



日本銀行ワーキングペーパーシリーズ

わが国のエネルギー効率

——企業・家計部門の動向とカーボンニュートラルに向けた含意——

青木浩介*

kaoki@e.u-tokyo.ac.jp

高橋優豊**

masato.takahashi@boj.or.jp

中島上智***

nakajima-j@ier.hit-u.ac.jp

八木智之****

tomoyuki.yagi@boj.or.jp

山田琴音*****

kotone.yamada@boj.or.jp

No.22-J-18
2022年11月

日本銀行
〒103-8660 日本郵便（株）日本橋郵便局私書箱30号

* 東京大学 ** 調査統計局（現・総務人事局） *** 調査統計局（現・一橋大学）

**** 調査統計局 ***** 調査統計局（現・政策委員会室）

日本銀行ワーキングペーパーシリーズは、日本銀行員および外部研究者の研究成果をとりまとめたもので、内外の研究機関、研究者等の有識者から幅広くコメントを頂戴することを意図しています。ただし、論文の中で示された内容や意見は、日本銀行の公式見解を示すものではありません。

なお、ワーキングペーパーシリーズに対するご意見・ご質問や、掲載ファイルに関するお問い合わせは、執筆者までお寄せ下さい。

商用目的で転載・複製を行う場合は、予め日本銀行情報サービス局（post.prd8@boj.or.jp）までご相談下さい。転載・複製を行う場合は、出所を明記して下さい。

わが国のエネルギー効率*

—— 企業・家計部門の動向とカーボンニュートラルに向けた含意 ——

青木 浩介[†]・高橋 優豊[‡]・中島 上智[§]・八木 智之^{**}・山田 琴音^{††}

2022年11月

【要 旨】

本稿では、国内外で脱炭素化に向けた取り組みが広がっていることを踏まえて、わが国のエネルギー消費原単位（エネルギー効率）の推移とその変動要因について、経済主体別に考察する。主な分析結果は次のとおり。わが国のエネルギー効率は、①まず、1970年代～1980年代には、企業部門でエネルギー節約的な技術進歩が進んだことを主因に、大幅に改善した。②その後、1990年代～2000年代前半には、総じてエネルギー効率の改善ペースが鈍化したが、③近年では、家計部門を中心に、緩やかな効率改善がみられている。近年の動きについて、家計部門に関する簡単なモデルを使って考察・試算したところ、企業部門が開発した省エネ製品を家計が購入・利用していることが、エネルギー効率改善につながっていることが窺える。カーボンニュートラルの実現に向けて、各部門において、エネルギー効率改善に向けた取り組みが進捗することが期待される。

JEL 分類番号：E21、E22、H23、Q54

キーワード：気候変動、カーボンニュートラル、エネルギー効率、技術進歩

* 本稿の作成にあたっては、亀田制作氏、陣内了氏および日本銀行のスタッフから有益なコメントを頂戴した。記して感謝の意を表したい。ただし、残された誤りは筆者らに帰する。なお、本稿の内容や意見は、筆者ら個人に属するものであり、日本銀行の公式見解を示すものではない。

† 東京大学 (kaoki@e.u-tokyo.ac.jp)

‡ 日本銀行調査統計局（現・総務人事局、masato.takahashi@boj.or.jp）

§ 日本銀行調査統計局（現・一橋大学、nakajima-j@ier.hit-u.ac.jp）

** 日本銀行調査統計局 (tomoyuki.yagi@boj.or.jp)

†† 日本銀行調査統計局（現・政策委員会室、kotone.yamada@boj.or.jp）

1. はじめに

近年、気候変動問題に対するグローバルな関心が急速に高まっており、わが国でも 2050 年のカーボンニュートラル実現に向けて、CO₂ を中心とした温室効果ガス排出量を削減するための取り組みが進められている。エネルギー消費やそれに伴う温室効果ガスの排出は、各主体の経済活動と密接に関係しており、気候変動問題への対応は、将来にわたって国内外の様々な経済主体に広範な影響を与え得る。また、脱炭素化を進めるなかで、産業構造が大きく変わる可能性もある。したがって、わが国の経済動向を考えるにあたって、気候変動問題に目配せすることは、きわめて重要である。

脱炭素化のこれまでの進展度合いについて、Kaya (1990) や IPCC (2000)、倉知ほか (2022) 等は、CO₂ 排出量の変化をエネルギー源の要因と省エネの要因に分けて評価している。すなわち、実質 GDP あたりの CO₂ 排出量は、エネルギー消費量あたりの CO₂ 排出量である「CO₂ 排出原単位 (炭素集約度)」と、実質 GDP あたりのエネルギー消費量である「エネルギー消費原単位 (エネルギー効率)」の掛け算で表されることから、CO₂ 排出量を削減するためには、炭素集約度の改善やエネルギー効率の改善が必要になる。炭素集約度は、火力発電から太陽光・風力発電へのシフト等、「電源構成」の変化によって大きく変動し得る。他方、エネルギー効率は、各経済主体の様々な取り組みによって変化し得る。企業部門では、工場 (製品の製造過程) においてエネルギー効率の改善を進めることができるほか、少ないエネルギー投入で効率的に稼働する最終製品を開発することもできる。そして、家計部門が、こうしたエネルギー効率の優れた最終商品を利用するようになれば、マクロ全体のエネルギー効率の改善につながる。つまり、エネルギーを使用する製品を製造している企業は、製造過程のエネルギー効率性と製品自体のエネルギー効率性という 2 つのチャンネルを通して、マクロ全体のエネルギー効率の動向に寄与する。

本稿では、わが国のエネルギー効率に焦点を当ててこれまでの推移を振り返り、その変動要因を局面別・部門別に議論する。エネルギー効率に関する先行研究をみると、その殆どは、企業部門に焦点を当てているのが特徴である。例えば、野村 (2021) は、過去半世紀以上の期間について、わが国のエネルギー効率を計測し、製造業の効率が改善してきたことを示している。Hamamoto (2006) や Norsworthy and Malmquist (1983) は、製造業の主要業種を対象に分析を行い、政府による環境規制が企業の研究開発を後押しし、生産性の改善に寄与していると主張している。森川 (2011) は、非製造業では、人口密度が高い地域ほどエネルギー効率が高いことを示し、都市部でのインフラ整備が環境負荷の軽減と経済成長の両立に寄与すると指摘している。

一方、近年、エコカーやエコ家電などのエネルギー効率に優れた製品の利用が進んでいることを考えると、これらの製品を生産する企業部門（製造部門）だけでなく、製品を主に利用する家計部門におけるエネルギー効率の動向にも注目することが重要である。筆者らの知り得る限り、エネルギー効率に関する研究において、こうした家計部門のエネルギー効率に着目した研究は限定的である。さらに、理論モデルに基づく分析は存在しない¹。そこで、本稿では、エネルギー効率の変動要因を経済主体別に考察したあと、近年の企業部門や家計部門の動向に着目し、理論モデルおよび実際のデータに基づく分析を行う。そのうえで、低炭素社会の実現に向けて、わが国が取り組むべき事項を検討する。

本稿の構成は次のとおりである。まず、第2節では、わが国のエネルギー効率の変遷をまとめ、その変動要因を考察する。第3節では企業部門、第4節では家計部門のエネルギー効率について、それぞれ簡単な理論モデルを使って整理したうえで、データ分析を行う。第5節はまとめである。

2. わが国のエネルギー効率

わが国のエネルギー消費原単位（エネルギー効率）の推移を振り返ると、長期的には下方トレンド（効率改善）を辿っているが、相応の振れを伴っており、1970年代～1980年代に大幅に改善したあと、1990年代～2000年代前半はそのペースが大幅に鈍化し、近年、緩やかながら再び改善の動きがみてとれる（図1）。部門別にみると、1970年代～1980年代の改善は、製造業の動きで説明できる。また、最近の改善は、家計部門が貢献していることが分かる²（図2～3）。

本節では、エネルギー効率の推移とその背景について、局面毎にやや詳しく考察することにする。その際、国全体のエネルギー効率の変動要因について部門別の寄与に分解することで、子細な分析を行う。

¹ 家計部門に言及している数少ない先行研究としては、野村（2018）が挙げられる。この研究では、わが国のエネルギー効率の改善要因として、企業部門におけるエネルギー効率改善に加えて、家計部門におけるエネルギー節約的な製品の普及を挙げている。

² マクロ全体のエネルギー効率はエネルギー供給量もしくは消費量をGDPで除して算出されることが多い。ここでの要因分解において、分子のエネルギー最終消費は、資源エネルギー庁の総合エネルギー統計を利用している。家計部門は、自家用乗用車（家庭分）を含んでいる。分母のGDPは、家計部門については国内総生産（支出側）の家計最終消費支出、製造業と運輸部門については経済活動別国内総生産（以下、製造業GDPおよび運輸GDPと記載）を用いている。統計の制約により、前者が年度ベース、後者が暦年ベースとなっていることに留意されたい。また、「その他」の原単位は、「製造業・運輸・家計以外のエネルギー消費÷（GDP－製造業GDP－運輸GDP－家計最終消費支出）」として算出している。分母について、経済活動別国内総生産と国民総生産（支出側）を用いているため、一部重複が生じていることには留意が必要である。

(フェーズ 1 : 1970 年代～1980 年代)

まず、二度にわたってオイルショックが発生した 1970 年代から 1980 年代にかけて、エネルギー効率は大きく改善した (フェーズ 1)。このフェーズのエネルギー効率改善要因として、3 点指摘できる。

