

人口減少に着目した 家庭の自家用車による輸送需要の将来推計

Estimating the Future Household Transportation Demand by Private Car Focusing on the Population Decline

星野 優子 *・森田 圭 *

Yuko Hoshino

Kei Morita

In this study, we focus on the transportation demand of passenger cars in Japanese households, and estimate a Tobit model of the annual average mileage by passenger cars for each household based on the Survey data of Household CO₂ Emission which was published by the Ministry of the Environment. Furthermore, using this model, we make a prediction of the transportation demand of passenger cars in Japanese households by 2040 based on the future population and number of households as estimated by the Institute of Population and Social Security Research.

Our results show that if the population is concentrated in a region with less car mileage, it is expected that the total car mileage in Japan will decrease faster than the rate of population decline.

Keywords : Household survey, Car Mileage, Tobit Model, Global warming

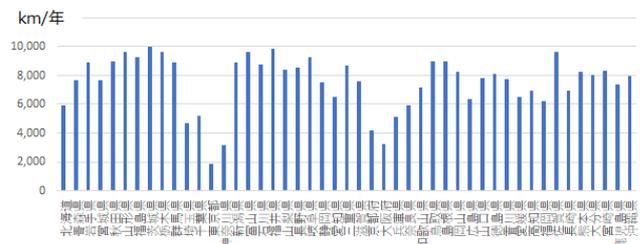
1. はじめに

地球温暖化防止の観点から、運輸部門においても省エネや CO₂ 排出量の削減の取り組みが求められている。燃費向上、次世代車利用や物流効率化といった省エネ、省 CO₂ 対策及びその効果を検討するベースとなるのが、将来の輸送需要の見通しである。このうち家庭における輸送需要は、世帯員各人の移動の必要量に相当し、通勤・通学だけでなく、レジャー、通院など様々な移動からなる。本研究では、今後予想される社会やライフスタイルの変化の要因はひとまず捨象したシンプルなモデルにより、人口および世帯の規模とそれらの地域差に着目し、その将来動向から、日本の家庭における輸送需要の将来予測の方法を検討する。

図1は、国交省の燃料消費統計から、都道府県別に、2015年時点での家庭の世帯平均の年間総走行距離を比較したものである。ただし、バスを除く旅客自家用車には、企業利用分も含まれることから、ここでは、総合エネルギー統計から、旅客用自家用のガソリン、軽油のうち、家計+企業利用に占める家計使用のシェア0.62を乗じることで、家計寄与分を推計した。図より、同じ首都圏であっても、東京と北関東では5倍もの開きがあることを確認できる。

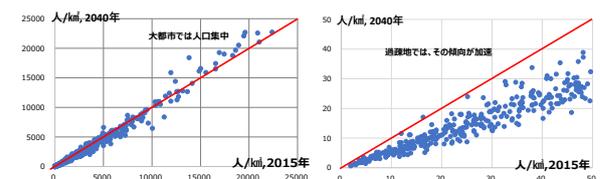
図2は、国立社会保障人口問題研究所の市区町村別の将来人口推計（中位推計）値から、市区町村別の人口密度に

ついて、2015年から2040年の変化をみたものである。左図の全サンプルでみるように、人口密度が1万人/km²以上の市区町村では、人口密度が高まる傾向がみられるのに対し、右図の人口密度が50人/km²以下の市区町村ではさらに過疎



出所：国交省「燃料消費統計」より燃料別都道府県別25車種別走行距離の旅客自家用（除くバス）（2015年度）、経産省「総合エネルギー統計」より家計寄与分、著者ら推計

図1 都道府県別の世帯当り平均年間走行距離（2015年度）



出所：国立社会保障人口問題研究所、「日本の将来人口推計」中位推計値より著者ら作成

図2 市区町村別の人口密度の将来予測（2015, 2040年）

左図：全市町村+東京都23区

右図：人口密度50人/m²以下の市町村

*ENEOS株式会社 中央技術研究所 技術戦略室
〒100-0003 東京都千代田区大手町 1-1-2
E-mail: hoshino.yuko@eneos.com, morita.kei@eneos.com

化が進行する見通しであることがわかる。

仮に、より走行距離の少ない地域への人口集中が進行する場合には、日本全体の家庭部門の輸送需要は、より輸送需要の少ない世帯の増加を意味することから、自動車の総走行距離は、人口減少のスピードよりも早く減少することが予想される。そこで本研究では、こうした地域による走行距離の違いと地域別の人口動態の変化を踏まえた将来の輸送需要を見通すことのできる基本的な枠組みを検討する。

以下では、日本の家庭における乗用車による輸送需要に焦点を当て、環境省の「家庭部門のCO₂排出実態調査(以下、「家庭のCO₂実態調査」と呼ぶ) [1]の個票データをもとに、世帯ごとの乗用車による年間平均走行距離のモデルを推計する。さらにこのモデルを用いて、社会保障人口問題研究所による市区町村別の将来人口および都道府県別の世帯数推計を基に、2040年までの日本の家庭における乗用車による輸送需要の予測を試みる。

自動車輸送に関する個票データとしては、交通センサスOD調査、パーソントリップ調査などがある[2]。大規模な個票データを用いた、自動車の保有や輸送需要に関する先行研究[3]では、交通センサスのデータを用いて、自動車保有台数と1台当たりの走行距離が分けてモデル化されており、後者の走行距離について、走行ゼロのデータを含めた後述するTobitモデルを用いて分析している。説明変数には、人口密度以外にも就業者数、免許保有者数、収入、燃費、女性免許保有率といった多くの要因が考慮されているが、保有台数のモデルに比べて走行距離のモデルでは、必ずしも説明力の高いモデルが得られないことなどを指摘している。

2. 分析の枠組み

2.1 分析に用いたデータ

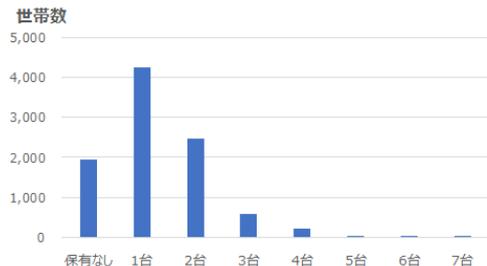
図3は、今回分析に用いた2017年度の「家庭のCO₂実態調査」の全9505世帯の個票データについて、調査世帯の都道府県別の分布を整理したものである。北海道、沖縄県の世帯が多いなど、調査世帯が、必ずしも人口比に応じて得られていないことがわかる。そこで本研究では、モデルのパフォーマンスを確認するために、図1でみた国交省の燃料消費統計も併せて参照する。

図4は、「家庭のCO₂実態調査」から、自動車保有状況別の世帯数分布をみたものである。保有しない世帯1949世帯を含め、保有台数が3台までの世帯で全世界帯の97%を占めることがわかる。この個票データでは、世帯数世帯の自動車保有状況(最大3台まで)と各保有自動車の使用状況(年間走行距離)の情報が得られる。分析では、世帯単位の年間走行距離として、自動車を保有しない世帯のゼロを含む



出所：環境省「家庭のCO₂実態調査」より著者ら作成

図3 調査世帯の都道府県別世帯数



出所：環境省「家庭のCO₂実態調査」より著者ら作成

図4 自動車保有状況別の世帯数分布(2017年度)

