

電力中央研究所 研究資料

NO. Y18509

産業用電力需要に対する購入電力と自家発電電力
の代替性に関する分析

2019年4月

一般財団法人 電力中央研究所



CRIEPI

**Central Research Institute of
Electric Power Industry**

産業用電力需要に対する購入電力と自家発電力の代替性に関する分析

加部 哲史^{*1}

^{*1}社会経済研究所 事業制度・経済分析領域 主任研究員

背景

東日本大震災により生じた電力供給危機やその後の電気料金の上昇は、事業継続計画（BCP）に基づく停電対策や電力コストの低減に対する企業のスタンスに大きな影響を与えたと考えられる。このような状況下、各企業は電力の安定供給やエネルギーの有効利用の観点から、自家発電設備の新設や増設の動きをみせている。また自家発電は、購入電力の潜在的な競争相手と考えられることから、自家発電の動向が電力需要に及ぼす影響を業種別に分析することは、将来の需要想定を行う上でも重要であると考えられる。

目的

産業用電力需要に対する購入電力と自家発電の代替性を定量評価するために、業種別代替弾力性の推定および自家発比率のトレンド変化について分析を行い、代替性の業種間差異を明らかにする。

主な成果

購入電力と自家発電の代替性を定量評価するために、自家発比率を被説明変数、相対価格（電力購入価格と自家発用燃料価格）とトレンド成分（ β ）を説明変数とするモデルを用いて、代替弾力性（ σ ）の推定を行った。ただし、リーマンショックや東日本大震災といった外生的ショックや政策的な要因等により、この間、需要家の行動に変化が生じた可能性がある。その変化を把握するために、本報告では、従来の回帰モデルとは異なる、 β と σ が時間を通じて変化することを許す、状態空間モデルにより分析を行った。

その結果、繊維、パルプ・紙・紙加工、化学（石油石炭製品含む）、鉄鋼・非鉄・金属の各業種では、代替弾力性（ σ ）が統計上有意に非弾力的であるという結果を得た（表）。これらの産業は、エネルギー多消費型で自家発比率が比較的高く、自家発用燃料として生産工程で発生する副生ガスなどを利用する「プロセス型」の産業であることから、相対価格の変化に対して非弾力的になったものである。

上記の産業について、相対価格による短期的な変動を除去し、長期的な変動のみを抽出した β の推定結果を図に示す。この結果、これらの産業においては、自家発比率の伸びは、2005年度から2010年度に掛けて鈍化したものの、2011年度以降は増加に転じている。この理由としては、BCP対策や電力自由化の動きを受けた売電目的による自家発電設備の増強などの可能性が考えられる。

今後の展開

業種ごとの自家発電の運用の変化や技術の変化が代替弾力性や自家発動向にどのような影響を及ぼすのかを調べるため、今後、アンケート調査やヒアリングなどの詳細な分

析を検討する。

表 業種別代替弾力性 (σ) の推定結果

業種	代替弾力性	95%信頼区間	
		下限値	上限値
製造業	0.105 **	0.046	0.164
食品飲料	0.048	-0.078	0.173
繊維	0.213 **	0.039	0.388
木製品・家具	0.182	-0.218	0.581
パルプ・紙・紙加工	0.117 **	0.020	0.214
印刷	0.126	-0.172	0.424
化学 (石油石炭製品含む)	0.121 **	0.032	0.210
プラスチック・ゴム・皮革	0.047	-0.087	0.181
窯業・土石	-0.034	-0.209	0.141
鉄鋼・非鉄・金属	0.123 **	0.021	0.225
機械	-0.056	-0.215	0.104
(参考) 機械 (大口)	-0.077	-0.259	0.106

※95%信頼区間に0を含まないとき、有意水準5%で統計的有意(**)とする。

※分析期間は1998-2016年度である。

※機械 (大口) は、産業用大口需要 (電気事業便覧1998-2015年度) を用いている。

※窯業・土石、鉄鋼・非鉄・金属の自家発電燃料価格には一般炭輸入CIF価格を使用、その他の業種にはC重油輸入CIF価格を使用している。

※代替弾力性 (σ) は、相対価格が1%変化したときの購入電力と自家発電の比率の変化 (%) を指す。

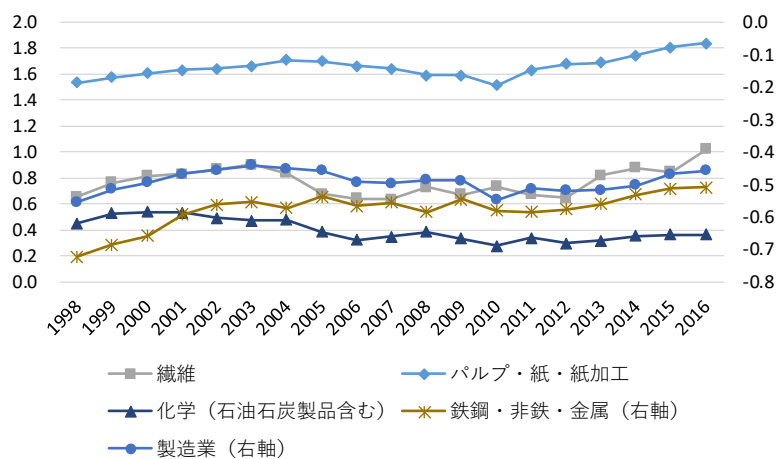


図 自家発比率のトレンド成分 (β)

注)トレンド成分 (β) は価格変化による短期的な変動を除去し、長期的な変動のみを抽出したものである。

関連報告書：

[1]Y07027 「産業用大口需要家の自家発自家消費に関する計量経済学的分析」(2008.05)

