

日本の産業部門における 地域エネルギー効率の計測と評価

大塚章弘

1. はじめに

日本の産業部門のエネルギー消費量は、産業構造の変化を受けながら経済成長とともに変動してきた。1990 年以降、製造業のエネルギー消費原単位は改善し、エネルギー需要全体の伸びを抑制する方向で働く一方、第三次産業におけるエネルギー消費原単位は悪化し、エネルギー需要全体の増加に大きく寄与してきた (Otsuka 2017a)。産業部門は家庭部門や運輸部門と比較するとエネルギー消費量が大きく、それゆえ、当該部門のエネルギー効率をいかに改善することができるのか、低炭素社会を実現するうえで重要な鍵となる。その方策に関する議論に貢献するために、本研究では産業部門のエネルギー効率の実態を把握する方法を提示し、地域経済の視点からエネルギー効率の改善要因を明らかにする。

エネルギー効率を計測する方法には PFEE (partial factor energy efficiency) 指標と TFEE (total factor energy efficiency) 指標という二つの方法がある (Du and Lin 2017)。PFEE 指標は、エネルギーのインプットとアウトプットとの関係によって定義される。よく知られている PFEE 指標はエネルギー消費原単位とエネルギー生産性である。簡便性の観点から、これらの PFEE 指標は広く使用されている (EIA 1995, 2013, IEA 2009)。しかし、PFEE 指標はその計算において他の投入要素の役割を考慮に入れない。これは実際の生産活動と一致しないために先行研究では批判にさらされることが多い (例えば、Boyd 2008, Hu and Wang 2006, Stern 2012 など)。

TFEE 指標は、PFEE 指標とは異なり、多要素を考慮したエネルギーのインプットとアウトプットの比率として定義され、データ包絡分析 (DEA) と確率フロンティア分析 (SFA) の 2 つのアプローチから成り立つ。DEA

は線形計画法を使用するノンパラメトリックアプローチである。DEA はフロンティアの計測に関数形式を課すことはなく、それによってモデルのミスマススペシフィケーションの問題を避けることができる。しかし、通常のDEA では統計的ノイズが考慮されないために DEA から得られた結果はデータの品質に非常に敏感となる。この点に配慮して、Filippini and Hunt (2011, 2012), Stern (2012), Zhou et al. (2012), Lin and Du (2013, 2014, 2015), Filippini et al. (2014) は、エネルギー効率の計測においてパラメトリックフロンティアアプローチであるSFAの適用を支持している。

SFAを用いたエネルギー効率指標は多くの国で適用されている(詳細はOtsuka and Goto 2015, Otsuka 2019aを参照)。SFAは統計的なノイズに対処できるようにDEAよりも望ましいことが知られている。例えば、Zhou et al. (2012)は両者のアプローチを用いてエネルギー効率指標を評価し、SFAのほうがDEAよりも望ましいことを示している。しかし、SFAに関する多くの先行研究ではエネルギー効率の値を計測することに焦点が当てられているため、エネルギー効率の決定要因については十分に検討されてこなかった。Otsuka (2018a, 2018b)はこの点に着目し、日本の家庭部門と産業部門におけるエネルギー効率の決定要因を地域経済の視点から分析している。本研究では産業部門のエネルギー効率を分析したOtsuka (2018b)と同一の枠組みに基づき、データとモデルを刷新することで産業部門の地域エネルギー効率の決定要因に関する分析を拡張する。

平成27年における「総合エネルギー統計」の改訂においてエネルギー最終消費の部門構造が見直され、業務部門が第三次産業に改められ、産業部門に統合されている。つまり、本研究で考察する産業部門とは農林水産業、建設業、製造業、第三次産業から構成される部門を意味する。本研究ではこの枠組みにおいて新たに東日本大震災以降のデータを取り入れる。東日本大震災以降では、原子力発電の稼働停止に伴う電気料金の上昇によって経済主体のエネルギー消費行動に大きな変化が生じた可能性がある¹。本研

¹ 東日本大震災による電力消費の行動変化に関する実証研究はOtsuka (2019b)を参照。

究では刷新したデータにおいて、東日本大震災前の研究結果と比較してエネルギー消費行動に大きな変化が生じているかどうかを確認する。

本研究では、地域エネルギー効率の決定要因として二つの要素に焦点を当てる。第一の要素は「電化率」である。工場や事業所の電化はエネルギーの効率的な利用を可能にする。例えば、工場エネルギー管理システム（FEMS：Factory Energy Management System）の導入により工場の電化を進めることが可能である。FEMSは発電、電力貯蔵、および省エネ機器と連携して機能し、これまでの産業では実現できなかった省エネを可能にする。さらに、商業ビル用のビルエネルギー管理システム（BEMS：Building and Energy Management System）の導入により、商業ビル内のエネルギー消費量を管理し、削減することができる。したがって、電化の促進による電力使用量の増加に伴い、エネルギー効率が改善する可能性がある。