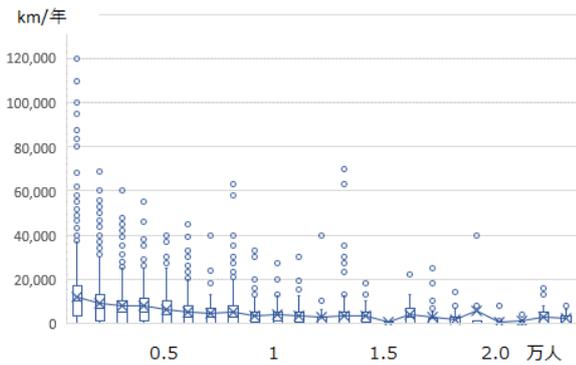
最大3台の自動車の走行距離の合計を用いる。

表1は、「家庭のCO₂実態調査」の9505世帯のサンプルについて、全国及び、三大都市圏の4都府県およびそれ以外の道府県別に、自動車保有台数別の世帯数、世帯当たり平均走行距離をみたものである。全国では、調査世帯の約8割の世帯が少なくとも1台以上の自動車を保有しているのに対し、東京都、大阪府についてみると、乗用車を所有している世帯は、全世界帯の概ね半分にとどまる。また、乗用車を2台所有している世帯は、全世界帯では3割を超えているのに対し、東京都、神奈川県、大阪府では1割以下に

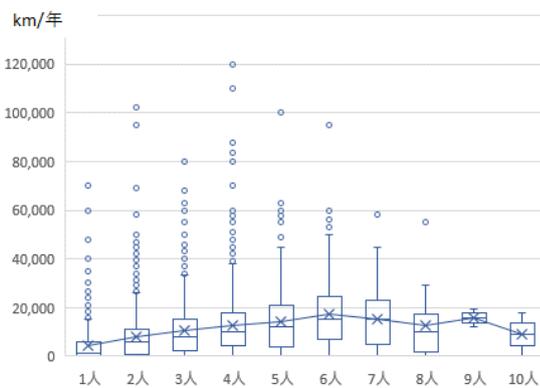
表1 自動車車種別の世帯数世帯当たり平均走行距離

	世帯数			世帯当たり年平均走行距離(km)		
	1台目	2台目	3台目	1台目	2台目	3台目
全国						
ガソリン車(含ハイブリッド)	7,309	3,221	818	8,504	5,634	4,056
ディーゼル車(含ハイブリッド)	155	56	16	10,873	5,982	6,144
電気自動車	30	10	3	11,420	6,780	5,000
プラグインハイブリッド車	33	3	2	11,364	9,000	4,350
その他(LPG車、燃料電池車等)	12	8	5	2,033	2,838	3,820
その他(不明)	17	18	10	6,712	1,328	1,500
自動車保有なし	1,949	-	-	-	-	-
全車種計						
東京都	273	30	5	6,100	4,193	4,620
自動車保有なし	265	-	-	-	-	-
神奈川県	209	27	3	5,667	3,456	367
自動車保有なし	135	-	-	-	-	-
愛知県	459	212	52	8,035	5,315	3,792
自動車保有なし	82	-	-	-	-	-
大阪府	275	46	10	6,507	4,343	3,310
自動車保有なし	216	-	-	-	-	-
その他の府県	6,340	3,001	784	8,891	5,690	4,106
自動車保有なし	1,251	-	-	-	-	-

出所：環境省「家庭のCO₂実態調査」より著者ら作成



注：○は四分位範囲の1.5倍を越える外れ値を示す。
 出所：環境省「家庭のCO₂実態調査」より著者ら作成
図5 居住地の人口密度と世帯当たり年間総走行距離



注：○の各点は四分位範囲の1.5倍を越える外れ値を示す。
 世帯人数が10人以上の1世帯は含まず。
 出所：環境省「家庭のCO₂実態調査」より著者ら作成
図6 世帯人員数と世帯当たり年間総走行距離

とどまる。また三大都市圏のうち、中部圏の愛知県では、東京都、神奈川県、大阪府と比べ、自動車保有の比率、世帯当たり年平均走行距離ともに大きくなっていることがわかる。

次に、図5、図6は、「家庭のCO₂実態調査」の全世帯を対象に、それぞれ世帯当たりの年間総走行距離と、居住地の市区町村の人口密度および世帯人員数の関係をみたものである。図5から、人口密度が高くなるにつれ、年間走行距離は短くなる傾向が読み取れる。図6からは、世帯人員6人までの世帯では、世帯人員数の増加につれて年間走行距離も伸びる傾向があることを確認できる。

2.2 分析に用いたモデル

以下では、世帯属性から世帯当たりの年間平均走行距離を説明するモデルを用いて分析する。ここでは、自動車を保有するかどうかという意思決定も含めて分析するために、自動車を保有している世帯だけでなく、保有していない世帯

帯の情報も含めて分析する。そこで、Tobin^[4]の考え方を基にした、従属変数がゼロか正の値をとる標準Tobitモデルを用いる。モデルは以下のように定式化できる。

$$y_i^* = x_i' \beta + u_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$y_i = \begin{cases} y_i^* & y_i^* > 0 \\ 0 & y_i^* \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{ここで、} u_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (3)$$

パラメータ β は、以下の対数尤度関数の最尤推定量として求めることができる。ここで ϕ は標準正規分布の密度関数、 Φ は累積分布関数である。

$$\ln L = \sum_{i \in (y_i = y_i^*)} \{ \ln \phi[(y_i - x_i' \beta) / \sigma] - \ln \sigma \} + \sum_{i \in (y_i = 0)} \ln \Phi(-x_i' \beta / \sigma) \quad (4)$$

ここで被説明変数 y は、世帯当たりの年間走行距離、説明変数 x としては、世帯が居住する市区町村の人口密度、世帯人員数の2つを用いた。モデルの推定には、TSP^[5]を用いた。

Tobitモデルについては、ゼロ値の決定過程を別に扱うサンプル・セレクションモデルとしてHeckmanの2段階推定法への拡張が考えられる。上記に当てはめた場合には、自動車保有の有無と走行距離を分けてモデル化することに相当するが、本研究では将来予測のための基本モデルとするために説明変数を人口要因に限ったことから、よりシンプルな標準Tobitモデルを用いている。

3. 分析結果

3.1 世帯当たり年間走行距離に関する推定結果

モデルの推定結果を表2に示す。表では、「家庭のCO₂実態調査」の全9505世帯を対象にした「基本モデル」の推

表2 モデルの推定結果

	基本モデル	参考モデル：地域別の特徴分析用						
		地域ダミー	東京都モデル	神奈川県モデル	愛知県モデル	大阪府モデル	その他道府県モデル	
定数項	共通	1915**	-	-2245	-1568	5823**	-1294	2227**
	東京神奈川	-	1604*	-	-	-	-	-
	愛知	-	3582**	-	-	-	-	-
	大阪	-	141	-	-	-	-	-
	その他	-	1845**	-	-	-	-	-
居住市区町村の人口密度	-1.092**	-1.058**	-0.469**	-0.410**	-1.368**	-0.698**	-1.506**	
世帯人員数	3062**	3054**	2528**	2124**	2779**	2788**	3124**	
実績値と計算値の相関係数の二乗値	0.406	0.407	0.222	0.232	0.457	0.306	0.382	
サンプル数	9505	9505	538	344	541	492	7590	
市区町村別予測値の合計から求めた全国計の誤差率	1.08%	1.16%			-1.25%			