第 1 に、産業構成の変化が、このフェーズ 1 におけるマクロのエネルギー効率改善に寄与したと考えられる (図 3 再掲)。この時期には、製造業において、エネルギー効率が相対的に低い素材産業から、相対的に効率の良い加工産業への転換が急速に進んだ (図 4)。また、経済が成熟化する過程で、エネルギー消費量が相対的に少ない非製造業 (サービス業) のシェアが高まったことも、マクロのエネルギー効率改善につながったとみられる。

第 2 に、製造業における効率改善がマクロのエネルギー効率改善につながったといえる (図 2～3 再掲)。1960 年代に国内外で公害被害が深刻になったが、その後、工場や自動車の排気に対して規制を導入する動きがみられ、企業は対応を迫られた。Hamamoto (2006) や Norsworthy and Malmquist (1983) は、こうした環境規制への対応が、企業のエネルギー節約的な技術進歩を促したと指摘している。そして、二度にわたるオイルショックを受けて、省エネ技術の開発がさらに進んだと考えられる。Hassler *et al.* (2012) や Popp (2002) は、オイルショック時のエネルギー価格高騰を受けて、エネルギー節約的な技術進歩やイノベーションが促進されたと主張している。

この間の規制について、自動車業界を取り巻く動きを確認すると、1970 年に米国で修正大気浄化法 (いわゆるマスキー法) が成立し、自動車による窒素酸化物 (NOx) 排出量を大幅に削減することが定められた。また、わが国でも、1978 年に自動車排出ガス規制 (昭和 53 年規制、いわゆる日本版マスキー法) が成立した。伊藤・浦島 (2013) は、米国では大手企業の反対を受けて上記規制が施行されなかった一方、わが国では新規制にもとづいて各メーカーが新エンジンを開発し、国際競争力の強化につながったと述べている。また、化学業界では、高度経済成長期における公害問題を受けて政府主導で技術転換が進み、このことがエネルギー効率の改善にもつながったとされている (経済産業省産業構造審議会 (2021))。これらの点は、枝村 (2020) が指摘するように、適切に設計された環境規制は技術革新を促進し生産性を高め得るという「ポーター仮説」が成立した事例であるといえよう。

第 3 に、非製造業におけるエネルギー効率も改善したとみられる。オフィスなどにおいて、オイルショックを契機に省エネが進んだことが影響していると考えられる (資源エネルギー庁 (2021))。

（フェーズ 2：1990 年代～2000 年代前半）

次に、フェーズ 2（1990 年代から 2000 年代前半）では、製造業における効率改善ペースの鈍化を背景に、マクロ全体でもそのペースが大幅に鈍化した（図 1～3 再掲）。わが国では、フェーズ 1 において、他の先進国に先駆けて厳しい排ガス規制等が導入され、他国よりも速いペースで効率改善がみられたが、フェーズ 2 では改善の動きが一服したといえる。資源エネルギー庁（2021）では、1980 年代後半以降、原油価格が低位で安定していたために、製造業のエネルギー効率改善が進まなかったと評価している。この間、欧州諸国等では、規制の導入や対応が進んだ。

このフェーズでは、非製造業部門が含まれる「その他」の効率改善ペースが悪化していることも特徴的である。また、家計部門のエネルギー効率は、やや振れが大きいが、2000 年頃にかけて、悪化していたとみられる³。原油価格が低位で安定するなか、製造業と同様、効率改善が進まなかった可能性が考えられる。また、バブル崩壊に伴う経済活動の停滞も、エネルギー効率改善ペースの鈍化につながった可能性がある⁴。非製造業については、OA 化の進展などがエネルギー消費の増加を招き、その結果としてエネルギー効率が悪化した可能性もある。

（フェーズ 3：2000 年代半ば以降）

そして、フェーズ 3（2000 年代半ば以降）におけるエネルギー効率は、フェーズ 1 対比で緩やかながら、再び改善方向に動いている（図 1～3 再掲）。部門別にみると、製造業の効率改善ペースは、相対的に緩やかなものとなっているが、家計における効率が大幅に改善しており、マクロのエネルギー効率改善につながっている。製造業の製造過程における効率改善ペースは鈍化しているものの、エネルギー効率に優れた自動車（以下、エコカー）や家電（以下、エコ家電）の製造および販売が増加し、家計部門における最終製品の消費や利用過程でのエネルギー効率改善が進んでいるとみられる。このほか、非製造業でも、省エネ型の空調機器などの普及によって、エネルギー効率が改善しているとみられる。

このように、エネルギー効率改善のドライバーが、企業部門での製品の製造過程から、家計部門での利用過程（使用する消費財のエネルギー効率改善）へとシフトしているとみられることは大変興味深い。次節以降では、エネルギー効率の

³ 総合エネルギー統計では、1990 年度以降の数値について算出方法が変更されており、とくに家計分について段差が生じていることに留意。詳しくは、資源エネルギー庁（2021）を参照のこと。

⁴ Nakamura *et al.* (2019) や八木ほか (2022) では、わが国の経済成長や生産性の推移についてまとめている。

変動要因について、部門別（企業部門・家計部門）に簡単なモデルを用いて、より深く考えてみることにする。

3. 企業部門のエネルギー効率

3-1. モデル

前節では、企業部門（製造業）のエネルギー効率について、1980年代にかけて改善したあと、1990年代～2000年代前半に低迷し、その後は緩やかに改善したことを確認した。企業の技術革新に関して、Hicks (1932) は、生産要素の相対価格が変化すると、高価になった生産要素を節約するような技術が生まれると主張している。つまり、エネルギー価格が上昇すると、「エネルギー節約的な技術進歩」が生まれるという考え方である。

この点について、簡単なモデルを用いて説明することにする。次のとおり、資本、労働とエネルギーを生産要素とする代表的企業の生産関数を考えてみよう。

$$Y = F(K, L, E_f) = \left\{ (A_K K)^{1-\sigma} + (A_L L)^{1-\sigma} + (A_E E_f)^{1-\sigma} \right\}^{\frac{1}{1-\sigma}} \quad (1)$$

Y は生産量、 K は資本投入量、 L は労働投入量、 E_f は（企業の）エネルギー投入量、 A_K と A_L はそれぞれ資本と労働に関する生産性、 A_E はエネルギー利用に関する生産性を示す⁵。 σ (≥ 0) は生産要素の代替性を示している。なお、 σ が1に近づく極限では、(1)式はコブ・ダグラス型の生産関数となる。資本、労働とエネルギーの投入価格を、それぞれ P_K 、 w 、 P_E とすると、費用最小化問題は、

$$\begin{aligned} \min_{K, L, E_f} P_K K + wL + P_E E_f \\ \text{s. t. } F(K, L, E_f) = Y \end{aligned} \quad (2)$$

と書くことができ、ラグランジュ関数は、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(K, L, E_f, \lambda) \\ = P_K K + wL + P_E E_f + \lambda \left[Y - \left\{ (A_K K)^{1-\sigma} + (A_L L)^{1-\sigma} + (A_E E_f)^{1-\sigma} \right\}^{\frac{1}{1-\sigma}} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

⁵ 企業部門と家計部門のエネルギー投入を区別するために、企業のエネルギー投入量を E_f と表記している。この場合の下付き添え字 f は企業 (firm) を表している。なお、第4節においては、家計のエネルギー投入量を E_h と表記している。この場合の下付き添え字 h は家計 (household) を表している。

となる。費用最小化のための一階の条件は、

$$P_K = \lambda \left\{ (A_K K)^{1-\sigma} + (A_L L)^{1-\sigma} + (A_E E_f)^{1-\sigma} \right\}^{\frac{\sigma}{1-\sigma}} \cdot (A_K K)^{-\sigma} \cdot A_K \quad (4)$$

$$w = \lambda \left\{ (A_K K)^{1-\sigma} + (A_L L)^{1-\sigma} + (A_E E_f)^{1-\sigma} \right\}^{\frac{\sigma}{1-\sigma}} \cdot (A_L L)^{-\sigma} \cdot A_L \quad (5)$$

$$P_E = \lambda \left\{ (A_K K)^{1-\sigma} + (A_L L)^{1-\sigma} + (A_E E_f)^{1-\sigma} \right\}^{\frac{\sigma}{1-\sigma}} \cdot (A_E E_f)^{-\sigma} \cdot A_E \quad (6)$$

である。これらの条件を用いると総費用に占めるエネルギー支出シェアは、

$$\frac{P_E E_f}{P_K K + wL + P_E E_f} = \frac{1}{\left(\frac{P_K/A_K}{P_E/A_E} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \left(\frac{w/A_L}{P_E/A_E} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + 1} \quad (7)$$

で与えられる。生産要素間の代替性が低い ($\sigma > 1$) 場合、 A_E の増大は他の条件を一定として総費用支出に占めるエネルギー支出の割合を低下させる。その意味で、 A_E の増大はエネルギー節約的な技術進歩を表す。エネルギー価格 (P_E) が上昇する局面において、企業はエネルギー節約的な技術進歩を進めることで A_E を改善させ、エネルギー価格上昇の影響を緩和しようと考えられる。

ここで、第 2 節で示したエネルギー消費原単位と、本節で議論している企業のエネルギー利用に関する生産性 (A_E) の関係について、触れておきたい。企業のエネルギー消費原単位 (θ_f) は、エネルギー消費量と企業部門における付加価値の比率であるので、次式で表わされる。

$$\theta_f = \frac{E_f}{(P_K K + wL - P_E E_f)/P_f} \quad (8)$$

ただし、 P_f は企業支出に関するデフレーターである。ここでは、完全競争市場を考えており、企業部門の付加価値に関しては、生産関数が一次同次であり、付加価値が資本と労働に分配されることを想定しているほか、中間投入はエネルギーのみと仮定している。これに (4)~(6) 式の関係式を代入すると、

$$\theta_f = \frac{P_f/P_E}{\left(\frac{P_K/A_K}{P_E/A_E} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \left(\frac{w/A_L}{P_E/A_E} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} - 1} \quad (9)$$