地域エネルギー効率を改善させる第二の要素は「製造業比率」である。製造業に分類される鉄鋼業や化学工業、紙・パルプ業ではコージェネレーションシステムの導入が進んでいる。コージェネレーションシステムは英語では“combined heat and power”といわれ、内燃機関、外燃機関の排熱を利用し動力と温熱、冷熱を取り出してエネルギーの利用効率を高めるエネルギー供給システムである。製造業ではこのコージェネレーションシステムの導入が進むことで省エネが実現され、エネルギー効率が改善される可能性が高い。本研究ではこの仮説を新たに検証する。

以下では、第2節において分析のためのフレームワークを提示し、モデルとデータについて述べる。第3節は分析結果を示し、議論する。第4節は結論と今後の課題を述べる。

2. 方法

2. 1 モデル

本研究では、日本の地域レベルにおいて下記の集計エネルギー需要関数 F が存在することを想定する。

$$E_{jt} = F(P_t, Y_{jt}, KL_{jt}, IK_{jt}, ER_{jt}, MR_{jt}, CDD_{jt}, HDD_{jt}, EF_{jt}) \quad (1)$$

ここに j は地域 ($j=1, \dots, J$), t は時間 ($t=1, \dots, T$) である。 E は最終エネルギー消費, P は実質エネルギー価格, Y は実質生産額である。 KL は資本労働比率であり, 機械化の程度を表す。 IK は資本ストックに対する投資の割合であり, ビンテージの程度を表す。 ER は電化率であり, MR は製造業比率である。 CDD は冷房度日, HDD は暖房度日であり, それぞれ気温の要素を表す。 EF は地域のエネルギー効率の水準である。

エネルギー効率の水準は経済システムにおいては直接的に観察されないため推定する必要がある。本研究では, Filippini and Hunt (2011, 2012) によって示された分析アプローチに従い, 確率フロンティア需要関数を用いることによって地域エネルギー効率の水準を推定する。

確率フロンティア関数は, 一般的に生産過程の経済パフォーマンスを計測する際に用いられる。そのため, 計量経済学的アプローチを使うことで生産理論に応用されてきた。このアプローチはフロンティア関数が生産主体によって達成可能な最大のアウトプットレベルもしくは最小のコストレベルを与えるという考え方に基づく。後者, すなわちコスト関数の場合, フロンティアは所与のアウトプットに対して達成可能な費用の最小レベルを表す。エネルギー需要関数の場合もこれと同様に考えることができる。すなわち, ある生産活動におけるアウトプットを所与とした場合, 観測されるエネルギー需要量と最小化された需要量の差がエネルギー非効率性である。集計エネルギー需要関数の場合, フロンティアは所与のアウトプットを達成するために生産活動が必要とするエネルギーの最小レベルを与える。すなわち, エネルギー需要フロンティア関数を推定することにより,

生産工程におけるエネルギー利用の管理を効率的に行っている地域のエネルギー需要を反映したベースラインのエネルギー需要を推定することが可能になる。このアプローチはある地域がフロンティア上にあるかどうかを判定することを可能にする。そして、もしある地域がフロンティア上になれば、フロンティアからの距離がベースラインの需要を超過したエネルギー消費の部分、いわゆるエネルギー非効率性を表す指標となる。

本研究では、Aigner et al. (1977) によって提案された確率フロンティア関数アプローチを採用する。つまり、(1) 式の両対数関数型が以下のように特定化できると想定する。

$$\begin{aligned} \ln E_{jt} = & \alpha + \alpha_P \ln P_t + \alpha_Y \ln Y_{jt} + \alpha_{KL} \ln KL_{jt} + \alpha_{IK} \ln IK_{jt} \\ & + \alpha_{ER} \ln ER_{jt} + \alpha_{MR} \ln MR_{jt} + \alpha_{CDD} \ln CDD_{jt} + \alpha_{HDD} \ln HDD_{jt} \\ & + v_{jt} + u_{jt} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに α は推定パラメータである。誤差項 $(v_{jt} + u_{jt})$ は、ランダムな誤差項 v_{jt} と非効率性に関する誤差項 u_{jt} の2つの部分からなる。 v_{jt} は $N(0, \sigma^2)$ の分布を有し、 u_{jt} およびすべての説明変数から独立していることが仮定される。 u_{jt} は非負の確率変数であり、 $N(\mu, \sigma_u^2)$ の分布が仮定される。 u_{jt} は効率性の水準 EF がエネルギー非効率の指標として解釈されることを表している。

(2) 式が与えられたもとでエネルギー効率の水準 EF_{jt} は、効率項の条件付き期待値 $E(u_{jt} | v_{jt} + u_{jt})$ を使うことで推定される (Jondrow et al. 1982)。すなわち、エネルギー効率の水準 EF_{jt} は推定されたエネルギー需要フロンティア E_{jt}^F に対する観測されたエネルギー需要 E_{jt} の比率によって計測される。つまり、

$$EF_{jt} \equiv E_{jt}^F / E_{jt} = e^{-u_{jt}} \quad (0 < EF_{jt} \leq 1)$$

である。

分析仮説に照らし、本研究ではエネルギー非効率性の平均 μ は次式で定

式化される。

$$\mu_{jt} = \beta_0 + \beta_{ER} \ln ER_{jt} + \beta_{MR} \ln MR_{jt} \quad (3)$$