注：**片側1%で有意、*片側5%で有意
 出所：環境省「家庭のCO₂実態調査」個票データを用いた分析結果より著者ら作成

定結果を左端にまとめている。さらに三大都市圏の特徴や地域間の違いを見るための「参考モデル」として、全サンプルを対象にした「基本モデル」に地域別のダミー変数を加えた「地域ダミーモデル」のほか、サンプルを、東京都、神奈川県、愛知県、大阪府とそれ以外の地域を分けて推定した「地域別モデル」の推定結果を載せている。

まず、「基本モデル」の推定結果では、居住市区町村の人口密度は、係数-1.092 で有意な説明力を持つ。ここで符号がマイナスになるのは、人口密度が高い地域では公共交通機関への依存度も高く走行距離は相対的に短くなるのに対し、そうでない地方では、移動にあたってはより自動車に依存することなどを反映していると考えられ、図5とも整合的である。もうひとつの説明変数である世帯人員数は、係数3062 でやはり有意な説明力を持つ。ここで係数の符号はプラスとなるのは、世帯員の数が増えるにつれ世帯当たりの総走行距離が増えることを意味しており、図6とも整合的である。

次に、「参考モデル」の推定結果から地域別の特徴についてみていきたい。まず、居住市区町村の人口密度は、いずれのモデルにおいてもマイナスで有意な説明力を持つ。このうち三大都市圏にある都道府県別のモデルでは、それ以外の地域と比較して、人口密度の係数の絶対値は小さい。特に、東京都、神奈川県では、それ以外の地域の半分以下になっていることが確認できる。これは、特に両都県では、人口密度が高く公共交通機関も発達しているためと考えられる。もうひとつの説明変数である世帯人員数は、いずれのモデルにおいてもプラスで有意な説明力を持つ。また、全国を対象としながら地域別の定数項ダミー変数を用いたモデルでは、愛知県のダミー変数が最も大きく推定されていることがわかる。表1でみたように、愛知県では自動車保有世帯の割合が非常に高いことが影響していると考えら

れる。

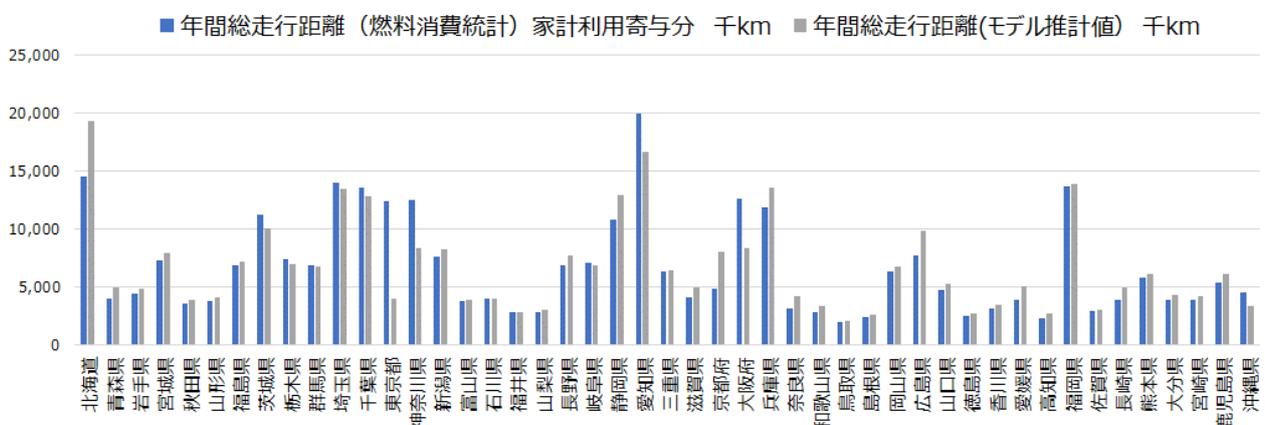
今回使用した被説明変数にゼロを含むタイプのTobitモデルでは、モデルの説明力を示す決定係数を推計できないことから、ここでは実績値とモデルによる計算値の相関係数の二乗値を決定係数の代わりとして用いている。表2からその値をみると、「基本モデル」では0.406 であるのに対し、地域別モデルでは、愛知県では0.457 と高いものの、そのほかの都府県では0.222~0.382 と高くない。

ところで、日本の総輸送需要の予測モデルとしての有用性を確認するためには、各々の世帯別の走行距離の説明力だけでなく、世帯総数を乗じた総走行距離の集計値について、地域あるいは全国単位での説明力を確認する必要がある。

表2の最終行は、各モデルに、2015年の各市町村の人口密度、平均世帯人員数を与えて推計した各市町村の年間総走行距離を全国集計した値を、国交省の燃料消費統計の実績値と比較したときの誤差率である。これによると、個別に推定した地域別のパラメータを用いた場合の誤差率は-1.25%だったのに対し、全国について「基本モデル」で推定した同一のパラメータを用いた場合の誤差率は1.08%とより小さくなることが確認できる。

このように、市区町村の結果を集計した全国合計でのモデルの説明力は高いものの、地域別にみるとモデルの説明力には差がみられる点に注意が必要である。図7は、「基本モデル」の説明力を確認するために、同モデルによる市町村別の年間平均走行距離の都道府県別集計値を、図1で使用した国土交通省の燃料消費統計の都道府県別の実績値と比較したものである。

地域による差については、全体としては概ね傾向を捉えているものの、表3には、その中でも特に誤差率が大きな



出所：実績値は図1に同じ。モデル推計値は、表2の「基本モデル」を用いて著者ら作成

図7 都道府県別の年間総走行距離
「基本モデル」推計値と実績値（燃料消費統計）2015年度

表3 「基本モデル」の誤差率（上位5都道府県）

過大推計の上位		過小推計の上位	
道府県名	誤差率	道府県名	誤差率
京都府	66%	東京都	-68%
北海道	33%	大阪府	-34%
奈良県	32%	神奈川県	-33%
愛媛県	30%	沖縄県	-26%
広島県	28%	愛知県	-17%

出所：「基本モデル」を用いた市区町村別将来予測値と国交省燃料消費統計の2015年実績値との誤差率から作成

表4 面積当たりの道路実延長
(表3で取り上げた都道府県について)

kmあたりの道路実延長距離			
道府県名	km	道府県名	km
京都府	2.6	東京都	11.1
北海道	1.1	大阪府	7.2
奈良県	3.4	神奈川県	5.4
愛媛県	3.2	沖縄県	3.6
広島県	2.9	愛知県	8.5

出所：国交省 「道路統計年報」から著者ら作成

都道府県を挙げている。

まず、京都府、北海道、奈良県、愛媛県、広島県では、燃料消費統計に比べて過大推計に、東京都、神奈川県、愛知県、大阪府の三大都市圏および沖縄県では、燃料消費統計に比べて過小推計になっていることがわかる。表4は、これら10都道府県について、面積当たりの道路実延長距離を比較したものである。モデルが過小評価であった三大都市圏を含む5都道府県では、モデルが過大評価であった5都道府県に比べて、高密度の道路網が整備されていることがわかる。この例のように、これら地域では、今回とりあげた人口要因だけでなく、他の要因が影響していると考えられることから、「基本モデル」が適合しにくい地域についてのモデルの改良は、今後の課題としたい。