目 次

1. はじめに	1
2. 総合エネルギー統計の概要	2
3. 費用最小化問題と代替弾力性	3
4. モデル構築と推定方法	4
4.1 情報量基準によるモデル選択	4
4.2 状態空間モデルと状態推定	6
5. 分析結果	6
6. まとめ	8
参考文献	8
付録 A 産業用電力需要（主要 5 業種）および価格データのグラフ	9
付録 B 状態空間モデルの逐次推定	10

1. はじめに

東日本大震災により生じた電力供給危機やその後の電気料金の上昇は、事業継続計画（BCP）に基づく停電対策や、電力コストの低減に対する企業のスタンスに大きな影響を与えたと考えられる。特にエネルギー多消費型の企業を中心に、電力の安定供給の確保やエネルギーの有効利用の観点から、自家発電設備の新增設の動きが現れている。なかでも、電気と熱を同時に供給することができるコージェネレーションは、エネルギー効率が高いシステムとして、産業用需要家を中心に導入が進んでいる。

コージェネレーション導入量は、1980年代から継続して増加していたが、リーマンショック後の設備投資の冷え込みから一時的に伸びが鈍化した。しかし、東日本大震災後については、導入量は総じて上昇傾向にあり、自家発自家消費の割合は増加に転じている（図1,2参照）。

自家発電は、購入電力の潜在的な競争相手と考えられることから、自家発電の動向が電力需要に及ぼす影響を業種別に分析することは、将来の需要想定を行う上で重要であると考えられる。しかし、先行研究において購入電力と自家発電の間の競争に焦点を当てた研究は少ない状況にある。

購入電力と自家発電の代替性に関する先行研究として、依田・木下（2007）では、自家発自家消費を行う大口需要家（特別高圧、高圧）に対してアンケート調査を行っている。同調査では需要家タイプ別に、(1) 系統電力料金、(2) 系統電力安定性（瞬時電圧低下や停電の回数）、(3) 自家発燃料費、(4) 自家発運転信頼性、の4つが自家用発電設備の稼働率に影響を与えるかを質問した。その結果、購入電力と自家発電の需要代替性は、コージェネレーションのタイプによって異なることを示した。具体的には、鉄鋼、化学、紙パルプ産業のように、自家発用燃料として生産工程の中で発生する副生ガスなどを利用する「プロセス型」

は費用や料金に対する感度が鈍いのに対し、自家発用燃料を外部から購入している「非プロセス型」ではそれらに敏感に反応する傾向があることや、「非プロセス型」でも、排熱を利用しない「モノジェネ型」と排熱を利用する「コージェネ型」では、「コージェネ型」の方が費用や料金に対して敏感に反応する傾向がみられることが示された。

服部（2008）では、産業用大口需要の購入電力と自家発電の代替弾力性の推定を業種別に行い、自家発電の潜在的な競争圧力について定量評価を行っている。購入電力と自家発電の代替弾力性（相対価格が1%変化したときの、購入電力と自家発電の比率の変化）を推定した結果、主要な製造業において、購入電力と自家発電の間での、代替性の存在がみられることが示された。例えば、機械や石油石炭製品といった、自家発電に占めるコージェネレーションの比率が高い産業では、代替弾力性が1程度と、比較的高い値となった。一方で、鉄鋼、紙パルプなどの副生燃料を利用する「プロセス型」の産業では代替弾力性は低いとの結果が示された。推定結果は、依田・木下（2007）と概ね整合的な結果となり、コージェネレーションが増加すれば、代替弾力性が高まっていく可能性が示唆された。

北村・馬奈木（2016）では、日本におけるプラントレベルのデータを用いて購入電力と自家発用燃料（e.g., 都市ガス、石炭、重油）に対する価格弾力性を業種別に推定し、燃料代替性について検討している。その結果、自己価格弾力性は統計的に有意で負値となったが、自家発用燃料の購入電力に対する交差価格弾力性がほとんど全て負値であったことから、電気料金が上昇しても自家発電は増えないことが示唆された。

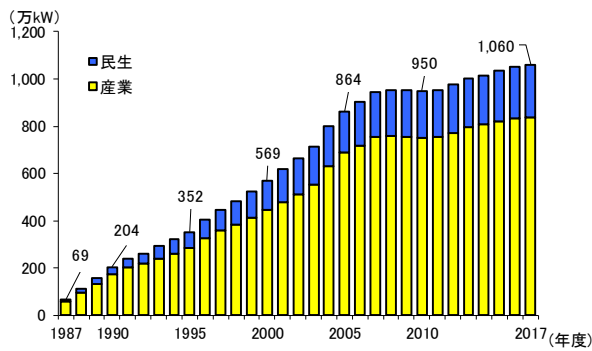


図1 日本におけるコージェネレーション設備容量

出典：コージェネレーション・エネルギー高度利用センター

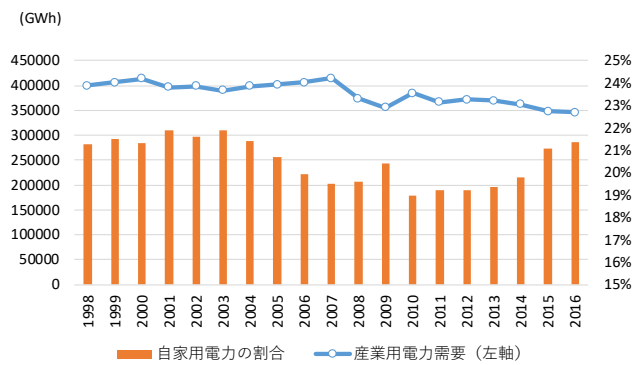


図2 自家用電力の割合（産業用）

出典：総合エネルギー統計（1998-2016年度）

本報告では、購入電力と自家発電の代替性を定量評価するために、業種別の代替弾力性を推定する。ただし、リーマンショックや東日本大震災といった様々な外生的ショックや政策的な要因等により、需要家の行動は徐々に変化していると考えられることから、その変化を明示的に取り入れた計量経済モデルを構築し、分析を試みる。