ここに β は推定パラメータである。もし非効率項の要素が効率性を改善する場合には、 β の符号は負となる。例えば、電化率（ ER ）が高い地域はエネルギーが効率的に使用されていると考えられる。電力よりも石炭や灯油を集約的に使用している地域ほど多くの二酸化炭素を排出するため、電化を進めることによってエネルギー効率の改善が達成される可能性がある。製造業はコジュネレーションシステムの導入等により第三次産業と比較すると省エネが進展している。それゆえ、製造業（ MR ）に特化している地域ほど省エネが進展している可能性が高い。エネルギー効率の推定ではこれらの影響をコントロールする。我々の想定通りであれば、 β_{ER} と β_{MR} の符号は負になることが予想される。

本研究では電化のエネルギー効率の改善への影響に着目しているために、電化の決定要因について工場とオフィスの特性に配慮した定量分析を合わせて行う。電化率の決定要因として次式を想定する。

$$\begin{aligned} \ln ER_{jt} = & \delta_{KL} \ln KL_{jt} + \delta_{LN} \ln LN_{jt} + \delta_{FR} \ln FR_{jt} + \delta_{LP} \ln LP_{jt} \\ & + \delta_{CDD} \ln CDD_{jt} + \delta_{HDD} \ln HDD_{jt} + \delta_j + \varepsilon_{jt} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 j は地域（ $j=1, \dots, J$ ）、 t は時間（ $t=1, \dots, T$ ）である。 ER は電化率である。 KL は資本労働比率であり、工場の機械化の程度を表す。 LN は事業所当たりの従業員数であり、事業所の規模を表す。 FR は全事業所に占める工場の割合である。 LP は労働生産性であり、工場や事業所の生産性の水準を表す。 CDD と HDD は冷房度日、暖房度日である。 δ は推定パラメータである。パネルデータを使用するため、 δ_j は個別効果を表す。

2. 2 データ

分析で用いるデータは、1990年から2014年における47都道府県のパネルデータである。先行研究であるOtsuka (2018b)からデータを拡張するとともに、各変数データの一部見直しを行っている²。

各都道府県の最終エネルギー消費 (E) は「都道府県別エネルギー消費統計」(経済産業省)のデータである。実質エネルギー価格 (P) は「企業物価指数」(日本銀行)のデータに基づいており、企業物価指数のエネルギー価格を総平均で実質化している。実質生産額 (Y) は「県民経済計算年報」(内閣府)の実質付加価値額である。資本労働比率 (KL) は実質資本ストック額を就業者数で割ることで計算される。資本投資比率 (IK) は実質資本ストック額に対する実質投資額の割合である。実質資本ストック額と実質投資額のデータは電力中央研究所が公開しているデータである。就業者数は、「県民経済計算年報」(内閣府)のデータに基づき推計している。電化率 (ER) は最終エネルギー消費に占める電力の割合である。このデータは「都道府県別エネルギー消費統計」(経済産業省)のデータである。製造業比率 (MR) は経済活動別生産額における製造業の割合を表し、「県民経済計算年報」(内閣府)のデータである。冷房度日 (CDD) と暖房度日 (HDD) は県庁所在地および気象観測点のデータである。その計算方法はエネルギー経済研究所(2018)に従う。事業所数は「経済センサス」(経済産業省)、工場数は「工業統計表」(経済産業省)のデータである。労働生産性は就業者当たりの県内総生産であり、「県民経済計算年報」(内閣府)のデータによって計算される。表1に基本統計量を示す。

² Otsuka (2018b)の観測期間は震災前の1990年から2010年である。本研究ではこの観測期間に震災後4年間のデータを加えている。

表 1 基本統計量

	変数	平均	標準偏差	最大	最小
最終エネルギー消費(TJ)	<i>E</i>	245,679	267,554	1,467,304	24,922
エネルギー価格指数 (2010年=100)	<i>P</i>	108.73	6.60	129.25	99.26
実質県内総生産 (百万円)	<i>Y</i>	10,981,837	15,009,909	101,828,797	1,857,687
資本労働比率	<i>KL</i>	16.30	4.21	33.77	7.30
投資資本比率	<i>IK</i>	0.0589	0.0159	0.1161	0.0341
冷房度日	<i>CDD</i>	371.2	174.1	1190.3	0.0
暖房度日	<i>HDD</i>	1101.5	469.5	2707.1	0.3
電化率 (%)	<i>ER</i>	24.32	10.23	46.95	4.97
製造業比率 (%)	<i>MR</i>	21.26	8.19	49.35	3.86
事業所規模 (人)	<i>LN</i>	9.41	0.88	12.15	7.08
工場比率 (%)	<i>RO</i>	4.88	1.61	10.33	1.73
労働生産性 (百万円)	<i>LP</i>	7.59	1.07	12.57	5.81