となる。したがって、上記と同様、生産要素間の代替性が低い場合、 A_E の改善は、企業部門のエネルギー消費原単位の改善につながる事が分かる。加えて、エネルギー消費原単位は、(9) 式のとおり、それぞれの相対価格の影響を受ける。

こうしたエネルギー価格と技術進歩の関係について、先行研究でもいくつか考察がみられている。*Acemoglu et al. (2019)* は、上記の議論と同様に、エネルギー価格の上昇と技術進歩が同時に進む可能性を示している。そして、2000年代のシェール革命の結果、エネルギー価格が低下し、電力等のクリーンエネルギー源への転換に向けた技術進歩（エネルギー節約的な技術進歩）が進まなかったと指摘している。また、*Acemoglu et al. (2012)* は、生産過程において汚染物質を発生させる「ブラウン部門」と汚染物質を発生させない「グリーン部門」の2部門モデルを構築し、企業は既に技術が蓄積されているブラウン部門での研究開発を優先する傾向があると主張している。ただし、エネルギー価格が上昇するケースや、政府がクリーンエネルギー開発に対する補助金を支給するケースでは、グリーン部門でクリーンエネルギーを用いた技術進歩が生じる可能性がある」と指摘している。

3-2. 企業部門のエネルギー節約的な技術進歩に関する試算

こうした企業部門の技術進歩を実際に計測した先行研究としては、*Jin and Jorgenson (2010)* が挙げられる。この研究では、上述の *Hick (1932)* の議論をベースに、他の生産要素（資本や労働等）対比でみて、エネルギー投入量を減らす（エネルギー分配率を低下させる）ようなエネルギー節約的な技術進歩の計測を試みている（計算方法の詳細は補論参照）。*Jin and Jorgenson (2010)* は、1960～2005年の米国を対象に推計を行い、1980年頃からエネルギー節約的な技術進歩が生じたとの結果を得ている。*Fukunaga and Osada (2009)* は、*Jin and Jorgenson (2010)* に倣って、わが国におけるエネルギー節約的な技術進歩を計測している。ここでは、技術進歩は単なる生産要素間の代替ではなく、全要素生産性（TFP）を上昇させるものとして捉えている。本稿では、1970～2008年を分析対象とした *Fukunaga and Osada (2009)* の分析をもとに、推計期間を最近まで伸ばした推計を試みた。

推計結果からエネルギー節約的な技術進歩の推移をみると、オイルショックでエネルギー価格が大幅に上昇したあと、1980年代（前節のフェーズ1）にエネルギー節約的な技術進歩が大きく進んだことが確認できる（図5）。1990～2000年代（フェーズ2）ではエネルギー節約的な技術進歩の停滞が続いたが、2010年代（フェーズ3）はエネルギー節約的な技術進歩が小幅ながら再び進んだ可能性が窺える⁶。ただし、フェーズ2以降も、世界金融危機前の2000年代

⁶ 小川ほか（2009）が議論しているとおり、ここで計測しているエネルギー節約的な技術進歩は、生産要素の分配率を変化させるような技術進歩を捉えようとしている（補論も参照のこと）。こうした技術進歩がエネルギー原単位に与える影響は、生産要素間の代替性に依存すると考えられる。第3-1節で議論したように、この代替性が低い場合には、エネルギー節約的な技術進歩は、

等、エネルギー価格が大幅に上昇する場面はみられている。上述のモデルでは、こうした場面ではエネルギー節約的な技術進歩が促されると考えたが、前掲図 5 において、なぜ、フェーズ 1 のようなエネルギー節約的な技術進歩の大幅な進展は確認できないのだろうか。エネルギー効率の観点において、企業の取り組みスタンスが後退したことも、可能性としては指摘し得るが、エコカーやエコ家電といったエネルギー効率的な最終製品の開発が推進されていることを考えると、エネルギー節約に関する企業の前向きな取り組みスタンスは継続しているとみられる⁷。本節における生産関数の議論で捕捉可能なエネルギー節約的な技術進歩は、あくまでも製造過程（工場）における技術進歩である。この間、生産の自動化等が既に進んでおり、この工程でのエネルギー節約的な技術進歩の実現余地が低下した結果、エネルギー価格上昇局面でも、過去に比べてエネルギー節約的な技術進歩が目立って変動しなくなった可能性がある⁸。そして、企業は、最終製品自体のエネルギー効率改善（省エネ製品の開発）に向けた取り組みにより注力している可能性が指摘できる。

次節では、今後のわが国エネルギー効率改善に向けてきわめて重要な役割を果たすと考えられる家計部門のエネルギー効率について考察することにした。

4. 家計部門のエネルギー効率

4-1. モデル

まず、前掲図 3 の家計部門のエネルギー消費原単位について、エネルギー消費量と名目消費、デフレーターに分解すると、近年の効率改善は、エネルギー消費量の減少が主因となっている⁹（図 6）。この点を踏まえて、本節では、家計部門のエネルギー動向に焦点を当て、家計支出に関するモデルを考える。

一般的に、家計のエネルギー消費量減少やエネルギー支出シェア下落には 2 つ

総支出に占めるエネルギー支出の割合を低下させ、エネルギー原単位の改善につながるとみられる。

⁷ なお、企業の技術進歩の状況を評価する際には、企業の選択によって内生的に技術進歩の偏りが転換されるまでの間には、一定のラグが存在する可能性にも留意が必要である（小川ほか（2009））。本稿では静学モデルを考えているが、この点を踏まえると、動学モデルへ拡張することも有益だと考えられる。

⁸ 野村（2018）は、フェーズ 2 において、利用可能な省エネ技術が減少し、エネルギー効率を高めるための限界費用が増加した可能性を指摘している。

⁹ なお、図 6 をみると、1975～2000 年頃にかけて、家計部門では、名目消費の増加がエネルギー消費原単位の改善に、物価上昇（個人消費デフレーター上昇）がエネルギー消費原単位の悪化に、それぞれ寄与していることが分かる。

の経路が考えられる。第1は、エネルギーを使う財（以下、エネルギー使用財）の消費量や消費シェアが減少する経路である。例えば、環境意識の高まりによって人々が自動車や電化製品の消費量を減らせば、エネルギー消費量が減少する。また、経済のサービス化に伴って全消費に占めるエネルギー使用財のシェアが減少すれば、環境意識に変化がなくともエネルギー支出のシェアが下落する¹⁰。第2は、家計がエネルギー効率に優れた財を購入し、それを使用する経路である。自動車の燃費向上や電化製品のエネルギー効率改善がそれに相当する。この経路は、消費者の環境意識の高まりや省エネ指向に対応して、企業が生産・販売する財のエネルギー効率を向上させることによって達成される¹¹。前節で議論したとおり、この経路における企業努力は、企業部門のエネルギー節約的技術進歩には必ずしも計上されないと考えられる。

第1の経路について、経済のサービス化は進んでいるとみられるが、そのスピードは近年緩やかである¹²。また、環境意識の高まりはみられているものの、エネルギー使用財の利用をやめる動きが広がっているとは考えにくい。そこで、本節では第2の経路、すなわちエネルギー使用財の効率改善に焦点を当てる。以下では簡単な静学モデルを用いて家計が消費するエネルギー使用財の効率について考察するとともに、この効率の計測を試みる。

具体的には、「エネルギー」、「エネルギー使用財」、「非エネルギー使用財」の3財モデルを考える。代表的家計は、「エネルギー使用財」と「非エネルギー使用財」の消費から効用を得る。エネルギー使用財は、その製品を保有するだけでは利用価値がなく、エネルギーを投入することで利用することができる財であり、ガソリン等を必要とする自動車や電気を必要とする電化製品が該当する。非エネルギー使用財は、利用にあたって消費者がエネルギー投入を必要としない財であり、机や椅子等の財が該当する。また、サービス消費については、消費者自身はエネルギーを投入する必要がないと考え、非エネルギー使用財に含まれ

¹⁰ 経済の成熟化に伴ってサービス化が進行することの説明としては、主に2つの仮説が存在する。第1の仮説は、財とサービスの所得弾力性に着目するものである。財よりもサービスの所得弾力性が高い場合には、経済が成長するにしたがってサービスの消費支出シェアが増大すると考えられる。第2の仮説は、財部門とサービス部門の生産性上昇率の違いに着目するものである。財部門の生産性上昇率がサービス部門の生産性上昇率よりも高く、そして消費者サイドにおける財とサービスの代替弾力性が十分に小さければ、経済が成長するに従ってサービスの消費支出シェアが増大する。こうした経済の構造変化に関する研究の展望論文としては、Herrendorf *et al.* (2014) を参照されたい。

¹¹ 前節まででは、実質GDPあたりのエネルギー消費量であるエネルギー消費原単位について、主に議論してきたが、本節では、財モデルを扱っており、各財の燃費や消費効率をエネルギー効率という言葉で表わすことにする。両者の関係については、第4-2節で議論している。

¹² 例えば、GDP国内家計最終消費支出に占めるサービス支出の割合は、2000年代(平均58.8%)から2010年代(同59.1%)にかけて、ごく緩やかな増加にとどまっている。

ると仮定する。

本稿では、エネルギー使用財をエネルギーとの完全補完財としてモデル化する。例えば、上述のように、エネルギー使用財を自動車、エネルギーをガソリンとすると、これらから効用を得るためには、どちらか一方ではなく、双方が必要であり、両者は完全補完の関係にある¹³。すなわち、家計が得る効用 C は以下のレオンチェフ型の効用関数で与えられると仮定することができる。

$$C = \min\{B_E E_h, M\} \quad (10)$$

ここで、 B_E は財のエネルギー効率（燃費）、 E_h は（家計の）エネルギー使用量、 M はエネルギー使用財の投入量を表す。 B_E の値が大きいということは、同じ効用を達成するために必要なエネルギー消費が少なくなるという意味で、家計部門のエネルギー効率の改善を意味している。