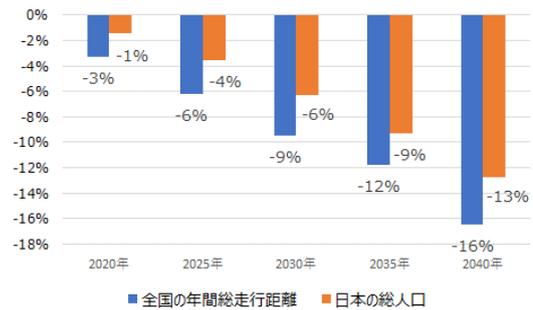
3.2 2040年までの総輸送需要の推計

最後に、社会保障人口問題研究所による、2040年までの日本の将来人口・世帯数予測値から、上記のモデルを用いて、2040年までの家庭部門における自動車による輸送需要の推計を行った。同将来推計では、人口予測については市区町村別の将来推計があるものの、平均世帯人員を推計するために必要な世帯数の将来予測は、都道府県別にしか行われていない。そこで本研究では、各市区町村別の将来人口推計の伸びに合わせて世帯数を推計したうえで、その都道府県別合計値を、社会保障人口問題研究所の都道府県別世帯数予測値に置き換えて、合計調整することで、市区町村別の

世帯数、世帯人員数の予測値とした。

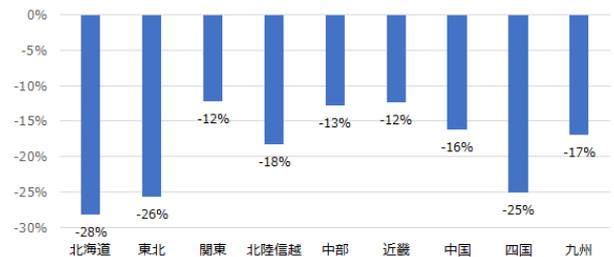
図8は、2015年の燃料消費統計の実績値をベンチマークに、上記の市区町村別の年間総走行距離の将来予測の全国集計値と、総人口の予測値について、2015年比を比較したものである。日本の総人口は、2040年に2015年比で13%減少するのに対し、家庭における自動車による輸送需要としての年間総走行距離は16%減少することがわかる。これは、日本全体でみると、世帯当たりの走行距離が大きな地方での人口減少と、世帯当たりの走行距離が小さな都市部への人口移動を反映したものと考えられる。

他方で、先に表2の推定結果でみたように説明変数「人口密度」のパラメータの符号はマイナスであることから、同一の市区町村についてみると、世帯当たりの走行距離は、人口密度の低下によって増加する可能性を見込んでいることになる。具体的には、過疎化によるバス路線等の廃止や店舗の閉鎖などで、結果的に自家用車による移動距離が長くなる影響に相当する。しかし、同時に世帯人員数、世帯数も減少することから、ほとんどの市区町村では、同一の市区町村についてみても、過疎化による走行距離の長距



出所：基本モデルを用いた市区町村別将来予測値を国交省燃料消費統計の2015年実績値をベンチマークにエリア別に集計

図8 年間総走行距離と総人口の見通し
(全国計、対2015年比)



出所：基本モデルを用いた市区町村別将来予測値を国交省燃料消費統計の2015年実績値をベンチマークにエリア別に集計

図9 地域別の年間総走行距離の将来見通し
(2040年の対2015年比)

離化の影響は相殺され、総走行距離の予測値が減少する。最後に図9は、市区町村別の2040年の総輸送需要の予測値を全国9地域に集計し、2015年を1として比較したものである。最も減少率が大きいのが北海道の△28%で、東北△26%、四国△25%と続く。一方、三大都市圏を含む関東、中部、近畿では△12~13%の減少にとどまることがわかる。ただし地域別の予測値については、先に述べたようにモデル改良の余地があることに注意が必要である。

4. おわりに

輸送部門のエネルギー消費やCO₂排出量を予測には、燃費向上やEV普及などのパワートレインの変化、さらにシェアリングといった様々な要因を検討する必要がある。しかしいずれの場合においても、家庭において自動車が担ってきた輸送需要のボリュームを推計する作業がこれらの基礎になる。

本研究では、環境省の「家庭のCO₂実態調査」の個票データを用いて、市町村別の人口や世帯規模の変化が、家庭における自動車による輸送需要に与える影響を踏まえて、2040年までの輸送需要の見通しを試みた。分析には、人口要因のみに着目したシンプルなモデルを用いたが、全国合計では輸送需要の規模をある程度再現できることを確認した。他方で、地域別の説明力には大きな差異がみられることから、地域によっては人口以外の要因も含めた検討が課

題である。また、図3でみたように、今回、モデル推定に用いた個票データには地域的な偏りもあることから、今後、より多年度の調査結果を用いることが可能になることで、モデルの精度が向上することも期待できる。

謝辞

本研究にあたっては、資源エネルギー学会の「環境省家庭用CO₂排出実態調査研究会」を通して環境省からデータの提供を受けました。関係者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省;『家庭部門のCO₂排出量実態調査 2017年版』
- 2) 松橋啓介, 工藤祐揮, 上岡直見, 森口祐一; 市区町村の運輸部門CO₂排出量の推計手法に関する比較研究, 環境システム研究論文集 Vol. 32, 2004
- 3) 福田大輔, 伊藤海優; 大規模パネルデータと動的離散-連続モデルによる世帯の自動車保有・利用構造の分析, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 70 No. 5, 2014
- 4) Tobin, J.; Estimation of Relationship for limited Dependent Variables, *Econometrica*, 26, pp24-36, 1958
- 5) 和合肇, 伴金美; TSPによる経済データの分析, 東京大学出版会, 1995

家庭 CO₂ 統計の個票データを用いた 給湯機器の保有実態などに関する基礎検討

Basic study on Installation and Use of Water Heaters

using Micro Data of Survey on Carbon Dioxide Emissions from Residential Sector

西尾 健一郎*・中野 一慶**

Ken-ichiro Nishio

Kazuyoshi Nakano

This study elaborates the installation and use of appliances for water-heating, space-heating, and cooking by construction period and area, using questionnaire data of about 10,000 households. National and local governments that have declared to aim for a decarbonized society need to understand the actual condition of technology diffusion to consider necessary policy options. Ministry of the Environment started to implement the Survey on the Actual conditions of Carbon Dioxide Emissions from Residential Sector in 2017. The analysis of its micro data indicates that heat pumps have increased their shares in relatively new detached houses, whereas they have been not widely adopted in apartment houses. The results implied that it is necessary to consider how to promote decarbonization technologies at the point of constructions.

Keywords : Energy Efficiency, Decarbonization, Water heating, Space heating,

1. はじめに

わが国の「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」では、脱炭素社会を今世紀後半のできるだけ早期に実現するというビジョンが掲げられている。また、国レベルのみならず、2050年 CO₂ 排出実質ゼロに取り組むことを表明する自治体も急増している。家庭部門では、省エネ意識の向上や家電・機器の高効率化、断熱性能の向上などのために様々な対策が講じられてきたが、脱炭素社会の実現に向けては、住宅内からの排出を可能な限り削減する「建物脱炭素化」を射程とする検討にも早期に着手する必要がある。筆者らは、米国の州や自治体の建物脱炭素化関連の取組の最新事例とわが国への示唆をまとめた¹⁾。

脱炭素社会を目指すことを宣言した国や自治体は、需要端で CO₂ を直接排出する機器がどの程度設置・利用されているかを把握した上で、必要な政策を講じていく必要がある。そうした検討に資するデータとして期待されるのが、環境省が平成 29 年度より実施している、「家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査」(家庭 CO₂ 統計)²⁾である。政府統計ポータルサイト e-Stat でも、各種属性による有用なクロス集計表が多数公開されている。さらには、エネルギー・資源学会の「家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査利用研究会」では、温暖化防止へ貢献すべく、家庭 CO₂ 統計の調査票情報を直接利用し、多様な視点で分析することとしている。