表 2 は 2014 年時点の日本の地域特性を示している。首都圏、関西、中部などの大都市圏ではエネルギー消費量が多い。さらに、生産規模も大きく、投資資本比率も高い。製造業は中部と北陸に集中しており、資本労働比率が比較的高い。気候が温暖な西日本では冷房の頻度が多く、東日本では暖房の頻度が多い傾向にある。また、首都圏、関西、中部は大規模な事業所が多く、生産性が高い傾向にある。

表2 日本の地域の特徴 (2014年)

	<i>E</i>	<i>P</i>	<i>Y</i>	<i>KL</i>	<i>IK</i>	<i>CDD</i>
北海道	400,225	129.25	19,279,417	15.48	0.0370	39.9
東北	100,569	129.25	6,211,738	19.66	0.0466	147.9
北関東	200,089	129.25	8,382,887	22.12	0.0498	253.9
首都圏	719,477	129.25	44,162,103	20.79	0.0502	291.9
中部	296,251	129.25	16,118,001	24.59	0.0477	327.2
北陸	59,318	129.25	4,338,219	22.99	0.0440	282.7
関西	248,277	129.25	14,302,997	22.80	0.0463	391.2
中国	346,843	129.25	6,134,893	20.79	0.0478	312.4
四国	101,038	129.25	3,666,152	19.70	0.0454	364.7
九州	165,638	129.25	6,608,867	18.97	0.0450	377.0
沖縄	43,541	129.25	4,182,422	14.08	0.0552	937.6

	<i>HDD</i>	<i>ER</i>	<i>MR</i>	<i>LN</i>	<i>RO</i>	<i>LP</i>
北海道	2522.8	18.11	8.29	10.08	2.25	7.88
東北	1816.8	28.36	15.10	9.88	3.59	7.83
北関東	1275.9	33.94	28.58	10.05	4.65	9.02
首都圏	909.7	26.96	13.45	11.40	2.91	9.83
中部	1139.1	27.12	28.05	10.10	5.04	9.06
北陸	1309.2	35.43	21.46	9.31	4.89	8.53
関西	1009.6	28.93	20.60	9.74	4.02	9.14
中国	986.6	18.71	19.83	9.91	3.35	8.31
四国	848.7	23.41	16.95	8.96	3.33	8.35
九州	713.6	30.55	14.51	9.86	2.80	7.52
沖縄	0.6	38.84	3.92	8.75	1.75	7.10

(注) 地域区分は次の通り。北海道 (北海道), 東北 (青森, 岩手, 宮城, 秋田, 山形, 福島, 新潟), 北関東 (茨城, 栃木, 群馬, 山梨), 首都圏 (埼玉, 千葉, 東京, 神奈川), 北陸 (富山, 石川, 福井), 中部 (長野, 岐阜, 静岡, 愛知, 三重), 関西 (滋賀, 京都, 大阪, 兵庫, 奈良, 和歌山), 中国 (鳥取, 島根, 岡山, 広島, 山口), 四国 (徳島, 香川, 愛媛, 高知), 九州 (福岡, 佐賀, 長崎, 熊本, 大分, 宮崎, 鹿児島), 沖縄 (沖縄)。

3. 結果

エネルギー需要フロンティア関数に関する推定結果を表3に示す。時間効果の有無に関して二つのモデルを推定している。推定された係数は期待通りの符号を示しており、ほぼ全ての変数で統計的に有意である。各変数は対数であるため、推定パラメータは弾力性として解釈することができる。例えば、モデルAを評価すると、推定された価格弾力性は0.026、所得弾力性は0.696である。価格弾力性は非弾力的であり、必需財としてのエネ

表3 推定結果

	モデル A			モデル B		
	推定値		標準誤差	推定値		標準誤差
<i>Constant</i> (α)	-0.666	**	(0.074)	-0.957	**	(0.072)
α_P	-0.026	**	(0.004)	-0.019	**	(0.008)
α_Y	0.696	**	(0.005)	0.702	**	(0.005)
α_{KL}	0.092	**	(0.007)	0.054	**	(0.009)
α_{IK}	-0.053	**	(0.007)	-0.050	**	(0.009)
α_{ER}	-0.214	**	(0.057)	-0.088	**	(0.038)
α_{MR}	0.349	**	(0.036)	0.495	**	(0.037)
α_{CDD}	-0.008		(0.005)	-0.017	**	(0.006)
α_{HDD}	-0.040	**	(0.006)	-0.044	**	(0.006)
<i>Constant</i> (β)	0.648	**	(0.076)	0.984	**	(0.076)
β_{ER}	-0.381	**	(0.056)	-0.510	**	(0.039)
β_{MR}	-0.274	**	(0.036)	-0.396	**	(0.035)
時間ダミー	No			Yes		
$\sigma_u^2 + \sigma_v^2$	0.028	**	(0.001)	0.025	**	(0.001)
$\sigma_u^2 / (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)$	0.907	**	(0.039)	0.968	**	(0.033)
観測値	1175			1175		