第2章では、分析に用いた「総合エネルギー統計」について概要を示す。第3章では、企業の費用最小化問題と代替弾力性の経済学的背景について説明を行う。その後、第4章では、業種別の代替弾力性を推定するためにモデルを構築し、第5章で分析結果を示す。最後に第6章で結論をまとめ、今後の課題について述べる。

2. 総合エネルギー統計の概要

これまで、経済産業省の「電力調査統計」では、販売電力量の内訳として、電灯需要と産業用・業務用電力需要のデータが公開されてきた。特に、産業用大口電力需要では、鉱工業と製造業について業種別のデータが公開されてきた。しかし、2016年度以降、産業用の業種別電力需要のデータは公開されていない。そこで本報告では、経済産業省の「総合エネルギー統計」を活用して、業種別の産業用電力需要の分析を試みる。

総合エネルギー統計は、日本のエネルギー需給の構造をエネルギー種別、部門別に把握できる包括的な統計であり、エネルギー・環境政策の企画・立案や評価分析の基礎として用いられている。資源エネルギー統計、石油等消費動態統計、電力調査統計、ガス事業統計といったエネルギー関連の各種一次統計の情報を組み合わせて作成された高度な加工統計であり、毎年11月頃に前年度の速報と前々年度の確報値が公表される。

総合エネルギー統計は、一次エネルギー供給、エネルギー転換、最終エネルギー消費の3つから構成される¹。本報告では、最終エネルギー消費の電力について、「企業・事業所他部門」の製造業に分類される業種を対象に分析を行う。製造業の内訳は、食品飲料製造業、繊維工業、木製品・

¹ 最終エネルギー消費部門では、一次エネルギー供給により国内供給されたエネルギー源や、さらにエネルギー転換を経て製造されたエネルギー源が、その種類毎に産業・民生（家庭、業務）・運輸の各部門の需要先において、実際に消費された量を示している。ただし、2015年4月の改訂により、部門の区分が企業・事業所他部門（農林水産鉱建設業、製造業、業務他（第三次産業））、家庭部門、運輸部門に変更された。

最終エネルギー消費量の算定に際しては、原則として、部門毎に石油等消費動態統計、家計調査報告、交通関係各統計といった、各部門の構成主体自身を調査対象とする消費側の公的統計の値を用いる。これらの値が得られない場合には、電力調査統計、ガス事業統計など販売側の公的統計を用い、やむを得ない場合を除き、推計による消費量の計上は行わないとしている。

家具他工業、パルプ・紙・紙加工品製造業、印刷・同関連業、化学工業（含 石油石炭製品）、プラスチック・ゴム・皮革製品製造業、窯業・土石製品製造業、鉄鋼・非鉄・金属製品製造業、機械製造業、他製造業となっている。

電力の項目は、これまで電気事業法における一般電気事業者の送配電網による供給を「一般用電力」に、特定電気事業者による特定区域・建築物での供給を「特定用電力」に、卸電気事業者等の直接供給によるものを「外部用電力」に、自家発電によるものを「自家用電力」にそれぞれ計上していたが、2016年4月以降は、「一般用電力」「特定用電力」「外部用電力」が「事業用電力」に統合された。

本報告では、外部からの購入電力（「事業用電力」）と自家発自家消費（「自家用電力」）の間の代替弾力性の推定を行う。

3. 費用最小化問題と代替弾力性

企業は資本、労働、エネルギー（例 電力）などの生産要素を投入し、生産活動を行っている。このとき、企業はある生産量（ y ）を満たすために、費用を最小化するような生産要素の組み合わせを決定するものとする。本報告では、生産要素の弱分離可能性を仮定して購入電力（ x_1 ）と自家発電（ x_2 ）の代替性に着目し、分析を行う。

企業の費用最小化問題は下記のように表すことができる。

$$\min_{x_1, x_2} p_1 x_1 + p_2 x_2 \quad (\text{式 1})$$

$$\text{s.t. } f(x_1, x_2) = y \quad (\text{式 2})$$

ここで p_1 と p_2 は、それぞれ購入電力（ x_1 ）と自家発電（ x_2 ）の価格、 y は生産量を表す。さらに、生産関数 f として以下のような CES（Constant Elasticity of Substitution）型生産関数を仮定する。

$$f(x_1, x_2) = [\alpha_1 x_1^\rho + \alpha_2 x_2^\rho]^{\frac{1}{\rho}} \quad (\text{式 3})$$

このときラグランジュの未定乗数法を用いて、生産量 y を満たすために投入される購入電力（ x_1 ）と自家発電（ x_2 ）を

$$x_1 = \left(\frac{p_1}{\alpha_1}\right)^{\frac{1}{\rho-1}} b^{-\frac{1}{\rho}} y \quad (\text{式 4})$$

$$x_2 = \left(\frac{p_2}{\alpha_2}\right)^{\frac{1}{\rho-1}} b^{-\frac{1}{\rho}} y \quad (\text{式 5})$$

$$b = \alpha_1 \left(\frac{p_1}{\alpha_1}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + \alpha_2 \left(\frac{p_2}{\alpha_2}\right)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \quad (\text{式 6})$$