そこで、本研究では、平成 29 年度家庭 CO₂ 統計の元と

なる 9,505 世帯分の個票データを用いて、給湯機器保有実態などを建築時期や地域別に明らかにする。

分析の着眼点は次の 3 つである。第 1 に、建物脱炭素化を意識して熱分野に焦点をあてる。具体的には、家庭 CO₂ 統計で CO₂ 排出量の多い順に、給湯・暖房・台所用コンロの 3 用途を、2~4 章で分析する。CO₂ 削減の観点から、それら機器のエネルギー源や、高効率なヒートポンプ (HP) 技術を用いた給湯機器 (エコキュートなど)・暖房機器 (エアコン) への移行実態に着目しながら、データを考察する。第 2 に、将来検討にあたっては普及実態への理解が不可欠となることから、建築時期による差異に注目する。新しい住宅でどのような機器が設置・利用されているか、或いは、既築住宅で技術代替がどの程度生じるのかを実績データから理解することには意義がある。第 3 に、自治体の検討にも資することを意識して、地域別の機器構成を 5 章で示す。

個票データ活用の分析上のメリットとして、目的に応じて柔軟にデータ処理できる点があげられる。本分析での具体的例をあげると、ガス機器のエネルギー源が都市ガスか液化石油 (LP) ガスかを特定できることや、計 100% を上回る複数回答方式データを計 100% となる単回答方式データに単純化することができる。また、例えば建て方・建築時期・世帯人数別の機器シェアといったように、公開されていない詳細なセグメントでの実態把握も可能となる。

なお、家庭 CO₂ 統計では、回答者が都市部へ偏る可能性があることを踏まえて、集計の際には都市階級別の世帯数による比例配分を行うこととしている。本分析の機器シェアもこれに準拠し、地域・都市階級補正後の集計値を示す。

*電力中央研究所 社会経済研究所 上席研究員

〒100-8126 東京都千代田区大手町 1-6-1

E-mail : nishio@criepi.denken.or.jp

** 同上 主任研究員

2. 給湯機器の設置実態

調査票では、設置されている給湯機器を、選択肢 10 個の複数回答方式でたずねている。本分析で単回答方式データへ変換するにあたっては、給湯機器については複数回答世帯 (9%) を除外するとシェアに大きなバイアスを与えるおそれがある、太陽熱温水器のように他と併用するのが一般的な給湯機器が存在する、ここで消費量分析を行うわけではないことを考慮し、「不明」(1.7%)・「ない」(0.5%)・「その他」(0.1%) を除外した上で、次の手順でデータ処理をした。①「太陽熱を利用した給湯器」を含む世帯を太陽熱温水器、②「ガス給湯器・風呂がま」を含む世帯を利用ガス種別に基づき都市ガス給湯器と LP ガス給湯器に分類、③「ヒートポンプ給湯機」を含む世帯を HP 給湯機、④「灯油給湯器・風呂がま」を含む世帯を灯油給湯器、⑤「電気温水器」を含む世帯を電気温水器、⑥「ガスエンジン発電・給湯器」・「家庭用燃料電池」を含む世帯をコージェネレーション、⑦「ガス小型瞬間湯沸器」を含む世帯 (=実際には⑥までの処理により単独回答世帯のみ) を利用ガス種別に基づき都市ガス給湯器と LP ガス給湯器に分類した。①は太陽熱温水器の性格を考慮、②～⑥は複数回答方式での値が

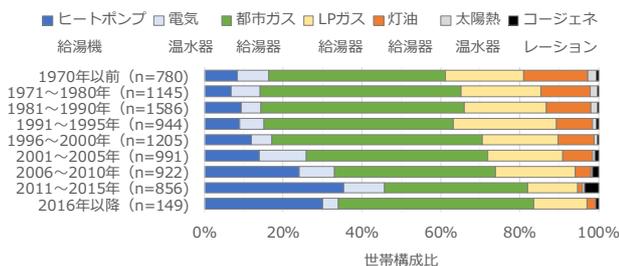


図1 建築時期別の給湯機器シェア

大きい順に処理、⑦は台所などの専用であることを踏まえて最後に分類するものである。本分析の目的に照らして、エネルギー源別に分類することを基本方針としたが、電気式については HP 給湯機と電気温水器を区別し、都市ガス・LP ガス・灯油式もコージェネレーションは区別した。公表値と同じく、2019 年 8 月時点の給湯機器データを用いた。

以上の集計により、本分析での給湯機のシェアは、ヒートポンプ給湯機 13.3%、電気温水器 7.3%、都市ガス給湯器 47.6%、LP ガス給湯器 21.4%、灯油給湯器 8.6%、太陽熱温水器 1.0%、コージェネレーション 0.8% である。変換により公表値と正確には一致しないが、誤差は小さい。

図1に建築時期別、図2に建て方・世帯人員数・建築時期別の給湯機器シェアを示す(建築時期不明は除外)。近年の住宅ほど HP 給湯機のシェアが高い傾向にあり、その主要因は戸建住宅でのシェア上昇である。2011 年以降の値は新築時の導入状況をほぼ表すものと考えられ、戸建住宅では HP 給湯機のシェアが 5 割に迫る。HP 給湯機の販売開始は 2001 年のため、2000 年以前に建築された住宅での状況は、既築交換によりどの程度設置されたかを表し、シェアにして 1~2 割程度である。他方で、集合住宅の HP 給湯機のシェアは、近年建築された住宅でも伸び悩んでいて、既築交換状況を映し出す 2000 年以前に建築された住宅でも極めて低い。セグメントによってはサンプル数が少ない点には留意すべきだが、集合住宅では既築交換が容易でないという実態データからは、脱炭素化に向けては、新築時の HP 給湯機の採用率を向上させていく必要性が高いことを指摘できる。