(注) **および*は有意水準1%および5%であることを示している。

ルギー財の性質を表している。資本労働比率の係数 (α_{KL}) は正であり、機械化が進展している地域ほどエネルギー消費量は多い。資本投資比率の係数 (α_{IK}) は負であり、資本の更新投資が進んでいる地域ほどエネルギー消費量は小さい。価格弾力性や所得弾力性、資本労働比率、資本投資比率の結果は先行研究 (Otsuka 2018b) と比較して大きな変化は見られない。新たに追加の変数として検討した電化率と製造業比率の係数 (α_{ER} , α_{MR}) はそれぞれ負と正である。電化率が進んでいる地域はエネルギーの節約的利用が進んでいる可能性が高い。逆に電化が進展していない地域ほどエネルギー消費量は多い傾向にある。製造業に特化している地域は工場が集中立地している影響でエネルギー消費量は多い。これは製造業が第三次産業と比較してエネルギー消費原単位が大きいからである。気温の変数に関しては冷房度日および暖房度日の係数 (α_{CDD} , α_{HDD}) はともに負であり、期待する符号が得られていない。これは気候が穏やかな太平洋ベルト地帯に工場が集中していることが影響している可能性が考えられる。ただし、気候に関する係数値の大きさは他の変数と比較すると極めて小さい。これは、産業部門のエネルギー需要の決定において、気温の影響が相対的に小さいことを示唆している。

次に、エネルギー効率性に関する変数の推定結果を確認する。電化率と製造業比率の両係数 (β_{ER} , β_{MR}) はともに負で期待通りの符号を示している。これは、電化率が高くなるほどエネルギー効率が改善することを示している。この傾向は先行研究と一致している。さらに本研究の分析結果は製造業比率が高い地域ほどエネルギー効率が高いことも示している。両者の変数において、電化率に関する係数値のほうが製造業比率の係数値を大きく上回っている。これは、工場やオフィスの電化の進展のエネルギー効率の改善に与える影響が産業構造の影響よりも大きいことを示唆している。なお、時間効果を考慮したモデル B においても、モデル A とおむね整合的な結果が得られている。この意味において推定されたモデルは頑健であるといえる。

表4は推定結果（モデルA）から得られた各都道府県のエネルギー効率値に関する基本統計量を表している。効率値は1が最も効率的であることを意味し、1から小さくなるほどエネルギー効率の水準が低いことを示す。エネルギー効率値は都道府県平均で0.557であり、中央値は0.520である。最大値は0.980である一方で最小値は0.196であるから、エネルギー効率の水準には地域間で大きな差異があることが分かる。

表4 エネルギー効率値の基本統計量

平均	0.557
標準偏差	0.216
最小値	0.196
最大値	0.980
中央値	0.520

(注) 表の値は、モデルAで推定されたエネルギー効率値をもとに計算された。

図1 エネルギー効率値の推移

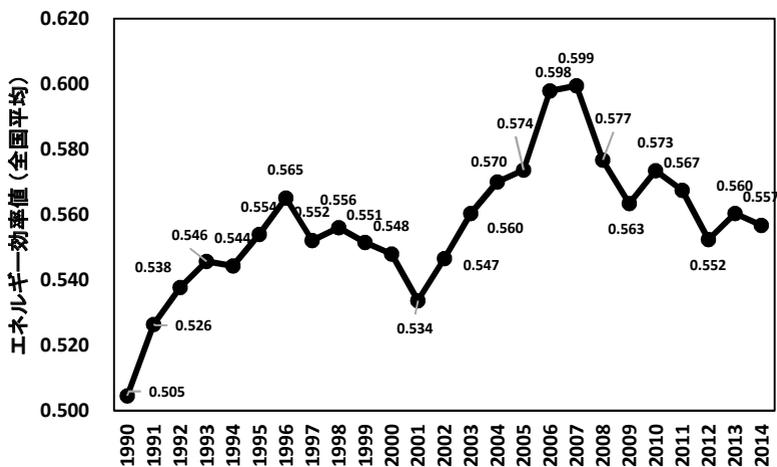


図1は全国平均のエネルギー効率値の時系列推移を示している。日本の産業部門のエネルギー効率の水準は1990年から1996年にかけて上昇したあと、2001年に低下している。その後、2007年にかけて再度上昇し、2008年のリーマンショックを契機として落ち込んでいる。特に、2011年の東日本大震災以降は全国的に節電の動きが進展したにもかかわらず、エネルギー需要全体における効率改善の進展は観察されない。ただし、観測期間を通じた長期的な動きをみると、エネルギー効率値の水準は1990年代から2000年代にかけて上昇傾向で推移していることが観察される。つまり、長期的にはエネルギー効率の改善傾向は維持されていると考えることはできる。