自動車の燃費や電化製品のエネルギー効率は、企業の製品開発・設計によって決定されるので、家計がそれを変化させる（すなわち、 C を一定として E_h と M の投入比率を変化させる）余地はほとんどないであろう。その意味で（10）式の仮定は現実的といえる。また、以下では家計が B_E を所与として行動をする と仮定するが、 B_E が製品の性能を表すという観点からすれば、その仮定も現実的である¹⁴。

次に、エネルギー使用財と非使用財から得られる効用を、

$$U = U(C, G) \quad (11)$$

と仮定する。ここで、 G は非エネルギー使用財の消費を表す。関数 U は効用関数の標準的な仮定を満たす凸関数である。

最後に家計の予算制約を定義する。今期の名目総支出額を I とすれば家計の予算制約は、

$$P_E E_h + P_M M + P_G G = I \quad (12)$$

¹³ ミクロ経済学において、「自動車」と「ガソリン」、自動車の「車体」と「タイヤ」のように、どちらかだけが存在しても、また、どちらかの数だけ増えても意味がないような場合、つまり双方が揃ってはじめて利用価値がある場合、双方が完全補完であると説明される。これらのケースでは、常に同じ比率での投入が行われることになり、その効用関数は、レオンチェフ型で示される。

¹⁴ 実際には、環境意識の高まりやエネルギー価格の変化などを誘因とした消費者行動の変化の結果として B_E が変化する場合もあると思われる。例えば、多くの消費者が購買可能な自動車の選択肢のなかから低燃費の自動車を購入すれば、経済全体の B_E が向上する。本稿ではエネルギー使用財は1財のみと仮定しているため、このメカニズムは捨象されている。

で与えられる¹⁵。エネルギー使用財に関する支出は、財購入費用 ($P_M \times M$) とエネルギー費用 ($P_E \times E_h$) からなる。ここで、 P_M はエネルギー使用財の名目価格、 P_E は名目エネルギー価格をそれぞれ示す。また、非エネルギー使用財の支出は $P_G \times G$ で表される。ただし、 P_G は非エネルギー使用財の名目価格である。

さて、家計は (10) 式と (12) 式の制約の下で効用関数 (11) 式を最大化するために E_h 、 M 、 G を選択する。その際、価格 (P_E 、 P_M 、 P_G) およびエネルギー効率 B_E は家計にとって所与である。家計の効用最大化問題は 2 段階に分解して考えると理解しやすい。第 1 段階はエネルギーとエネルギー使用財への支出問題である。エネルギーとエネルギー使用財に関してはレオンチェフ型効用関数を仮定したため、それらの最適消費は、

$$C = B_E E_h = M \quad (13)$$

を満たす。これを用いるとエネルギー使用財に関連する支出 X は、

$$X = P_E E_h + P_M M = \left(\frac{P_E}{B_E} + P_M \right) M \quad (14)$$

と書ける。(13) 式より $C = M$ なので、上式は次のように書ける。

$$X = P_E E_h + P_M M = \left(\frac{P_E}{B_E} + P_M \right) C \equiv QC \quad (15)$$

Q はエネルギー使用財消費 1 単位あたりの支出 (エネルギー支出と財購入費用の和) と解釈できる。

第 2 段階目は、エネルギー使用財と非使用財の選択問題である。(15) 式を用いれば、家計の予算制約 (12) 式は

$$QC + P_G G = I \quad (16)$$

と書き直すことができる。家計は (16) 式の制約の下で (11) 式を最大化すべく C と G を選択する。(15) 式と (16) 式から明らかなように、エネルギー効率の改善 (B_E の上昇) は、 Q の低下につながり、エネルギー使用財の非使用財に対する相対価格を押し下げる効果を持つ。

¹⁵ 本稿では静学モデルを仮定しているが、動学モデルにおいて今期の支出額 I が動学的効用最大化問題により最適に選ばれると解釈しても良い。エネルギー効率に関する後の分析には影響を与えない。

4-2. エネルギー効率とエネルギー支出シェア

上記の枠組みを用いて、家計のエネルギー支出シェアの変動要因を分析することにしよう。まず、経済学的な解釈を容易にするために、 B_E と家計支出に占めるエネルギー支出シェア (S_E) の関係を導出しておく。

(13) 式より、 B_E は、

$$B_E = \frac{M}{E_h} \quad \left(\Leftrightarrow E_h = \frac{M}{B_E} \right) \quad (17)$$

で与えられる。次に、 S_E は以下のように定義される。

$$S_E = \frac{P_E E_h}{P_E E_h + P_M M + P_G G} \quad (18)$$

(18) 式の分母は名目総消費支出である。これに (17) 式を代入すると、

$$S_E = \frac{P_E \frac{M}{B_E}}{P_E \frac{M}{B_E} + P_M M + P_G G} \quad (19)$$

となり、さらに変形すると、

$$S_E = \frac{\frac{P_E}{P_M}}{\frac{P_E}{P_M} + \frac{P_M M + P_G G}{P_M M} B_E} \quad (20)$$

となる。ここで、「エネルギー以外の家計支出」に占めるエネルギー使用財のシェアを S_M とすると、

$$S_M = \frac{P_M M}{P_M M + P_G G} \quad (21)$$

と書くことができる。 S_M には、エネルギー支出は含まれず、家計がエネルギー使用財とエネルギー非使用財のどちらを選好しているかを示している。これを (20) 式に代入すると、

$$S_E = \frac{\frac{P_E}{P_M} S_M}{\frac{P_E}{P_M} S_M + B_E} \quad (22)$$

となる。なお、シェア変数 (S_E , S_M) は、0 と 1 の間にある。

以上の整理に基づくと、エネルギー支出シェア (S_E) の変動要因は以下のように考えることができる¹⁶。第 1 に、エネルギー以外の家計支出に占めるエネルギー使用財の割合 (S_M) が増加すると、エネルギー使用量も増加し、 S_E が上昇する。わが国では、自動車や電化製品が普及した 1960～90 年代にみられた現象であると考えられる。第 2 に、財のエネルギー効率が改善 (B_E が上昇) すると、 S_E が低下する。近年、省エネ製品が普及し、従来製品から置き換わる過程でみられている現象であると考えられる。第 3 に、エネルギー価格が相対的に上昇 (P_E/P_M が増加) すると、 S_E が上昇する。

ここで、第 2 節で示したエネルギー消費原単位と、本節で議論している財のエネルギー効率 (B_E) の関係を整理しておきたい。家計のエネルギー消費原単位 (θ_h) は、エネルギー消費量と実質最終消費支出の比率であるので、次式で表わされる^{17,18}。

$$\theta_h = \frac{E_h}{(P_E E_h + P_M M + P_G G)/P_C} \quad (23)$$

ただし、 P_C は家計消費デフレーターである。これに (18) 式を代入すると、

$$\theta_h = \frac{P_C}{P_E} \cdot S_E \quad (24)$$

となるので、家計のエネルギー消費原単位は、先ほど議論したエネルギーの消費支出シェア (S_E) に加えて、エネルギーの相対価格 (P_E/P_C) の影響を受ける。さらに (22) 式の関係を利用すると、

$$\theta_h = \frac{\frac{P_C}{P_M} S_M}{\frac{P_E}{P_M} S_M + B_E} \quad (25)$$

と書くことができる。つまり、家計のエネルギー消費原単位は、財のエネルギー効率 (B_E) の影響を受けるほか、エネルギー使用財のシェア (S_M) や、エネルギー使用財とエネルギーの相対価格 (P_E/P_M)、エネルギー使用財と物価全般 (家計消費デフレーター) の相対価格 (P_C/P_M) といった要因によっても変動すること

¹⁶ 他の条件が一定と仮定した場合の議論であることに留意されたい。

¹⁷ なお、エネルギー消費原単位や財のエネルギー効率を算出する際、エネルギー使用量 (E_h) は今期だけでなく、前期までに購入した財を利用したときに利用されるものである一方、エネルギー消費原単位の分母 (最終消費支出) やエネルギー効率の分子 (エネルギー使用財の投入量) は今期のもとなる。

¹⁸ 実際には、家計最終支出には、居住者家計の海外での直接購入等も含まれるが、ここでは捨象することにする。

が分かる。例えば、財のエネルギー効率の改善 (B_E の上昇) は、エネルギー消費原単位の改善 (θ_h の低下) につながる。また、それぞれの相対価格が一定であるとき、家計がエネルギー使用財を積極的に購入すると、エネルギー使用財の割合 (S_M) が増加し、エネルギー消費原単位の悪化方向に作用する。ただし、その際に購入した財が省エネ製品であれば、 B_E の改善を伴うと考えられるため、エネルギー消費原単位の悪化が緩和される、ないし原単位の改善方向に作用するとみられる。

最後に、財のエネルギー効率 (B_E) について議論する。議論を分かりやすくするため、(17) 式の分母と分子にそれぞれ $P_M \cdot P_E$ を掛け合わせると、

$$B_E = \frac{P_M M}{P_E E_h} \cdot \frac{P_E}{P_M} \quad (26)$$

となるので、エネルギー使用財とエネルギーへの名目支出の比率 ($P_M M / P_E E_h$) とその相対価格 (P_E / P_M) を用いて家計エネルギー効率 B_E の値を求めることができる。これは効用関数がレオンチェフ型であるという仮定に基づくものである。ここでは、エネルギー使用財が1種類のみを想定しており、 B_E は家計にとって外生変数となる。ただし、現実にはエネルギー効率が異なる財が複数存在しているので、それらの財に対する家計の相対的な消費量が変化すれば、マクロ経済全体で計測した財のエネルギー効率 (B_E) が変化することも考えられる。

