economics*, 89, 852-872.
  - Hass, R. and Biermayr, P., 2000. The rebound effect for space heating : Empirical evidence from Austria. *Energy Policy*, 28, 403-410.
  - Henly, J., Ruderman, H., Levine, M. D., 1988. Energy saving resulting from the adoption of more efficient appliances : a follow-up. *The Energy Journal*, 9, 163-170.
  - Iwata, K. and Matsumoto, S., 2016. Use of hybrid vehicles in Japan : An analysis of used car market data. *Transportation Research Part D*, forthcoming.
  - Jalas, M., 2002. A time use perspective on the materials intensity of consumption. *Ecological Economics*, 41, 109-123.
  - Khazzoom, J. D., 1980. Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances. *Energy Journal*, 1(4), 21-40.
  - Larsen, B. M., Nesbakken, R., 2004. Household electricity end-use consumption : results from econometric and engineering models. *Energy Economics*, 26, 179-200.

- Mills, B. and Schleich, J., 2014. Household transitions to energy efficient lighting. *Energy Economics*, 46, 151-160.
- Mizobuchi, K., 2008. An empirical study on the rebound effect considering capital costs. *Energy Economics*, 30, 2486-2516.
- Nassen, J. and Holmberg, J., 2009. Quantifying the rebounds effects of energy efficiency improvements and energy conserving behavior in Sweden. *Energy Efficiency*, 2, 221-231.
- Parti, M., Parti, C., 1980. The total and appliance-specific conditional demand for electricity in the household sector. *Bell Journal of Economics*, 11, 309-321.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J., 2008. The rebound effect : microeconomic definitions, limitations and extensions. *Ecological Economics*, 65(3), 636-649.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J. and Sommerville, M., 2009. Empirical estimates of the direct rebound effect : A review. *Energy Policy*, 37, 1356-1374.
- Thomas, B. A. and Azevodo, I. L., 2013. Estimating direct and indirect rebound effects for U. S. households with input-output analysis Part 1 : Theoretical framework. *Ecological Economics*, 86, 199-210.
- Wang, H., Zhou, P. and Zhou, D. Q., 2012. An empirical study of direct rebound effect for passenger transport in urban China. *Energy Economics*, 34, 452-460.
- Weber, C., Perrels, A., 2000. Modeling lifestyle effects on energy demand and related emissions. *Energy Policy*, 28, 549-566.