エネルギー効率値の地域分布を考察しよう。表5は各都道府県のエネルギー効率値の平均値とその順位を示している。順位の高い地域は長野を筆頭に滋賀、群馬、山梨、栃木、奈良であり、東日本大震災以前のデータを用いた先行研究と同様の傾向が示されている。これらの地域に立地する工場やオフィスでは電化が進んでいる可能性がある。これに対して、千葉のエネルギー効率値がもっとも低く、山口、岡山、大分、千葉をはじめとする石油化学コンビナートが立地する地域においてエネルギー効率値は総じて低い。石油化学コンビナートでは、エネルギー消費における石炭、灯油、ガス需要の割合が大きく、電化が十分に進展していないことが原因であると推察される。

エネルギー効率値の変化率をみると特徴的なのは次の二点である。第一は多くの地域で平均スコアが改善していることである。最もスコアが改善したのは徳島であり、エネルギー効率値は2.76%ポイント上昇している。次いで、青森が2.67%ポイント、宮崎が2.19%ポイント改善している。これらの地域では工場の電化の進展がエネルギー効率の改善として結実している可能性がある。第二は大都市地域でエネルギー効率が悪化していることである。東京、大阪、埼玉、千葉、神奈川といった大都市地域でエネルギー効率が悪化している。これはオフィスを中心とする第三次産業のエネルギー効率が悪化していることが影響していると推察される。

表5 エネルギー効率値の都道府県ランキング

順位	都道府県	エネルギー 効率値	効率値の 変化率	順位	都道府県	エネルギー 効率値	効率値の 変化率
1	長野	0.94	-0.02	25	大阪	0.50	-0.06
2	滋賀	0.93	0.41	26	新潟	0.49	0.70
3	群馬	0.91	0.67	27	兵庫	0.49	0.03
4	山梨	0.89	-0.05	28	岩手	0.49	0.16
5	栃木	0.86	1.02	29	島根	0.49	0.74
6	奈良	0.86	-0.86	30	秋田	0.47	0.48
7	石川	0.83	0.12	31	三重	0.46	1.52
8	京都	0.82	0.08	32	神奈川	0.46	-1.62
9	静岡	0.81	1.36	33	宮城	0.42	-0.46
10	福島	0.77	0.54	34	和歌山	0.40	1.21
11	愛知	0.75	0.81	35	広島	0.39	0.50
12	富山	0.73	0.99	36	福岡	0.37	-0.28
13	福井	0.71	1.06	37	茨城	0.36	0.74
14	山形	0.71	0.55	38	宮崎	0.35	2.19
15	岐阜	0.69	0.31	39	高知	0.34	0.31
16	埼玉	0.68	-0.58	40	青森	0.34	2.67
17	徳島	0.67	2.76	41	愛媛	0.29	0.06
18	佐賀	0.65	0.64	42	山口	0.29	1.33
19	鳥取	0.59	-1.98	43	沖縄	0.28	0.39
20	東京	0.58	-0.99	44	岡山	0.27	-0.03
21	熊本	0.56	0.29	45	北海道	0.26	-0.03
22	長崎	0.53	0.43	46	大分	0.23	0.23
23	香川	0.52	0.84	47	千葉	0.23	-0.48
24	鹿児島	0.52	0.35				

(注) 表の値は、モデルAで推定されたエネルギー効率値をもとに計算された。

図2は電化率とエネルギー効率の期間平均値について横断面でプロットしたものである。図からは明確に右上がりの相関関係が観察される。つまり、電化が進んでいる地域ではエネルギー効率の水準が高い。例えば、滋賀、山梨、長野といった製造工場が集中立地する地域や、東京といった業務オフィスが集中する地域は右上に位置する一方、大分や岡山、山口、千葉などの石油化学コンビナートを有する地域は右下に位置している。