例えば、エネルギー使用財とエネルギーの相対価格が一定であるとき、家計が省エネ製品の購入を進めれば、エネルギー支出に対するエネルギー使用財の支出 ($P_M M / P_E E_h$) が増加し、財のエネルギー効率の改善につながる。逆に、家計がエネルギー効率の悪い製品の購入を進めればエネルギー支出が増加し、($P_M M / P_E E_h$) は、上記のときに比べて減少するとみられるため、財のエネルギー効率の悪化につながる。さらに、エネルギーの相対価格が上昇するとき、それを受けて家計がエネルギー節約的な行動にシフトすれば、財のエネルギー効率は改善すると考えられる¹⁹。以下で計測される B_E の変化は、このような家計の行動変化も含むものとして解釈するのが妥当であろう。

¹⁹ エネルギーの相対価格上昇のみが生じ、家計行動が変わらなければ、当然ながら財のエネルギー効率は変わらない。

4-3. 家計部門のエネルギー効率に関する試算

(試算方法)

ここまでの議論をもとに、わが国のデータを用いて家計の支出シェア (S_E 、 S_M) や相対価格 (P_E/P_M)、エネルギー効率 (B_E) の計算を試みる。具体的には、(18) 式、(21) 式、(26) 式の関係等を使って計算することにする。エネルギーとエネルギー使用財の相対価格について、 P_E は、総務省「消費者物価指数」のエネルギー価格を用いる。 P_M は、経済産業省の「生産動態統計」の販売金額と販売数量から品目別の平均単価を算出し、それを支出ウェイトで加重平均したものを用いることにする。 P_{MM} や P_{GG} 、 $P_E E_h$ を計算する際は、総務省「家計調査」を利用する²⁰。それぞれ、1990～2020年の年次計数を用いる。

(試算結果)

主要変数の推移や試算結果は、図 7～10 のとおりである。まず、各変数の推移を確認すると、家計支出に占めるエネルギー支出の割合 (S_E) は、上昇基調を辿っていたが、近年は横ばい圏内の動きとなっている。エコカーやエコ家電の普及、主要耐久財のエネルギー効率改善が、近年のトレンド変化につながっている可能性がある (図 11～13)。エネルギー以外の家計支出に占めるエネルギー使用財の割合 (S_M) は、振れを伴いつつも、期間を通じて横ばい圏内の動きにみえる (図 8 再掲)²¹。また、エネルギーの相対価格 (P_E/P_M) は、エネルギー価格と概ね同様の動きとなっており、2010年半ばにかけて上昇したあと、低下している²² (図 9 再掲)。

図 10 は、エネルギー効率 (B_E) の試算結果である。エネルギー効率は、2000年代半ばにかけて悪化したあと、その後は改善傾向にある。まず、2000年代半ばにかけての効率悪化局面は、第 2 節で整理したフェーズ 2 に概ね該当するが、変動要因として次のような考察が可能である。第 1 に、この局面では、原油価格が低水準で推移するなか、家計部門において、それまでのエネルギー節約的な行

²⁰ エネルギー使用財について、(26) 式では、1 種類のみとしているが、ここでは次の財の集合体をひとつの「エネルギー使用財」と見做している。集計対象品目は、家電 (電気冷蔵庫、電気洗濯機、エアコン、テレビ、電子レンジ、電気炊飯器、電気掃除機、パソコン (デスクトップ型)、パソコン (ノート型)、プリンター) と自動車 (軽乗用車、小型乗用車、普通乗用車) の計 13 品目である。主要品目を抽出しているものの、それでも限られた集計対象を用いての分析であることに留意されたい。

²¹ S_M は、経済のサービス化等によって低下することも考えられるが、第 4-1 節でみたとおり、現時点では、データで確認できるほどの明確な変化は生じていない可能性が高い。

²² なお、2020年以降のエネルギー価格は、新型コロナウイルス感染症の拡大当初に下落したあと、その回復局面において、ウクライナ情勢もあって大幅に上昇している。

動が一服し、エネルギーをより消費する財を選択した可能性が考えられる²³。第2に、エネルギー使用財の内訳がエネルギー使用的に変化した可能性が考えられる。例えば、高度経済成長期以降、生活様式が大きく変化し、相対的にエネルギーを多く使用するエアコン等の普及が進んだことなどが、マクロのエネルギー効率の悪化方向に作用したと考えられる（図14）。なお、上述のとおり、この局面では、家計支出に占めるエネルギー支出シェア（ S_E ）の上昇が確認できる。

2000年代半ば以降は、振れを伴いつつも、エネルギー効率が改善していることが窺える。この局面は第2節で整理したフェーズ3に該当し、エコカーやエコ家電の普及等を背景にエネルギー効率が改善しているとみられる（前掲図8～10）²⁴。上述のとおり、この局面ではエネルギー支出シェア S_E がそれまでの上昇トレンドから横ばい圏内の動きへ移行している。特に、2010年代後半、エネルギーの相対価格（ P_E/P_M ）が低下するなかでエネルギー効率が高い製品の利用が進んだことは、エネルギー支出シェア上昇の頭打ちにつながったと考えられる。

なお、1990年頃から直近まで、本節で計算した家計のエネルギー効率（ B_E ）は、図2でみた家計のエネルギー消費原単位と概ね同様の動きとなっており、エネルギー消費原単位の動きは、主に財のエネルギー効率の動きで説明できると推察される。ただし、やや子細にみると、エネルギー効率の動きは比較的振幅が大きくなっており、エネルギー消費原単位とエネルギー効率の動きが異なる場面もみられる。また、前者が近年大きく改善しているのに対して、後者の改善幅は限られている。こうした変動の背景としては、以下の要因が考えられる。まず、本節の分析ではエネルギー使用財として、エコカーや家電製品などの限られた製品を抽出しており、このことがエネルギー効率などの計算結果に影響を及ぼしている可能性がある。例えば、図13のとおり、近年ではエネルギー効率に優れた住宅関連財の普及が進んでいるが、本分析のエネルギー効率の計算にこの要素は含まれていない。加えて、エネルギー消費原単位は、(25)式のとおり、エネルギー効率以外の要因（各種の相対価格やエネルギー使用財のシェア）の影響を受け得る。エネルギー消費原単位の改善には、政府の購入支援策による補助金等を含めた実質的な相対価格の変化や、それに伴う省エネ製品の普及が、近年大きく影響していると考えられる。

²³ 例えば、家計において乗用車の大型化が進んだことが表れているかもしれない。これらの消費者行動の変遷は本稿のモデルでは捉えられておらず、将来の分析課題である。

²⁴ これには、東日本大震災に伴う福島原発事故を契機に、節電が大規模に行われたことや、エネルギー効率の高い家電（LED電球等）が普及したことも関係しているとみられる。

この点、エネルギー効率の改善に関して、政府部門が果たす役割についても考察しておきたい。2000年代後半以降、政府はエネルギー効率に優れた自動車や家電について、その普及を後押しするべく、複数の購入支援策を導入した²⁵。さらに、近年は、エコカーの普及に向けて、複数の省庁や自治体が、その研究開発費用の補助や、エコカー購入やインフラ整備に関する補助金、減税措置など、多くの支援策を導入している²⁶。企業部門がエネルギー節約的な最終製品の開発に取り組み、家計部門がこうした製品について、政府部門のサポートも得て購入を進めていることが、近年の家計におけるエネルギー効率改善につながっていると考えられる（Yoshida *et al.* (2010)、板ほか (2012)、東・河田 (2017)）。

この点に関連して、Acemoglu *et al.* (2012) は、グリーン部門（エネルギー効率に優れた製品を生産する部門）の研究開発やその利用には正の外部性があるにもかかわらず、市場の自由選択では十分に活用されない可能性を示している。例えば、エネルギー効率に優れた新商品は、その発売直後を中心に従来商品に比べて価格が高い傾向があるが、新商品に正の外部性があっても、こうした価格差がその普及を妨げる可能性がある。政府部門による家計や企業部門に対する支援によって、この外部性を取り込むことができると考えられる。とくに、エネルギー効率に優れた新商品の購入支援策は、政策オプションとして有益であると考えられる。

5. まとめ

本稿では、わが国のエネルギー効率の推移を振り返り、1970年代～1980年代に大幅に改善したあと、1990年代～2000年代前半にその改善ペースが鈍化し、近年、再び緩やかな改善がみられることを確認した。そのうえで、部門（企業部門・家計部門）別に、簡単なモデルを用いて、エネルギー効率の変更要因を分析した。また、政府部門が果たす役割についても考察した。主な分析結果は、次のとおり。

まず、1970～1980年代は、企業部門（製造業）においてエネルギー節約的な技術進歩が進み、このことがマクロのエネルギー効率改善につながったとみられる。次に、近年におけるエネルギー効率改善のドライバーは、企業部門から家計部門にシフトしている。これは、企業部門（製造業）における技術進歩が止ま

²⁵ 環境性能に優れた自動車は補助金や減税、一定の省エネ基準を満たしたテレビやエアコン等はポイント付与の対象となった（詳細は、経済産業省・国土交通省 (2012) や環境省ほか (2011)、東・河田 (2017) に詳しい）。