と求めることができる。

次に代替弾力性は、生産要素の相対価格（ p_2/p_1 ）が 1% 変化したとき、生産要素の比率（ x_2/x_1 ）が何% 変化するのかを示す指標である。代替弾力性 σ は定義より、

$$\begin{aligned} \sigma &= -\frac{d(x_2/x_1)/(x_2/x_1)}{d(p_2/p_1)/(p_2/p_1)} \\ &= \frac{d \log(x_2/x_1)}{d \log(p_1/p_2)} \end{aligned} \quad (\text{式 7})$$

と表すことができる。また、投入される購入電力（ x_1 ）と自家発電（ x_2 ）の比率は、(式 4) と (式 5) から

$$\begin{aligned} \frac{x_2}{x_1} &= \left(\frac{p_2}{\alpha_2}\right)^{\frac{1}{\rho-1}} \left(\frac{p_1}{\alpha_1}\right)^{-\frac{1}{\rho-1}} = \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)^{-\frac{1}{\rho-1}} \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{-\frac{1}{\rho-1}} \\ &= c \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{1-\rho}} \end{aligned} \quad (\text{式 8})$$

となるので、(式 8) の両辺に対数をとると、

$$\log\left(\frac{x_2}{x_1}\right) = \log c + \frac{1}{1-\rho} \log\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

表 1 分析データの基本統計量
(1998-2016 年度、サンプル数 19)

	事業用電力 (GWh)		自家用電力 (GWh)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
製造業	290,291	14,162	78,763	6,535
食品飲料	22,419	2,237	1,133	100
繊維	8,302	1,693	3,522	1,129
木製品・家具	4,416	656	236	59
パルプ・紙・紙加工	11,446	1,081	24,070	1,805
印刷	6,554	1,043	133	42
化学 (石油石炭製品含む)	34,884	1,750	20,455	2,301
プラスチック・ゴム・皮革	19,863	1,656	1,260	202
窯業・土石	15,956	2,331	5,474	671
鉄鋼・非鉄・金属	82,229	3,632	17,755	1,004
機械	81,716	4,795	4,699	708

	平均値	標準偏差	最小値	最大値
電力総合単価 (円/kWh)	15	2	14	19
一般炭輸入CIF価格 (円/トン)	7,837	2,849	3,816	13,721
C重油輸入CIF価格 (円/KL)	40,642	19,244	10,686	71,187

$$= \beta + \sigma \log\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \quad (\text{式 9})$$

が成り立つ。ここで $\beta = \log c$, $\sigma = 1/(1 - \rho)$ とするとき、(式 9) より回帰分析を用いて、代替弾力性 σ を推定することが可能となる。

本報告では、購入電力 (x_1) と自家発電 (x_2) をそれぞれ、総合エネルギー統計の「事業用電力」と「自家用電力」のデータを用いて分析を行う。また、電力購入価格 (p_1) には電力総合単価、自家発電の価格 (p_2) には、窯業・土石、鉄鋼・非鉄・金属では、一般炭輸入 CIF 価格を、その他の業種では、C 重油輸入 CIF 価格をそれぞれ用いる (付録 A 参照)。また、分析データの基本統計量を表 1 に示す。

4. モデル構築と推定方法

従来の計量経済モデルでは、推定されるパラメータは推定期間を通じて一定であると仮定する場合が多い。しかし、実際には様々な外生的ショックや政策的な要因等により、需要家の行動は徐々に変化していると考えられる。特に、リーマンショックや東日本大震災が生じた 2000 年代後半以降はその変化が相対的に大きかった可能性がある。

そこで、需要家行動の変化を考慮するために、パラメータの変動を明示的に取り入れた状態空間モデルを検討する (e.g., Harvey and Marshall 1991, Chang and Hsing 1991, Hunt et al 2003, Harvey et al. 2004, Inglesi-Lots 2011, Arisory and Ozturk 2014, Chang et al. 2014, Wang and Mogi 2017)。

4.1 情報量基準によるモデル選択

本報告では、理論モデル (式 9) について、赤池情報量基準 (AIC : Akaike Information Criterion, Akaike 1973) を用いたモデル選択を行うことで、代替弾力性を推定するためのモデルを決定する。

AIC は、最尤法によって推定された未知パラメータの推定値 $\hat{\psi}$ が与えられたとき、最大対数尤度 $\ell(\hat{\psi})$ を用いて以下のように得られる。

$$AIC = -2 \ell(\hat{\psi}) + 2k$$

ここで k はパラメータ数を表す。AIC によるモデル選択では、候補となるモデル群から AIC が最小となるモデルを最良なモデルとして選択する。

理論モデル (式 9) より、切片項 β について可変パラメータを導入するとき、パラメータ β_t は価格変化による短期的な変動を除去し、長期的な変動のみを抽出したトレンド成分を表す。

本分析ではトレンド成分として、「1 次トレンド (ランダムウォーク)」、「2 次トレンド」、「ローカル線形トレンド」、「タイムトレンド」の 4 種類について比較を行った。

1 次トレンド

$$\Delta\beta_{t+1} = \nu_t, \nu_t \sim N(0, \sigma_\nu^2)$$

表2 赤池情報量基準 (AIC) によるモデル選択の結果

(a) 代替弾力性 σ が固定パラメータの場合

業種	1次 トレンド	2次 トレンド	ローカル 線形トレンド	タイム トレンド
製造業	-58.5	-49.4	-47.4	-37.0
食品飲料	-33.7	-20.8	-21.6	-19.3
繊維	-22.5	-13.2	-12.2	-8.2
木製品・家具	5.6	14.0	15.7	24.9
パルプ・紙・紙加工	-42.4	-34.4	-32.4	-18.5
印刷	7.6	16.3	18.3	16.6
化学 (石油石炭製品含む)	-45.3	-33.2	-32.6	-30.4
プラスチック・ゴム・皮革	-6.9	3.4	5.4	1.4
窯業・土石	-30.8	-20.4	-19.4	-11.7
鉄鋼・非鉄・金属	-48.2	-35.9	-35.6	-35.2
機械	-23.7	-18.3	-16.3	-4.6