3. 主暖房機器

調査票では、「最もよく使う暖房機器」を選択肢 14 個の

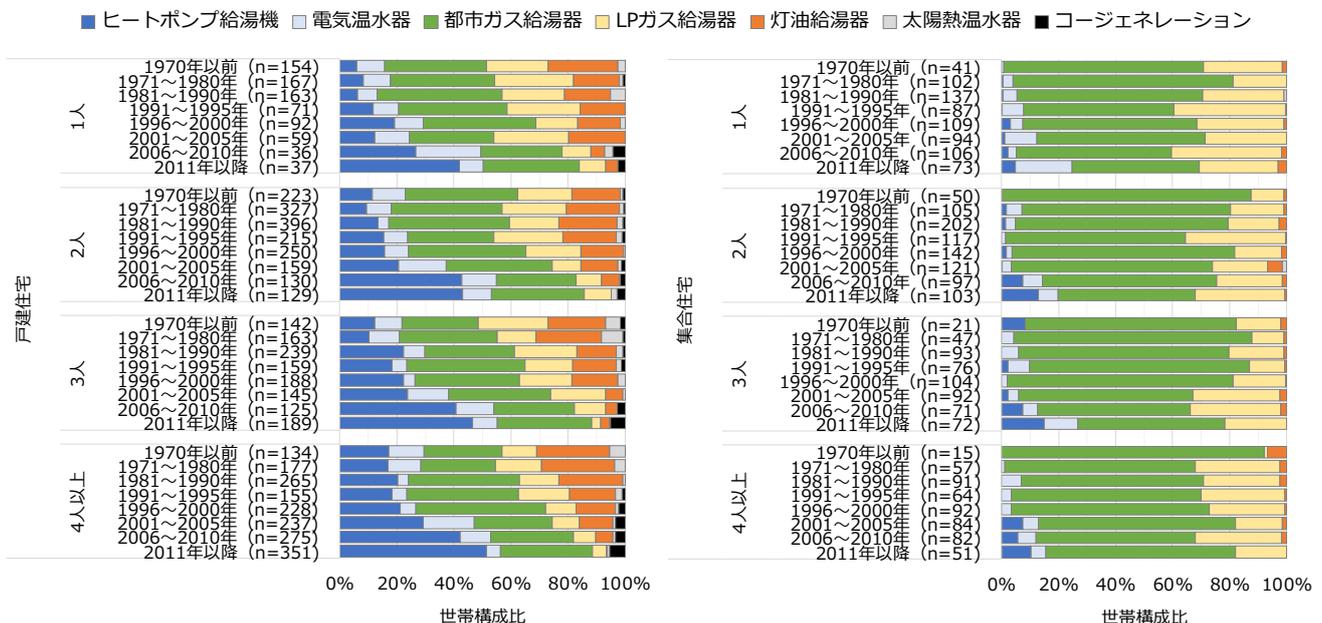


図2 建て方・世帯人員数・建築時期別の給湯機器シェア

単回答方式でたずねている。その建築時期別比較(図3;公表値)によれば、近年建てられた住宅において、エアコンのシェアは6割に迫り、灯油ストーブや電気カーペット・こたつのシェアのシェアは1割程度にまで低下している。それ以外の特徴としては、ガス温水床暖房が2000年代以降の住宅の1割弱で使われるようになってきている。

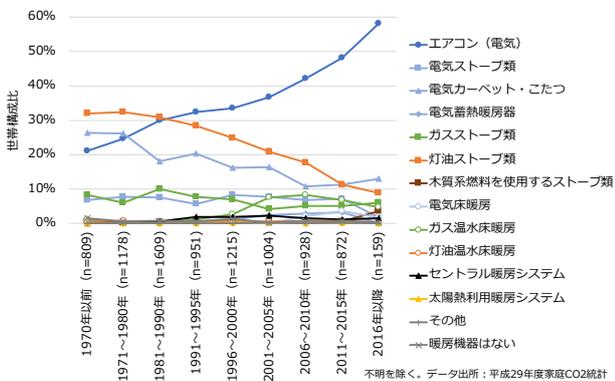
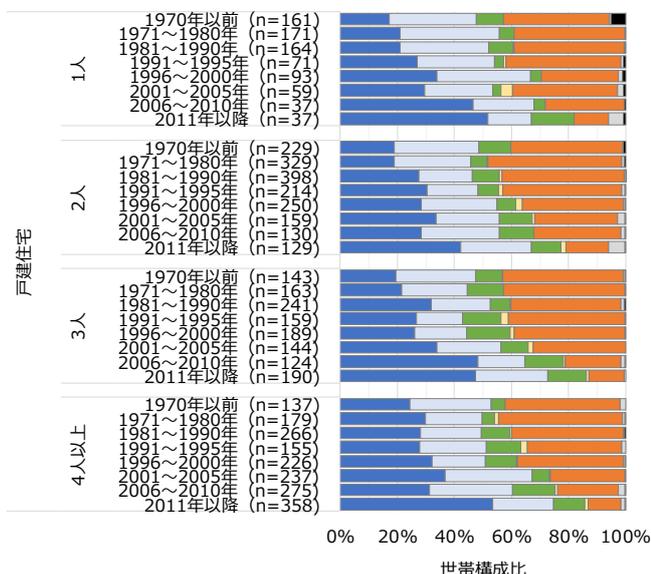


図3 建築時期別の主暖房機器シェア (13分類)

本分析では、主暖房機器をエネルギー源を軸として7種に再分類した。具体的には、①「電気ストーブ類」・「電気カーペット・こたつ」・「電気蓄熱暖房器」・「電気床暖房」及び「セントラル暖房システム」が電気式と別途回答した世帯をその他電気暖房に集約(ヒートポンプ式のものも一部含まれる可能性があるが、本分析ではエアコンと区別することにした)、②「ガスストーブ類」・「ガス温水床暖房」及び「セントラル暖房システム」のうちガス式の世帯を利用ガス種別に基づき都市ガス暖房とLPガス暖房に集約、③「灯油ストーブ類」・「灯油温水床暖房」及び「セントラル暖房システム」のうち灯油式の世帯を灯油暖房に集約、

■ エアコン ■ その他電気暖房 ■ 都市ガス暖房 ■ LPガス暖房 ■ 灯油暖房 ■ その他 ■ なし



④「木質系燃料を使用するストーブ類」・「太陽熱利用暖房システム」・「その他」をその他に集約、⑤「不明」を除外した。最もよく使う機器を1つだけ選ぶため、回答者の主観も混在するし、暖房機器は併用されることが多い。また、他の用途と同様に、本分析で示すのは機器シェアであり、効率や利用スタイルの差異は考慮されない点や、エネルギー消費量やCO₂排出量のシェアではない点に注意されたい。

図4に建築時期別、図5に建て方・世帯人員数・建築時期別の主暖房機器シェアを示す(建築時期不明は除外)。新しい住宅でのエアコン主流化は、セグメントによらない傾向であり、断熱・気密性の向上によるところが大きいと考えられる。電気式ほどではないが、都市ガス暖房のシェアも微増傾向に見えるのは、前述したガス温水床暖房の増加による。建て方で比較すると、集合住宅では、室内燃焼型機器の利用制約もあるため、古い住宅でも電気式暖房のシェアが高い。図5を見る限りはエアコンのシェアは世帯人数にあまりよらないものの、戸建住宅のサンプル数からは、単身世帯ほど古い住宅に住み続ける傾向が強いことがわかる。本稿では割愛するが、戸建住宅を建築時期の区別をせず集計すると少人数世帯ほどエアコンのシェアが低くなるのは、そのためである。

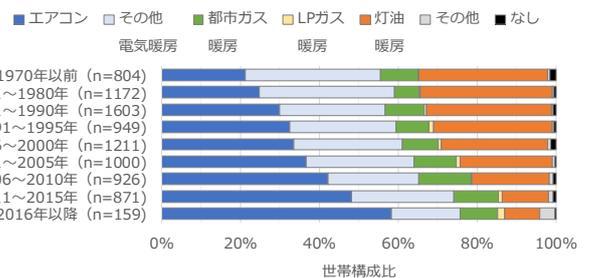


図4 建築時期別の主暖房機器シェア (7分類)