図3 電化率とエネルギー効率値の動学的関係

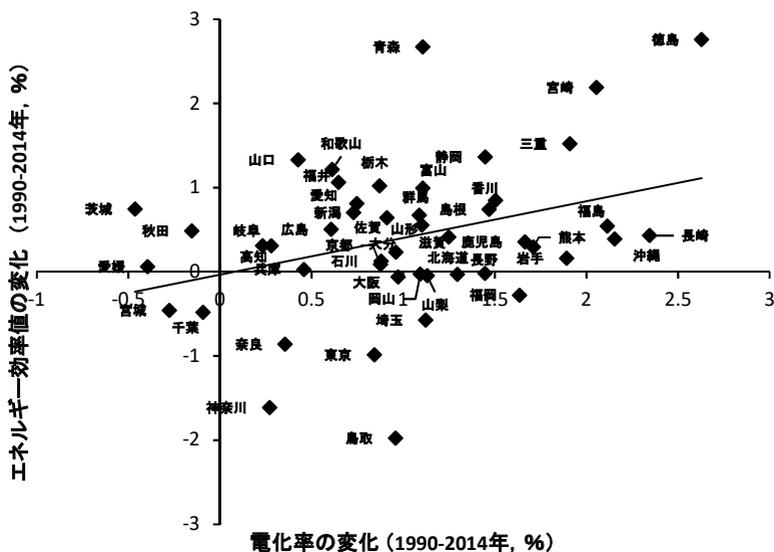


表6 電化率の決定に関するパネル推定の結果

	推定値		標準誤差
<i>Constant</i> (δ)	1.045	*	(0.416)
δ_{KL}	0.365	**	(0.077)
δ_{LN}	-0.140		(0.127)
δ_{FR}	0.328	**	(0.051)
δ_{LP}	0.348	**	(0.076)
δ_{CDD}	0.001		(0.004)
δ_{HDD}	0.019		(0.015)
$\overline{R^2}$	0.9783		
F 検定	696.30	**	[0.000]
Hausman 検定	37.26	**	[0.000]

(注) 1. 表は固定効果モデルの結果を表している。
 2. **および*は有意水準1%および5%であることを示している。
 3. [括弧]の値はp値である。

可能性を示している。この生産性の変数の係数値の大きさは相対的に大きく、電化率に与えた影響は大きい。気温については冷房度日に関する係数 (δ_{CDD}) も暖房度日に関する係数 (δ_{HDD}) も統計的に有意ではなかった。

以上から、工場や事業所の機械化と生産性が電化率と密接な関係があり、エネルギー効率の決定に重要な影響を及ぼしている可能性があることが分かった。特に、生産性は工場や事業所の電化率を高めることを通じてエネルギー効率を改善させる。そのため、工場やオフィスの生産性の改善を促す政策を実施することが地域全体の省エネにつながる可能性がある結論付けられる。

4. 結論と展望

本研究はエネルギー需要フロンティア関数を用いて、日本の産業部門における地域エネルギー効率の水準とその要因を分析した。日本の産業部門における地域エネルギー効率を分析した研究事例は知る得る限りにおいて少なく、研究の蓄積は乏しい。本研究では Otsuka (2018b) の知見を踏まえて観測期間を拡張し、地域エネルギー効率を改善する要素として「電化率」と「製造業比率」の妥当性を統計的に評価した。その結果、以下の3点が明らかとなった。

第一に電化率はエネルギー効率を高める点である。オフィスや工場の電化を促進する政策を行うことが地域全体のエネルギー効率の改善につながる可能性がある。この点は先行研究と同様の傾向が見られることが確認された。第二は製造業比率が高い地域ほど、エネルギー効率が高いことが新たに示された。製造業ではエネルギー消費原単位が改善し、省エネが進展している。その実態を分析結果は表している。第三は電化率を上昇させるには生産性を高めることが有効であることであることが確かめられた。この結果は、工場やオフィスの生産性を高めることが電化の促進と両立し、結果として地域全体のエネルギー効率の改善に大きく寄与することを示唆している。例えば、働き方改革の一環としてテレワークを進めてオフィス

の滞在時間を減少させることは労働の質の向上に繋がり、結果としてエネルギー効率を高める可能性がある。また、ペーパーレスによる業務文章の電子化や業務システムの導入、小型オフィス機器（タブレット等）の導入等を進めてオフィスの電化を促進することは業務全体の効率を改善させ、エネルギー効率が改善する可能性がある。こうした結果は生産性の上昇とエネルギー効率の改善が両立することを示しており、ポーター仮説 (Porter and Van der Linde 1995) が成立する可能性を示している。東日本大震災後のデータを踏まえた分析においてもこの可能性が成立することがこの研究を通じて明らかにされた。

結論として、各地域のエネルギー市場における適切な競争環境の整備を前提として、工場や事業所の電化を促すことが産業部門のエネルギー効率を高める上で有効であるといえる。電化は二酸化炭素の排出量を減少させることによって環境効率も高める。そのため、この分析結果はエネルギー効率と環境効率の改善の両者を達成する鍵として、電化の促進が重要であることを示している。電化の有効性に関する結果をより確実にするためには、我々はエネルギーの需用用途別分析への拡張や、この傾向が諸外国のデータにおいても確かめることができるかどうかについて検証を行う必要があるだろう。

将来の研究課題はマイクロとマクロの両方の観点に関連する。マイクロ的観点からの研究課題は、エネルギー源としての電力のエネルギー効率性について、節電も含めたより多角的な視点から検討することである。家庭部門については Otsuka (2017b) において検討されているが、産業部門については十分な検討が行われていない。産業部門における電力の消費効率を考えるうえで重要な要素は、照明を含む工場設備の効率と空調や廃熱の性能をどのように考慮するかである。これらの要素を定量的に把握することは我々の分析課題として残されている。今後は、工場や事業所の特性のエネルギー効率に対する影響をより詳細に検証していくことが必要となる。