(b) 代替弾力性 σ が可変パラメータの場合

業種	1次 トレンド	2次 トレンド	ローカル 線形トレンド	タイム トレンド
製造業	-56.5	-47.4	-45.4	-47.4
食品飲料	-32.8	-22.5	-20.5	-24.5
繊維	-20.6	-12.5	-10.5	-14.0
木製品・家具	5.9	13.7	15.7	11.7
パルプ・紙・紙加工	-40.7	-33.2	-31.2	-34.9
印刷	9.1	18.2	20.2	16.3
化学 (石油石炭製品含む)	-43.3	-32.1	-30.6	-34.1
プラスチック・ゴム・皮革	-5.0	5.4	7.4	3.4
窯業・土石	-29.7	-20.4	-18.4	-22.4
鉄鋼・非鉄・金属	-46.2	-35.5	-33.6	-37.5
機械	-21.7	-16.3	-14.3	-14.6

2次トレンド²

$$\Delta^2 \beta_{t+1} = v_t, v_t \sim N(0, \sigma_v^2)$$

ローカル線形トレンド

$$\beta_{t+1} = \beta_t + \gamma_t + v_t, v_t \sim N(0, \sigma_v^2)$$

$$\gamma_{t+1} = \gamma_t + \xi_t, \xi_t \sim N(0, \sigma_\xi^2)$$

タイムトレンド

$$\beta_t = \beta_0 \times t$$

さらに、代替弾力性を推定するために、理論モデル（式 9）のパラメータ σ について可変パラメータを導入すべきかを、AIC を用いて選択する。

表 2 より、理論モデル（式 9）の切片項 β は可変パラメータとして推定され、1 次トレンド（ランダムウォーク）として表される。一方、パラメータ σ については、表 2 から固定パラメータとして推定され、推定期間内における代替弾力性 σ の変動は小さいと想定される（i.e., $\sigma_t = \sigma$ ）。

4.2 状態空間モデルと状態推定

情報量基準によるモデル選択の結果から、（式 9）で表される理論モデルを以下のような状態空間モデルとして表すことができる。

$$\log\left(\frac{x_{2t}}{x_{1t}}\right) = \beta_t + \sigma \log\left(\frac{p_{1t}}{p_{2t}}\right) + \varepsilon_t, \varepsilon_t \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2) \quad (\text{式 10})$$

$$\beta_{t+1} = \beta_t + v_t, v_t \sim N(0, \sigma_v^2), \quad (\text{式 11})$$

このとき、（式 10）を時系列データが観測される仕組みを表現する回帰モデルと考えると、（式 11）は、トレンド成分の時間的な変化の様子を表現するモデルとなる。

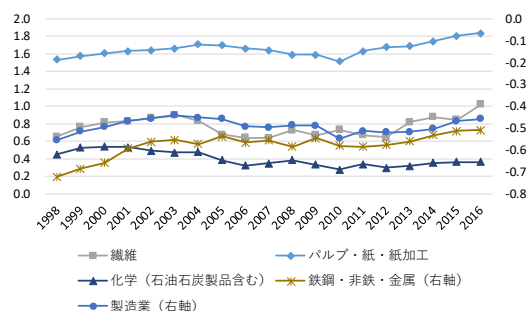


図 3 トренд成分 (β_t) の推定結果

状態空間モデルにおける状態推定では、カルマンフィルタを用いた逐次推定が可能である（付録 B 参照）。

5. 分析結果

表 3 に業種別代替弾力性の推定結果を示す。表 3 の結果から繊維、パルプ・紙・紙加工、化学（石油石炭製品含む）、鉄鋼・非鉄・金属の各業種では、代替弾力性は統計上有意に正の値となったが、その値の大きさは 1 未満となり非弾力的という結果が得られた。これらの産業は、電力購入価格と自家発用燃料価格の相対的变化による代替効果は小さいと考えられる。

また、業種区分や推定期間などが異なるため、先行研究との厳密な比較はできないものの、代替弾力性が統計的に有意となった産業は、先行研究と概ね一致している。ただし、機械の代替弾力性については、統計的に有意とはならず、先行研究と異なる結果を得た。服部（2008）では、地域別産業用大口需要（9 エリア）を用いて分析を行った結果、機械の代替弾力性は概ね 1 程度と比較的高い結果となっている。本報告でも、産業用大口需要を用いた分析も行ったが、機械の代替弾力性は、統計的に有意とはならなかった。

代替弾力性は、相対価格の変化による代替効果のみを計測したものである。そのため、設備の新增設などの影響は、図 3 に示したトレンド成分に

²2 次トレンドにおいて、 $\Delta^2 \beta_{t+1}$ は $\Delta^2 \beta_{t+1} = \beta_{t+1} - 2\beta_t + \beta_{t-1}$ として表される。

表3 代替弾力性 (σ) の推定結果

業種	代替弾力性	95%信頼区間	
		下限値	上限値
製造業	0.105 **	0.046	0.164
食品飲料	0.048	-0.078	0.173
繊維	0.213 **	0.039	0.388
木製品・家具	0.182	-0.218	0.581
パルプ・紙・紙加工	0.117 **	0.020	0.214
印刷	0.126	-0.172	0.424
化学 (石油石炭製品含む)	0.121 **	0.032	0.210
プラスチック・ゴム・皮革	0.047	-0.087	0.181
窯業・土石	-0.034	-0.209	0.141
鉄鋼・非鉄・金属	0.123 **	0.021	0.225
機械	-0.056	-0.215	0.104
(参考) 機械 (大口)	-0.077	-0.259	0.106