²⁶ 例えば、企業向けではEV等に使われる電池の研究開発支援策、個人向けではエコカー購入支援策が設けられている。

ったというよりは、製造過程におけるエネルギー節約的な技術進歩の実現余地が低下する一方、企業が最終製品のエネルギー効率改善に向けた取り組みを続け、家計がそれを購入・利用していることを映じた動きである。なお、エネルギー効率に優れた新商品は、従来商品に比べて価格が高い傾向にあるが、政府部門の支援によって両者の価格差を調整することは、新商品の普及を促すとみられる。近年、政府はエネルギー効率に優れた自動車等に対する購入支援策を行ってきたが、このことは、新商品の普及を促し、マクロのエネルギー効率改善に寄与していると考えられる。

近年、気候変動問題に対するグローバルな関心が高まっており、わが国でも脱炭素化に向けた動きを加速させることが求められている。本稿での議論を踏まえれば、カーボンニュートラルを実現するためには、企業部門・家計部門・政府部門の各部門において、エネルギー効率改善に向けた取り組みを推し進めることが期待される。

最後に、今後の研究課題に触れておきたい。まず、本稿では、企業部門と家計部門のそれぞれについて、エネルギー効率に関するモデルを考察した。当然ながら、各部門の行動は相互依存的に動き得る。この点を踏まえて、本稿のモデルをさらに発展させ、両部門の動きを統一的に考えることは今後の課題である。その際、モデルを動学的なものに変更することもできるかもしれない。また、本稿における実証分析（第4-2節）は、2020年までのデータを用いて考察している。新型コロナウイルス感染症からの回復局面において、ウクライナ情勢もあって、エネルギー価格が大きく上昇しているが、こうした局面における各部門の行動を改めて分析することは、今後の課題である。

【参考文献】

- 板明果・中野諭・鷺津明由 (2012)、「エコポイント制度に対する消費者行動の変化」、第7回日本LCA学会研究発表会講演要旨集(2012年3月)。
- 伊藤康・浦島邦子 (2013)、「ポーター仮説とグリーン・イノベーション —— 適切にデザインされた環境インセンティブ環境規制の導入 ——」、『科学技術動向』、2013年3・4月号、pp. 30-39.
- 小川佳也・長田充弘・菅山靖史・福永一郎 (2009)、「エネルギー価格変動の生産性への影響: 論点整理と計測」、日本銀行ワーキングペーパーシリーズ、No. 09-J-10.
- 枝村一磨 (2020)、「自動車排出ガス規制の強化は企業の触媒技術に関する研究開発活動に影響を与えたか —— 特許データを利用した定量分析 ——」、『経済貿易研究』、Vol. 46、pp. 67-87.
- 環境省・経済産業省・総務省 (2011)、「家電エコポイント制度の政策効果等について」。
- 倉知善行・森島元・河田皓史・柴田亮・文谷和磨・茂木仁 (2022)、「脱炭素社会への移行過程におけるわが国経済の課題: 論点整理」、日本銀行調査論文。
- 経済産業省・国土交通省 (2012)、「『エコカー補助金』制度の詳細について」。
- 経済産業省産業構造審議会 (2021)、「化学業界の『低炭素社会実行計画』(2020年目標)」。
- 資源エネルギー庁 (2021)、「令和2年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2021)」。
- 野村浩二 (2004)、『資本の測定: 日本経済の資本深化と生産性』、慶應義塾大学出版会。
- (2018)、「日本の長期エネルギー生産性 —— エネルギー品質と産業構造要因 ——」、DBJ Research Center on Global Warming Discussion Paper Series No. 61、日本政策投資銀行。
- (2021)、『日本の経済成長とエネルギー』、慶應義塾大学出版会。
- 東将人・河田皓史 (2017)、「周波数分析からみた近年の耐久財消費の動向」、日本銀行調査論文。

- 森川正之 (2011)、 「サービス産業のエネルギー効率性 —— 事業所データによる実証分析 ——」、RIETI Discussion Paper Series、11-J-062.
- 八木智之・古川角歩・中島上智 (2022)、 「わが国の生産性動向 —— 近年の事実整理とポストコロナに向けた展望 ——」、日本銀行ワーキングペーパーシリーズ、No. 22-J-3.
- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, and D. Hemous (2012), "The Environment and Directed Technical Change," *American Economic Review*, Vol. 102(1), pp. 131–166.
- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Barrage, and D. Hemous (2019), "Climate Change, Directed Innovation, and Energy Transition: The Long-run Consequences of the Shale Gas Revolution," 2019 Meeting Papers 1302, Society for Economic Dynamics.
- Fukunaga, I., and M. Osada (2009), "Measuring Energy-saving Technical Change in Japan," Bank of Japan Working Paper Series, No. 09-E-5.
- Hamamoto, M. (2006), "Environmental Regulation and the Productivity of Japanese Manufacturing Industries," *Resource and Energy Economics*, Vol. 28, pp. 299–312.
- Hassler, J., P. Krusell, and C. Olovsson (2012), "Energy-Saving Technical Change," NBER Working Paper Series, No. 18456.
- Herrendorf, B., R. Rogerson, and A. Valentinyi (2014), "Growth and Structural Transformation," in *Handbook of Economic Growth*, Volume 2B, Elsevier.
- Hicks, J. R. (1932), "Marginal Productivity and the Principle of Variation," *Economica*, Vol. 35, pp 79–88.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2000), "Special Report on Emissions Scenarios," Cambridge University Press.
- Jin, H., and D. W. Jorgenson (2010), "Econometric Modeling of Technical Change," *Journal of Econometrics*, Vol. 157, pp. 205–219.
- Kaya, Y. (1990), "Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios," Paper presented to the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working

Group, Paris.

Nakamura, K., S. Kaihatsu, and T. Yagi (2019), "Productivity Improvement and Economic Growth: Lessons from Japan," *Economic Analysis and Policy*, Vol. 62, pp. 57–79.

Norsworthy, J. R., and D. H. Malmquist (1983), "Input Measurement and Productivity Growth in Japanese and U.S. Manufacturing," *American Economic Review*, Vol. 73(5), pp. 947–967.

Popp, D. (2002), "Induced Innovation and Energy Prices," *American Economic Review*, Vol. 92(1), pp. 160–180.

Yoshida, Y., Y. Inahata, M. Enokibori, and R. Matsuhashi (2010), "Estimating CO2 Emission Reduction in Eco-Point Program for Green Home Appliances in Japan," *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 2, pp. 605–612.

(補論) エネルギー節約的な技術進歩の計測

本補論では、「エネルギー節約的な技術進歩」の計測方法について、その概要を説明する。Jin and Jorgenson (2010) や Fukunaga and Osada (2009) は、第 3-1 節で解説した生産関数を用いる代わりに、以下のトランスログ型価格関数とそれから導かれる分配率関数をシステム推計することで、技術進歩の偏りを計測している²⁷。

まず、トランスログ型価格関数は、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \ln P_{Yt} = & \alpha_0 + \sum_i \alpha_i \ln P_{it} + \alpha_t \cdot t + \frac{1}{2} \sum_{i,k} \beta_{ik} \ln P_{it} \ln P_{kt} \\ & + \sum_i \beta_{it} \ln P_{it} \cdot t + \frac{1}{2} \beta_{tt} \cdot t^2 \end{aligned} \quad (\text{A1})$$

ただし、 P_Y は生産物価格、 P_i は要素価格、 i, k は任意の生産要素、 t は時間および技術水準を表す。トランスログ型関数とは 2 階微分可能な任意の一般的関数の近似式であり、 $\beta_{ik} = 0$ 、 $\beta_{it} = 0$ 、 $\beta_{tt} = 0$ とすれば、上式はコブ・ダグラス型生産関数に対応した価格関数となる。

完全競争・規模に関して収穫一定の仮定の下では、投入要素 i の分配率は、次のように、(A1) 式を $\ln P_{it}$ で偏微分したものに等しくなる。

$$v_t^i \equiv \frac{P_t^i X_t^i}{P_{Yt} Y_t} = \alpha_i + \sum_k \beta_{ik} \ln P_{kt} + \beta_{it} \cdot t \quad (\text{A2})$$

ただし、 β_{ik} は、生産要素 k の価格が 1% 変化した場合に生産要素 i の分配率が何% 変化するかを表す、シェア弾性値である。(A2) 式の最終項 $\beta_{it} \cdot t$ は、生産要素価格の変化とは独立の分配率の時間を通じた変化を表しており、生産要素 i に関する技術進歩の偏りを示しているといえる。

技術進歩の偏りは、(A1) 式のトランスログ型価格関数と (A2) 式の分配率関数をシステム推計することで計測する。その際、多くの先行研究では、 t を固定的なタイム・トレンドと見做したうえで、 β_{ik} 、 β_{it} 、 β_{tt} 等の固定パラメータを推計しているが、Fukunaga and Osada (2009) では、Jin and Jorgenson (2010)

²⁷ Fukunaga and Osada (2009) は、本稿のような推計を行う際、生産関数においては、データの取り扱いに計測上の技術的困難があること（例えば、生産要素の投入量がゼロである場合等）などから、価格関数の方が推計には便利であると指摘している。一方、野村 (2004) は生産関数を推計することによって技術進歩の偏りを計測している。

に倣い、以下で定義する可変パラメータ f_{it} と f_t を潜在変数とした状態空間モデルを構築し、カルマンフィルターによって推計している点が特徴である。

$$f_{it} \equiv \beta_{it} \cdot t, \quad f_t \equiv \alpha_t \cdot t + \frac{1}{2} \beta_{tt} \cdot t^2 \quad (\text{A3})$$

(A3) 式において、 f_{it} は生産要素 t への技術水準の偏り（分配率 v_t^i への影響）を表し、 $\Delta f_{it} > 0$ のとき使用的技術進歩、 $\Delta f_{it} < 0$ のとき節約的技術進歩となる。