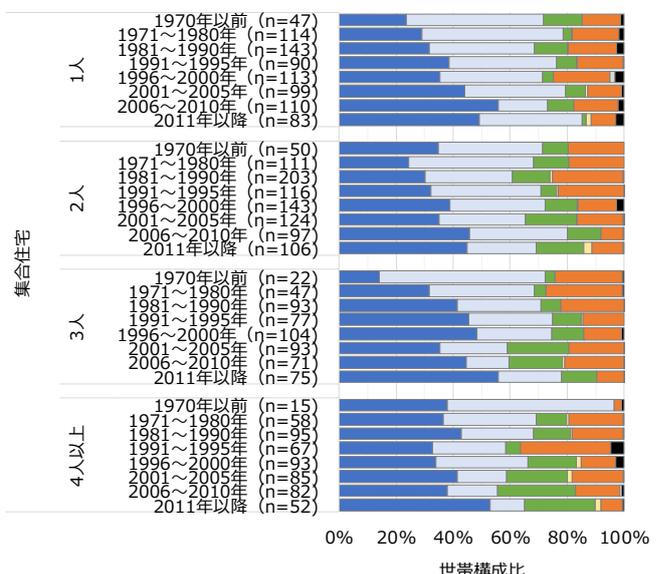


図5 建て方・世帯人員数・建築時期別の主暖房機器シェア

4. 台所用コンロ

調査票では選択肢5個（ガスコンロ・IHクッキングヒーター（IH）・電気コンロ・その他・なし）の複数回答方式でたずねているが、本分析では、複数回答世帯（1.9%）・その他（0.0%）・なし（1.0%）・不明（0.0%）を除外した後、ガスコンロについては利用ガス種別に基づき都市ガスコンロとLPガスコンロに区別した。なお、複数回答世帯の主な内訳は、ガスコンロとIHの併用1.5%と、ガスコンロ・電気コンロの併用0.3%であった。給湯機器のように種別により複数設置の意味合いが大きく異なるわけではなく、比率も小さいので、このような単純化をした。

以上の集計により、台所用コンロのシェアは、都市ガスコンロ48.2%、LPガスコンロ28.2%、IH22.2%、電気コンロ1.4%となった。IHのシェアを詳細に見ると、東京都と神奈川県は共に1割弱にとどまり、その逆に、5章で示すように地方ほどシェアは高い。

図6に建築時期別、図7に建て方・世帯人員数・建築時期別の台所用コンロのシェアを示す（建築時期不明は除外）。新しい住宅ほどIHのシェアは上昇傾向にあり、特に戸建住宅でその傾向は強い。集合住宅では、都市ガスコンロが

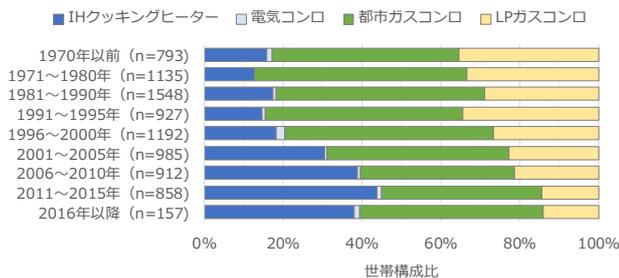


図6 建築時期別の台所用コンロシェア

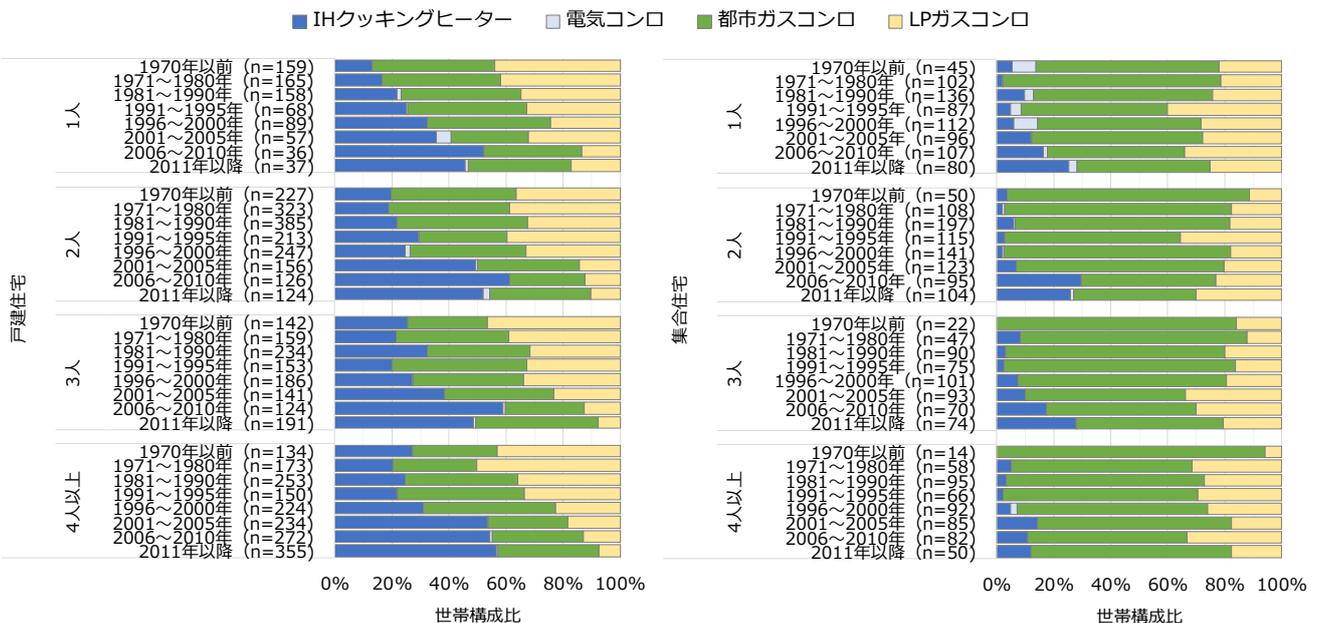


図7 建て方・世帯人員数・建築時期別の台所用コンロシェア

これまでのところ最もシェアの高い機器となっている。電気コンロは2000年以前に建築された単身集合住宅などで一部みられる程度である。

IHの市場が本格的に立ち上がったのは1990年代後半であるため、1995年以前に建築された住宅から、既築交換としての設置状況を垣間見ることができる。図7でそれら住宅を確認すると、戸建住宅では2割程度のシェアがある。一方、集合住宅でのシェアは僅かであり、リフォームによるIHの導入にはバリアがあることが推察される。

5. 全国・地域別の熱分野の機器シェア

前章までの分析に基づき、熱分野の機器シェアを横断比較する。まず、図8では、全国のCO₂排出量構成を上段に示したうえで、下段には給湯機器・主暖房機器・台所用コンロの機器シェアを示す。これら3用途は、家庭のCO₂排出量の5割を占め、機器シェアからは直接燃焼機器も多く残ることがわかる。再エネ主力電源化などの電力供給側対策を進めることで、照明家電製品や冷房に起因するCO₂排出の削減が期待されるだけに、今後は、需要端におけるこれら機器への対策の重要度が増す。