マクロ的観点からの研究課題は、都市部の人口密度の上昇が地域のエネ

ルギー効率にどのように影響を与えるかを明らかにすることである。例えば、先進国では都市の持続可能性の観点から都市のコンパクト化が推進されている。都市部の人口密度の上昇はヒートアイランド現象を引き起こし、エネルギー効率を悪化させる。その一方で都市中心部への人口集中は公共交通機関の利用を促進するメリットもある。さらに、都市中心部は戸建住宅よりも集合住宅が多く、集合住宅は戸建て住宅と比較すると断熱性の観点等からエネルギー効率は高い。Otsuka (2019a) で議論されているように、都市中心部に居住するスタイルを促進させることは地域全体のエネルギー効率を高める可能性がある。これらの問題の解決策を検討していくことはエネルギー効率に関する我々の認識をより一層深めることになるだろう。

謝辞

この研究は科学研究費補助金（課題番号 18K01614）による資金援助を受けている。

参考文献一覧

英文文献

- Aigner, D. J, Lovell, C. A. K. and Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function model. *Journal of Econometrics*, 6(1), pp.21-37.
- Boyd, G. A. (2008). Estimating plant level energy efficiency with a stochastic frontier. *The Energy Journal*, 29(2), pp.23-43.
- EIA (1995). Measuring energy efficiency in the United States' economy: a beginning. Energy Information Administration, DOE/EIA-0555(95)/2, Washington, DC, USA.
- EIA (2013). *International Energy Outlook 2013*. U.S. Energy Information

Administration.

- Filippini, M. and Hunt, L. C. (2011). Energy demand and energy efficiency in the OECD Countries: a stochastic demand frontier approach. *The Energy Journal*, 32(2), pp.59-79.
- Filippini, M. and Hunt, L. C. (2012). U.S. residential energy demand and energy efficiency: a stochastic demand frontier approach. *Energy Economics*, 34(5), pp.1484-1491.
- Filippini, M., Hunt, L. C. and Zoric, J. (2014). Impact of energy policy instruments on the estimated level of underlying energy efficiency in the EU residential sector. *Energy Policy*, 69, pp.73-81.
- IEA (2009). Progress with implementing energy efficiency policies in the G8. International Energy Agency Paper.
- Hu, J. L. and Wang, S. C. (2006). Total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy Policy*, 34(17), pp.3206-3217.
- Jondrow, J., Knox Lovell, C. A., Materov, I. S. and Schmidt, P. (1982). On the estimation of technical inefficiency in the stochastic frontier production function model. *Journal of Econometrics*, 19(2), pp.233-238.
- Lin, B. and Du, K. (2013). Technology gap and China's regional energy efficiency: a parametric metafrontier approach. *Energy Economics*, 40, pp.529-536.
- Lin, B. and Du, K. (2014). Measuring energy efficiency under heterogeneous technologies using a latent class stochastic frontier approach: an application to Chinese energy economy. *Energy*, 76(1), pp.884-890.
- Lin, B. and Du, K. (2015). Modeling the dynamics of carbon emission performance in China: a parametric Malmquist index approach. *Energy Economics*, 49, pp.550-557.
- Otsuka, A. (2017a). *Regional Energy Demand and Energy Efficiency in Japan*. Springer, Switzerland.
- Otsuka, A. (2017b). Determinants of efficiency in residential electricity demand:

- evidence from Japan. *Energy, Sustainability and Society*, 7, Article number: 31.
- Otsuka, A. (2018a). Regional determinants of energy efficiency: residential energy demand in Japan. *Energies*, 11(6), Article number: 1557.
- Otsuka, A. (2018b). Determinants of energy demand efficiency: evidence from Japan's industrial sector. In: Intech Open (eds) *Energy policy [working title]*. doi:10.5772/intechopen.81482
- Otsuka, A. (2019a). How do population agglomeration and interregional networks improve energy efficiency? *Asia-Pacific Journal of Regional Science*, forthcoming. doi:10.1007/s41685-019-00126-7
- Otsuka, A. (2019b). Natural disasters and electricity consumption behavior: a case study of the 2011 Great East Japan Earthquake. *Asia-Pacific Journal of Regional Science*, 3(3), pp.887-910.
- Otsuka, A. and Goto, M. (2015). Estimation and determinants of energy efficiency in Japanese regional economies. *Regional Science Policy & Practice*, 7(2), pp.89-101.
- Porter, M. E. and Van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), pp.97-118.
- Stern, D. I. (2012). Modeling international trends in energy efficiency. *Energy Economics*, 34(6), pp.2200-2208.
- Zhou, P., Ang, B. W. and Zhou, D. Q. (2012). Measuring economy-wide energy efficiency performance: a parametric frontier approach. *Applied Energy*, 90(1), pp.196-200.

邦文文献

- 日本エネルギー経済研究所(2018)『EDMC エネルギー・経済統計要覧2018』, 省エネルギーセンター.