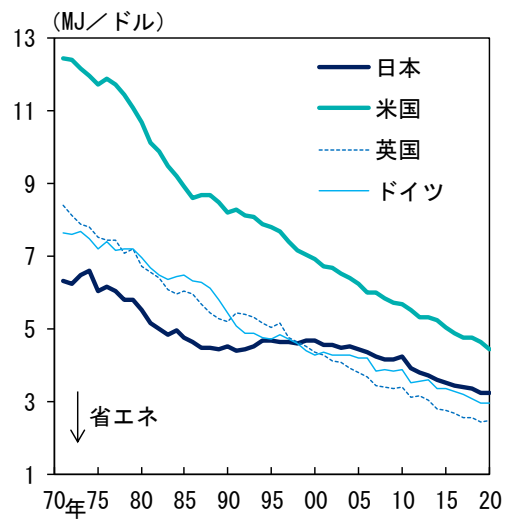
これらを用いると、(A1) 式と (A2) 式は、それぞれ以下のように書き換えられる。

$$\ln P_{Yt} = \alpha_0 + \sum_i \alpha_i \ln P_{it} + \frac{1}{2} \sum_{i,k} \beta_{ik} \ln P_{it} \ln P_{kt} + \sum_i \ln P_{it} \cdot f_{it} + f_t \quad (\text{A1}')$$

$$v_t^i = \alpha_i + \sum_k \beta_{ik} \ln P_{kt} + f_{it} \quad (\text{A2}')$$

なお、推計の際には、モデルの 1 次同次性、単調性、対称性、擬凹性などの制約をかけて、推計するパラメータの数をある程度削減している。また、説明変数の内生性の可能性を考慮し、操作変数を用いて推計する。

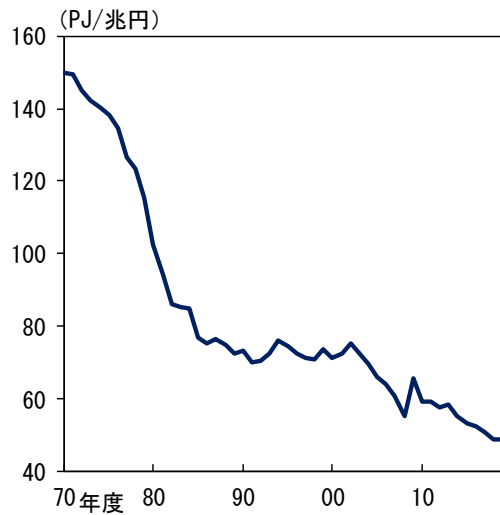
図 1. マクロのエネルギー消費原単位 (エネルギー効率)



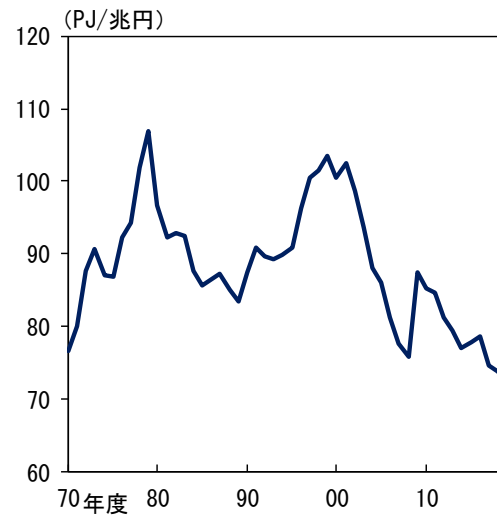
(注) MJ は、エネルギーの単位であるメガ・ジュールを示す。
(出所) 倉知ほか (2022)

図 2. 部門別にみたエネルギー消費原単位（エネルギー効率）

(1) 製造業



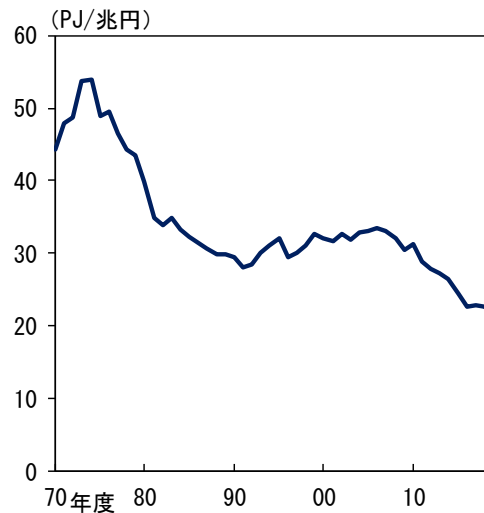
(2) 運輸



(3) 家計



(4) その他

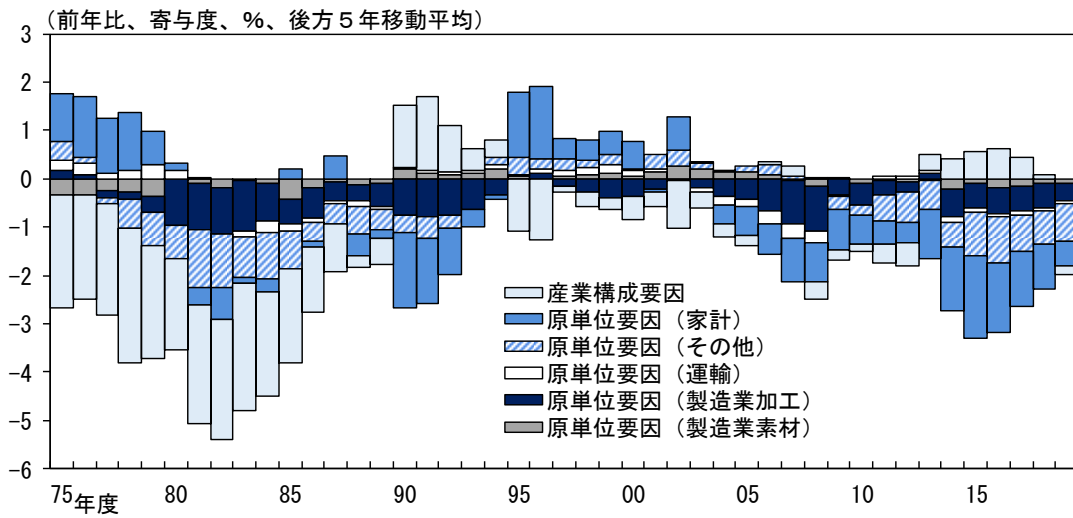


(注 1) 家計のエネルギー消費は、総合エネルギー統計における「家庭」＋「自家用乗用車（家庭利用寄与）」、運輸のエネルギー消費は、同統計における「運輸」－「自家用乗用車（家庭利用寄与）」。
PJは、エネルギーの単位であるペタ・ジュールを示す。

(注 2) 総合エネルギー統計では、1990年度以降の数値について算出方法が変更されており、とくに家計分について段差が生じていることに留意。

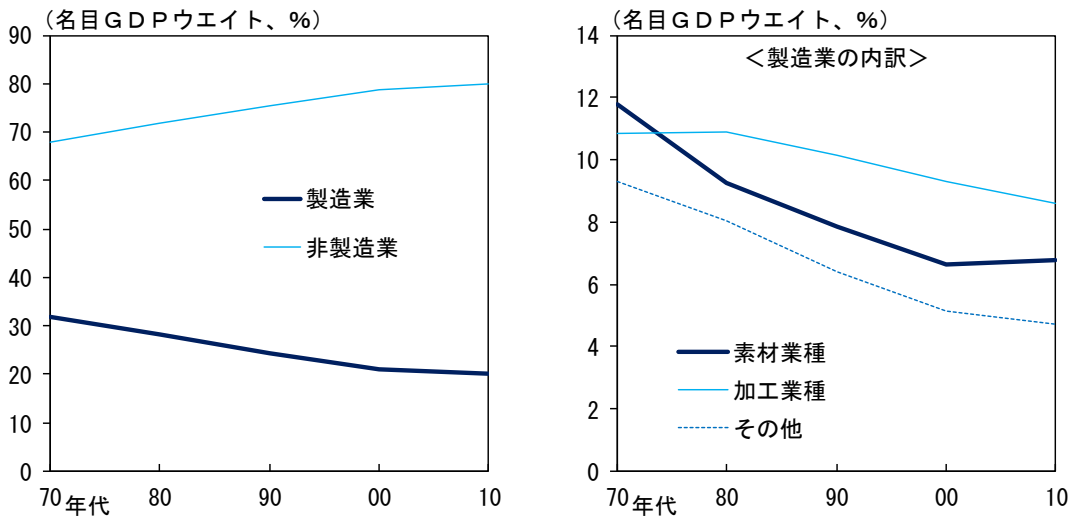
(出所) 資源エネルギー庁、内閣府

図 3. わが国のエネルギー効率の変動要因



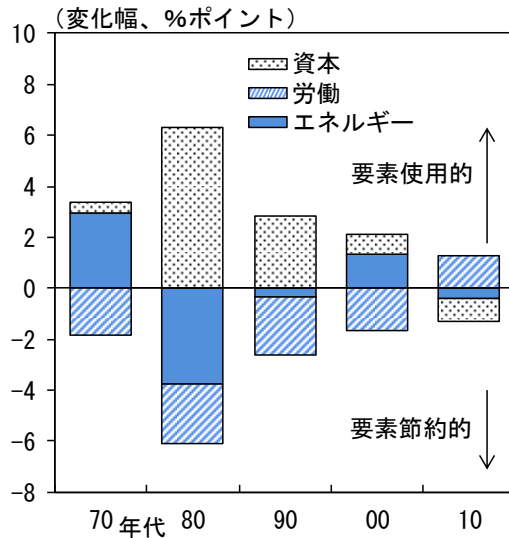
(注) 原単位の算出方法および各部門のエネルギー消費の定義に関する詳細は、本文の脚注2および図2の注を参照。寄与度分解では、各部門のGDPをウェイトとして用いた。
 (出所) 資源エネルギー庁、内閣府