※95%信頼区間に0を含まないとき、有意水準5%で統計的有意(**)とする。

※分析期間は1998-2016年度である。

※機械 (大口) は、産業用大口需要 (電気事業便覧1998-2015年度) を用いている。

※窯業・土石、鉄鋼・非鉄・金属の自家発電用燃料価格には一般炭輸入CIF価格を使用、その他の業種にはC重油輸入CIF価格を使用している。

含まれると考えられる。代替弾力性が統計的に有意となった業種について、トレンド成分の推移を確認すると、2005年度から2010年度にかけては、自家発比率の伸びが一時的に鈍化したものの、2011年度以降は、BCP対策や売電目的による自家発電設備の増強などにより、自家発比率が増加に転じた可能性が考えられる。

次に、代替弾力性が統計的に有意となった産業の生産工程をみると、例えばパルプ・紙・紙加工品製造業では、パルプ化工程や抄紙工程 (乾燥) で多量の中低圧蒸気を使用することから、ボイラーで得られる高温高圧蒸気をまず発電に利用し、その後の中低圧蒸気を熱利用する。さらに、製造過程において発生する原材料の廃材をバイオマス燃料として発電に使用し、自社で消費する以外にも売電を行うケースもみられる (日本製紙連合会 2017)。

また、化学工業では、蒸留塔等における熱需要の規模に応じたコージェネレーション設備が導入されているのが大半である。石油化学製品の生産プロセスでは、加熱、蒸留、乾燥などの工程で大量の蒸気を使用することから、ボイラーで高圧蒸気を発生させ、タービンの動力として回収して発電し、減圧後の蒸気を工場内で利用する方式が幅広く利用されている。また、自家発電設備の導入には、購入電力の削減や電源の安定化/二重化を確保する役割があり、特に化学プラントでは、系統側電力の瞬時の電圧低下 (瞬停) による重要施設での事故防止のため、自家発電を需給調整用電源として停電対策を行っている。さらに、電力小売りが全面自由化されたことを受け、余剰電力の外部への販売拡大を行う企業も増えている (日本化学工業協会 2015)。

最後に、鉄鋼業では製鉄の過程で高炉やコーク

ス炉で高温の水素ガスやメタンが発生するため、それを回収し燃やすことで非常に高出力な発電が可能である。また、製鉄の過程で発生する副生ガスは、製鉄所内に入り巡らされたパイプラインで、電力会社と共同出資で設立した共同火力の発電所に送られ、発電用燃料として使われている。共同火力では、一般の発電所と異なり発電用燃料の大半は副生ガスで、不足する分に重油や石炭が使われる。このため、鉄鋼プロセスの省エネが進み、共同火力に送られる副生ガスが増えれば、重油使用量を減らすことが可能となる。さらに、共同火力で作られた電力は、製鉄所内だけでなく、地域の一般家庭にも電力会社を通じて供給される（新日鉄住金 2013）。

代替弾力性が統計的に有意となった産業は、エネルギー多消費型で自家発比率が比較的高く、自家発用燃料として生産工程で発生する副生ガスなどを利用する「プロセス型」の産業であることから、相対価格の変化に対して非弾力的になったものであり、電力購入価格と自家発用燃料価格の相対的变化による代替効果は限定的と考えられる。

6. まとめ

本報告では、需要家行動の変化を考慮するために、パラメータの変動を明示的に取り入れた状態空間モデルを用いて、産業用電力需要に対する購入電力と自家発電の代替性について分析を行った。その結果、繊維、パルプ・紙・紙加工、化学（石油石炭製品含む）、鉄鋼・非鉄・金属の各業種では、代替弾力性は非弾力的であるという結果を得た。

また、自家発比率のトレンド変化は、東日本大震災が生じた 2011 年以降、上昇傾向にあり、BCP 対策や売電目的による自家発電設備の増強が、購入電力と自家発電の代替関係に影響を及ぼした可能性が考えられる。

今後の課題として、業種ごとの自家発電の運用

の変化や技術の変化が代替弾力性や自家発動向にどのような影響を及ぼすのかを調べるために、アンケート調査やヒアリングなどの詳細な分析を検討する必要がある。

参考文献

- [1] 依田高典・木下信（2007）「系統電力と自家発の需要代替性分析」公共事業研究、59(2) pp.43-53.
- [2] 新日鉄住金（2013）「季刊新日鉄住金 製鉄所は発電所」
- [3] 北川源四郎（1993）「FORTRAN77 時系列解析プログラミング」岩波書店
- [4] 北村利彦・馬奈木俊介（2016）「製造業における購入電力と自家発用燃料との代替性—日本におけるプラントレベルの分析」RIETI Discussion Paper Series 16-E-007.
- [5] 日本化学工業協会（2015）「化学産業の火力発電」
- [6] 日本製紙連合会（2017）「紙パルプ産業のエネルギー事情」
- [7] 野村俊一（2016）「カルマンフィルタ-R を使った時系列予測と状態空間モデル-」共立出版 統計学 One point シリーズ
- [8] 服部徹（2008）「産業用大口需要家の自家発自家消費に関する計量経済学的分析」電力中央研究所報告 Y07027
- [9] Akaike, H. (1973). Information theory as an extension of the maximum likelihood. Proceeding of IEEE International symposium on information theory.
- [10] Arisoy, I., & Ozturk, I. (2014). Estimating industrial and residential electricity demand in Turkey: A time varying parameter approach. Energy, 66, 959-964.
- [11] Chang, H. S., & Hsing, Y. (1991). The demand for residential electricity: new evidence on time-

varying elasticities. Applied economics, 23(7), 1251-1256.

- [12] Chang, Y., Kim, C. S., Miller, J. I., Park, J. Y., & Park, S. (2014). Time-varying long-run income and output elasticities of electricity demand with an application to Korea. Energy Economics, 46, 334-347.
- [13] Harvey, A.C., S. J. Koopman, & N. Shephard, (2004). State space and unobserved component models. Cambridge University Press.
- [14] Harvey, A.C., & P. Marshall, (1991). Inter-fuel substitution, technical change and the demand for energy in the UK economy. Applied Economics, 23(6), 1077-1086.
- [15] Hunt, L. C., Judge, G., & Ninomiya, Y. (2003). Underlying trends and seasonality in UK energy demand: a sectoral analysis. Energy Economics, 25(1), 93-118.
- [16] Inglesi-Lotz, R. (2011). The evolution of price elasticity of electricity demand in South Africa: A Kalman filter application. Energy Policy, 39(6), 3690-3696.
- [17] Wang, N. & G.Mogi, (2017) . Industrial and residential electricity demand dynamics in Japan: How did price and income elasticities evolve from 1989-2014 ?, Energy Policy, 106, 233-243.

付録 A 産業用電力需要（主要 5 業種） および価格データのグラフ

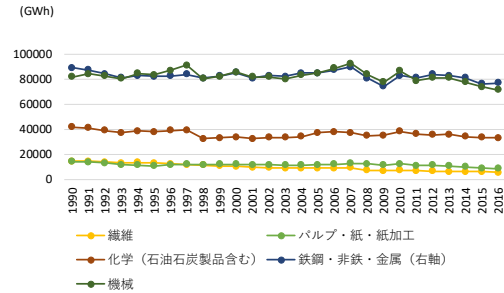


図 A.1 業種別事業用電力

出典：総合エネルギー統計（1990-2016年度）

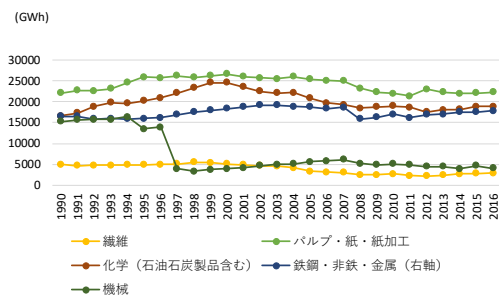


図 A.2 業種別自家用電力

出典：総合エネルギー統計（1990-2016年度）

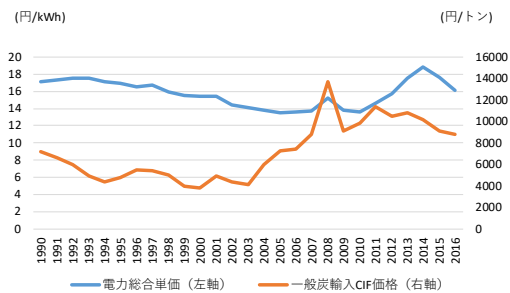


図 A.3 電力総合単価と一般炭輸入 CIF 価格の推移

出典：EDMC（1990-2016年度）

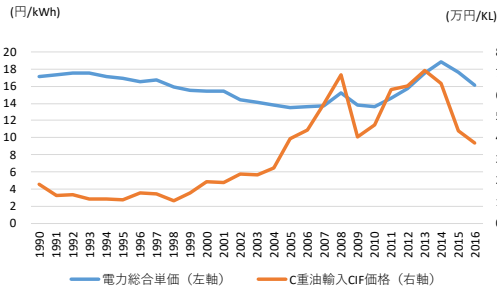


図 A.4 電力総合単価とC重油輸入CIF価格の推移

出典：EDMC（1990-2016年度）

付録 B 状態空間モデルの逐次推定

本節では、状態空間モデルを効率的に推定するための逐次アルゴリズムとして知られているカルマンフィルタについて説明を行う。

はじめに、状態空間モデルは、以下のような観測モデルとシステムモデルによって表される。

(観測モデル)

$$y_t = Z_t \theta_t + \varepsilon_t \quad \varepsilon_t \sim N(0, H_t)$$

(システムモデル)

$$\theta_{t+1} = T_t \theta_t + R_t \eta_t \quad \eta_t \sim N(0, Q_t).$$

状態空間モデルは線形モデルであり、誤差項が正規分布に従うことから、条件付確率分布 $p(\theta_t | Y_t)$ も正規分布となる。したがって、カルマンフィルタによる状態推定の問題を考えると、正規分布を規定する平均（期待値）と分散だけを求めればよい。このとき条件付期待値および分散共分散行列は、下記のように示すことができる。

$$\begin{aligned} \theta_{t|j} &= E(\theta_t | Y_j) \\ V_{t|j} &= \text{Var}(\theta_t | Y_j). \end{aligned}$$

カルマンフィルタは、与えられた初期状態 θ_1 から、各時点の状態 θ_t に対する推定を逐次的に行う。このとき、時点 $t-1$ までの観測値 Y_{t-1} を用いて状態 θ_t を推定する一期先予測（one-step ahead prediction）と時点 t までの観測値 Y_t を用いて状態 θ_t を推定するフィルタリング（filtering）を交互に求めていくことで、以下のような逐次推定が可能となる。

$$\begin{aligned} \dots \theta_{t|t-1} &\rightarrow \theta_{t|t} \rightarrow \theta_{t+1|t} \rightarrow \theta_{t+1|t+1} \dots \\ \dots V_{t|t-1} &\rightarrow V_{t|t} \rightarrow V_{t+1|t} \rightarrow V_{t+1|t+1} \dots \end{aligned}$$

一期先予測

$$\begin{aligned} \theta_{t+1|t} &= E(\theta_{t+1} | Y_t) = T_t \theta_{t|t} \\ V_{t+1|t} &= \text{Var}(\theta_{t+1} | Y_t) = T_t V_{t|t} T_t' + R_t Q_t R_t' \end{aligned}$$