図 4. 産業構成の変化



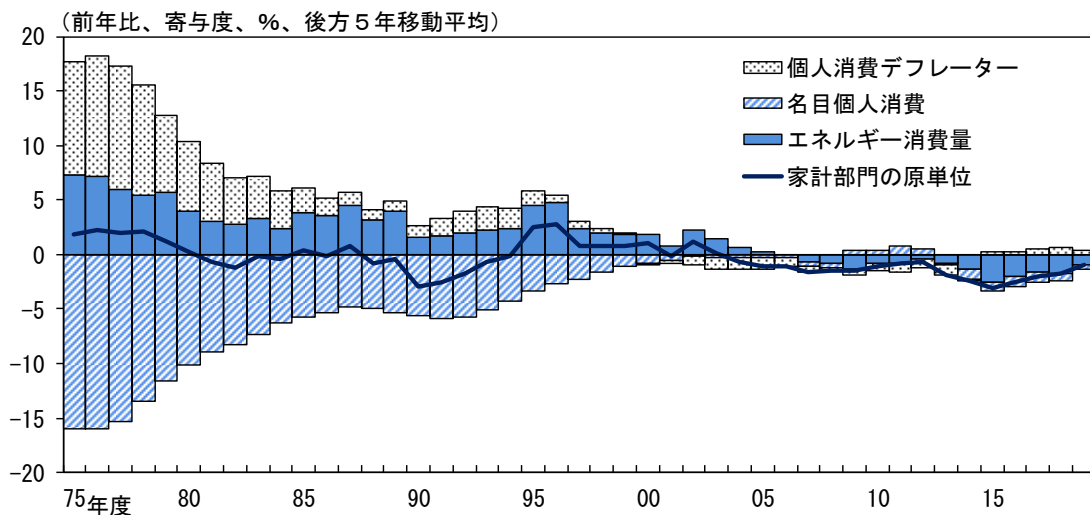
(注) 右図の「素材業種」は、パルプ・紙・紙加工品、化学、石油・石炭製品、窯業・土石製品、一次金属、金属製品、「加工業種」は、はん用・生産用・業務用機械、電子部品・デバイス、電気機械、情報・通信機器、輸送用機械。
 (出所) 内閣府

図 5. わが国における技術進歩の内訳（各要素節約的・使用的）



(注) 推計方法の詳細は、本文および補論を参照。

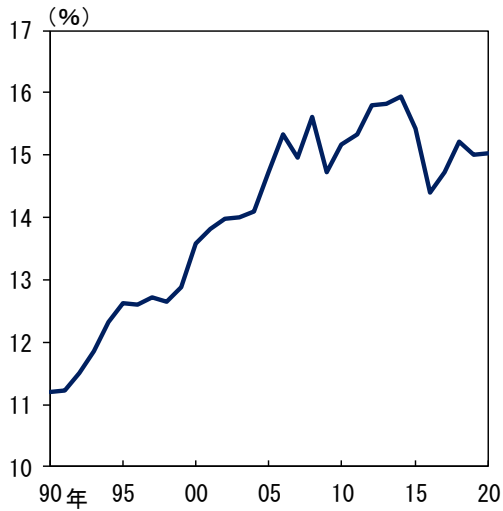
図 6. 家計部門のエネルギー消費原単位



(注) エネルギー消費量は、総合エネルギー統計における「家庭」に、「自家用乗用車（家庭利用寄与）」を加えたもの。

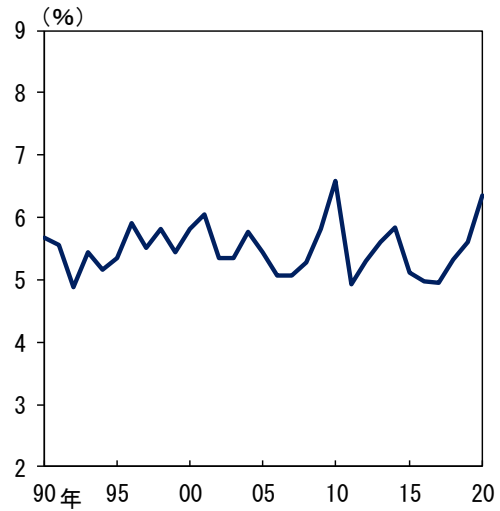
(出所) 資源エネルギー庁、内閣府

図 7. 家計支出に占める
エネルギー支出の割合
(S_E)



(注) 「エネルギー支出÷消費支出」として算出。エネルギー支出は、「光熱・水道」+「自動車等維持」。消費支出は、「こづかい」「交際費」「仕送り金」を除いている（以下、同じ）。
(出所) 総務省

図 8. エネルギー以外の家計支出に
占めるエネルギー使用財の割合
(S_M)



(注) 「エネルギー使用財支出÷エネルギー以外の消費支出」として算出。エネルギー使用財支出は、「家事用耐久財」+「冷暖房用器具」+「自動車等購入」+「教養娯楽用耐久財」。エネルギー以外の消費支出は、「消費支出」-「光熱・水道」-「自動車等維持」。
(出所) 総務省

図 9. エネルギーの相対価格
(P_E/P_M)



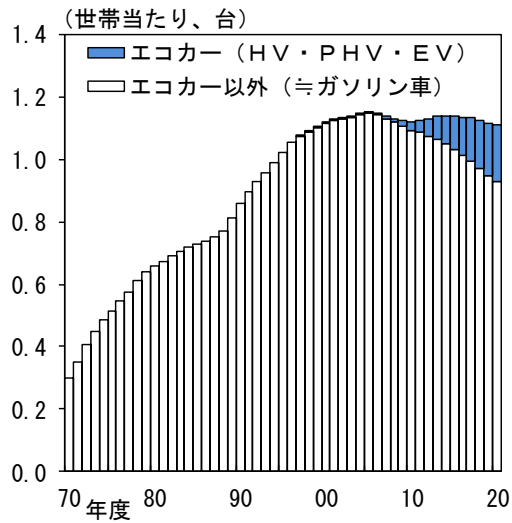
(注) 「エネルギー価格÷エネルギー使用財価格」として算出。エネルギー価格は、消費者物価指数における「エネルギー」。エネルギー使用財価格については本文参照。
(出所) 総務省、経済産業省

図 10. 家計部門のエネルギー効率
(B_E)



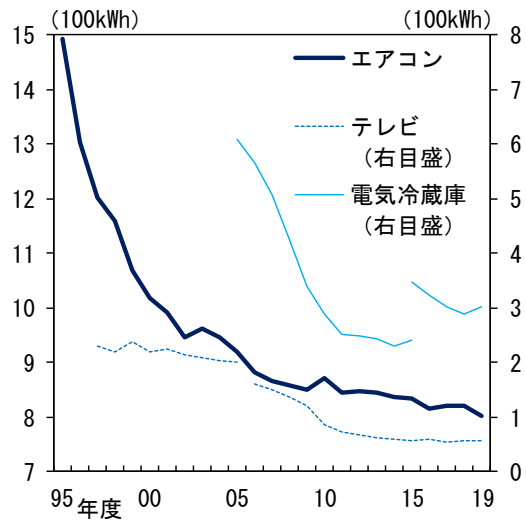
(注) 試算結果の値。

図 11. エコカーの普及状況



(出所) 一般財団法人自動車検査登録情報協会

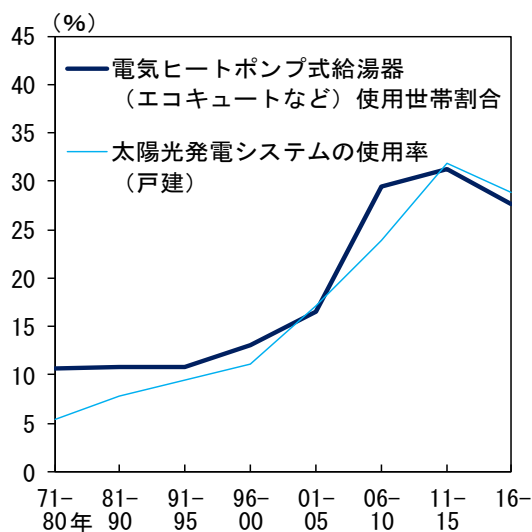
図 12. 家電製品のエネルギー消費量



(注) 1台あたりの年間電力使用量 (エアコンは冷暖房期間中のもの)。テレビと電気冷蔵庫は、JIS規格改訂や調査品目変更の影響による不連続が生じている。

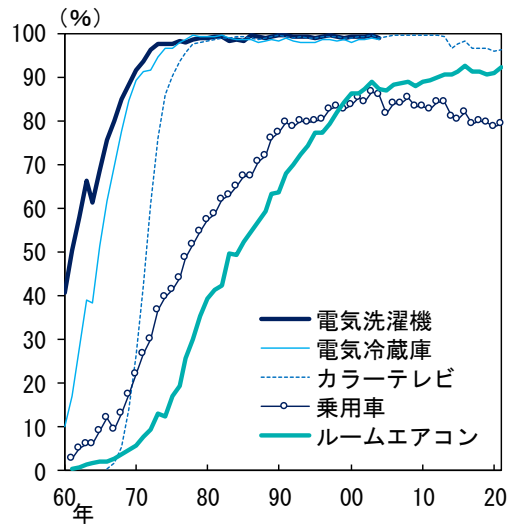
(出所) 資源エネルギー庁

図 13. エコ住宅の普及状況
(建築時期別)



(出所) 資源エネルギー庁

図 14. 耐久消費財の普及率



(注) 電気洗濯機と電気冷蔵庫は、2004年を最後に調査終了。

(出所) 内閣府