フィルタリング

$$\begin{aligned} \theta_{t|t} &= E(\theta_t | Y_t) = E(\theta_t | v_t, Y_{t-1}) \\ &= E(\theta_t | Y_{t-1}) \\ &\quad + \text{Cov}(\theta_t, v_t | Y_{t-1}) \text{Var}(v_t | Y_{t-1})^{-1} v_t \\ &= \theta_{t|t-1} + \theta_{t|t-1} Z_t' F_t^{-1} v_t \\ &= \theta_{t|t-1} + K_t v_t \\ V_{t|t} &= \text{Var}(\theta_t | Y_t) = \text{Var}(\theta_t | v_t, Y_{t-1}) \\ &= \text{Var}(\theta_t | Y_{t-1}) \\ &\quad - \text{Cov}(\theta_t, v_t | Y_{t-1}) \text{Var}(v_t | Y_{t-1})^{-1} \text{Cov}(\theta_t, v_t | Y_{t-1})' \\ &= V_{t|t-1} - V_{t|t-1} Z_t' F_t^{-1} Z_t V_{t|t-1} \\ &= V_{t|t-1} - K_t F_t K_t'. \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned} v_t &= y_t - E(y_t | Y_{t-1}) = y_t - Z_t \theta_{t|t-1} \\ F_t &= \text{Var}(v_t | Y_{t-1}) \\ &= \text{Var}(Z_t \theta_t + \varepsilon_t - Z_t \theta_{t|t-1} | Y_{t-1}) \\ &= Z_t V_{t|t-1} Z_t' + H_t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}(\theta_t, v_t | Y_{t-1}) &= \text{Cov}(\theta_t, y_t - Z_t \theta_{t|t-1} | Y_{t-1}) \\ &= \text{Cov}(\theta_t, Z_t \theta_t + \varepsilon_t - Z_t \theta_{t|t-1} | Y_{t-1}) \\ &= V_{t|t-1} Z_t'. \end{aligned}$$

続いて、状態平滑化の逐次計算アルゴリズムを示す。一般的に、時系列解析における平滑化とは、各時点で観測されたノイズのあるデータを平均化して滑らかな曲線などで表現することを言う。平滑化の問題は、全ての観測値 $Y_T = \{y_1, \dots, y_T\}$ が与えられたとき、状態 θ_t を推定する問題である。この平滑化に関しても、カルマンフィルタと同様に固定区間平滑化と呼ばれるアルゴリズムがある。

フィルタリングにおける状態推定では、時点 t までの観測値から状態 θ_t を推定しているのに対し、平滑化のアルゴリズムは、得られている全ての観測値を用いて推定を行っている。したがって、平滑化を行うことで精度の良い状態推定が行える。

平滑化のアルゴリズムでは、カルマンフィルタによる推定結果 $\{\theta_{t+1|t}, \theta_{t|t}, V_{t+1|t}, V_{t|t}\}$ が計算に利用され、時点 T から時間的に逆方向に逐次推定が行われる。

$$\begin{aligned}\theta_{1|T} &\leftarrow \theta_{2|T} \cdots \cdots \theta_{T-1|T} \leftarrow \theta_{T|T} \\ V_{1|T} &\leftarrow V_{2|T} \cdots \cdots V_{T-1|T} \leftarrow V_{T|T}\end{aligned}$$

固定区間平滑化

$$\begin{aligned}A_t &= V_{t|t} T_t' V_{t|t}^{-1} \\ \theta_{t|T} &= \theta_{t|t} + A_t (\theta_{t+1|T} - \theta_{t+1|t}) \\ V_{t|T} &= V_{t|t} + A_t (V_{t+1|T} - V_{t+1|t}) A_t'\end{aligned}$$

上記の推定問題は、観測値の全てまたは一部が与えられたもとの、状態 θ_t の条件付確率分布を求める問題として取り扱えば、多変量正規分布の結果に基づいて、1時点ずつ更新して求めていく逐次計算によって、効率的に状態推定を行うことが可能となる。さらに、平滑化および長期予測についても、カルマンフィルタの結果を利用することで効率よく解くことができる（詳細については北川 1993、野村 2016を参照）。

誤差項の分散共分散行列 H_t, Q_t は、未知パラメータのため、観測値から最尤法によって推定する。ここで、尤度関数を以下のように定義する。

$$L = p(y_1, y_2, \dots, y_T) = \prod_{t=1}^T p(y_t | Y_{t-1})$$

このとき、対数を取ることで対数尤度が、

$$\log L = \sum_{t=1}^T \log p(y_t | Y_{t-1})$$

のように得られる。さらに、 $p(y_t | Y_{t-1})$ を平均 $E(\theta_t | Y_{t-1})$ と分散共分散行列 $Var(\theta_t | Y_{t-1})$ の m 次元多変量正規分布と考えるとき、一期先予測による誤差 v_t とその分散共分散行列 F_t を用いて、対数尤度は以下のように書き表すことができる。

$$\log L = -\frac{mT}{2} \log(2\pi) - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T (\log |F_t| + v_t' F_t^{-1} v_t)$$

したがって、カルマンフィルタによる状態推定の結果を用いて、上記の対数尤度を最大にする分散共分散行列 H_t, Q_t を求めることができる。



CRIEPI

**Central Research Institute of
Electric Power Industry**

[不許複製]

編集・発行人 一般財団法人 電力中央研究所
社会経済研究所長
東京都千代田区大手町1-6-1
e-mail src-rr-ml@criepi.denken.or.jp

著作 一般財団法人 電力中央研究所
東京都千代田区大手町1-6-1