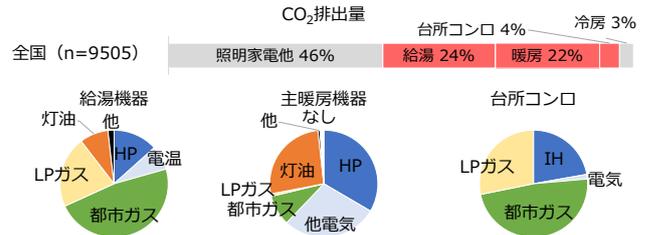
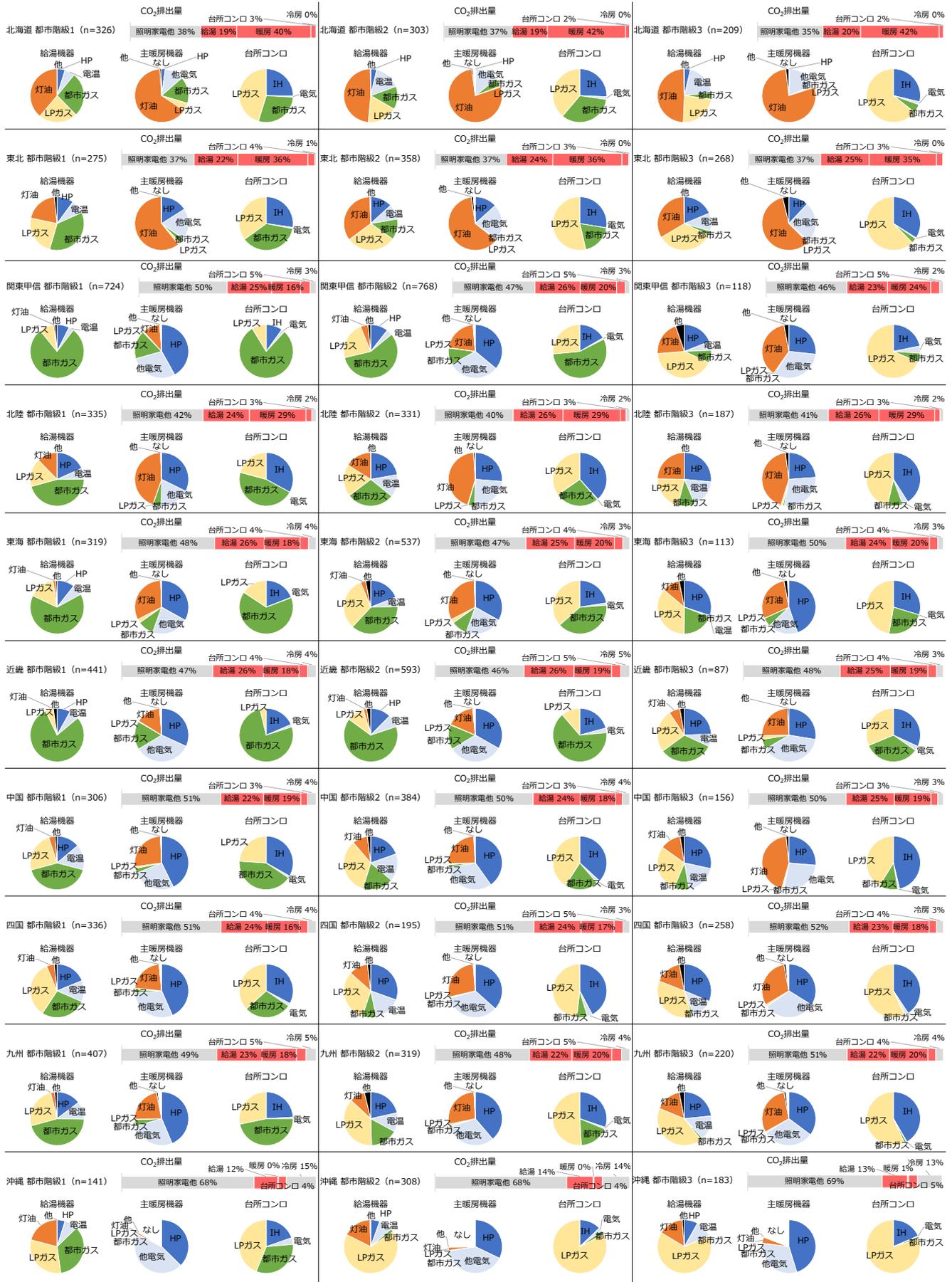


図8 熱分野のCO₂排出量と機器シェア (全国)



注：「HP」はヒートポンプ給湯機・エアコン、「電温」は電気温水器、「IH」はIHクッキングヒーター。上段はCO₂排出量（公表値）シェア、下段は機器シェア。

図9 熱分野のCO₂排出量と機器シェア（地域・都市階級別）

次に、図 8 と同じ形式で、地域及び都市階級別の一覧を図 9 に示す。ここで、「都市階級 1」は都道府県庁所在市及び政令指定都市、「都市階級 2」は人口 5 万人以上の市、「都市階級 3」は人口 5 万人未満の市町村である。左列の都市階級 1 は都市ガス機器のシェアが高く、右列の都市階級 3 では LP ガス機器が増える傾向にある。また、都市階級 3 では電化が進展する傾向にある。3 用途の CO₂ 排出量は、北海道・東北・北陸は 6 割前後、それ以外の地域でも沖縄を除き 5 割前後を占める。また、給湯の CO₂ 排出構成比も 2 割を超える地域・都市階級がほとんどである。

6. おわりに

本研究では、平成 29 年度家庭 CO₂ 統計の元となる約 1 万件の個票データを用いて、給湯・主暖房・台所用コンロ機器のシェアを分析した。建物脱炭素化の検討に資することを目的として、建築時期別のシェアの違いにも着目しながら、近年シェアを伸ばしている技術や、そうした技術が築年数経過した住宅でも普及しているかを探った。

分析結果によれば、比較的新しい住宅、特に戸建住宅では、ヒートポンプ技術による給湯や暖房、IH クッキングヒーターがシェアを伸ばしており、普及技術として確立され、消費者選好も高まっていることが示唆された。消費者が求めるのはこれら技術が提供するサービスであり、脱炭素化が最優先事項でないことは想像に難くないが、技術としての受容性が高まっていることは注目に値する。

その一方で、集合住宅では特にヒートポンプ給湯機の採用が遅れていた。温暖化対策に先導的な自治体は大都市に多いが、都市部では集合住宅が多く、電化率も伸び悩む傾向にある。既築住宅では熱源転換が進みにくい実態も踏まえれば、脱炭素社会の実現に向けては、新築段階において技術選択をどのように促すかを考えていく必要がある。

筆者らが既往研究²⁾で明らかにしたとおり、米国では建物脱炭素化に向けて様々な規制的・経済的・情報的手法が登場し、新築時に適切な技術選択を促す、或いは、既築改修を容易とするように新築時に電化レディ対策を講じるこ

とを求める、といった試みが始められている。住宅のエネルギー設備はロックイン（固定化）しがちなため、家庭 CO₂ 統計が映し出すような実態を考慮に入れて、将来シナリオや必要となる対策を検討していくべきである。

結果を解釈する上での留意点として、機器シェアは実際のエネルギー消費量やサービス水準を表すものではない。また、本稿では機器シェアの比較考察のみを行い、支配要因の統計分析やエネルギー消費量分析や、手法高度化に向けた検討などは実施しなかった。米国の Residential Energy Consumption Survey (RECS) や Commercial Buildings Energy Consumption Survey (CBECS) 関連で多種多様な研究成果が創出されているように、個票データの活用可能性は実態把握にとどまらない。それらについては今後の課題としたい。

謝辞

本研究は、エネルギー・資源学会の「家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査利用研究会」のメンバーとして、実施しました。平成 29 年度家庭 CO₂ 統計の実施に尽力された環境省や委託事業者であるインテージ・住環境計画研究所、学会・研究会の関係者の皆様に、この場を借りて御礼申し上げます。なお、本分析の結果にかかる責任は筆者らが負います。

参考文献

- 1) 西尾健一郎・中野一慶；建物脱炭素化に向けた取組の検討－米国の州や自治体の先進事例とわが国への示唆－，電力中央研究所 研究報告 Y19005 (2020.4).
<https://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/Y19005.html>
- 2) 環境省；家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査（家庭 CO₂ 統計）.
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2/tokei.html>（アクセス日 2020.6.15）

家庭 CO₂ 統計を用いた機器保有状況の予測手法に関する検証

Predicting Appliance Ownership Status using Residential CO₂ Emission Survey Data

向井 登志広 *・田中 拓朗 *

Toshihiro Mukai

Takuro Tanaka

Attention has been focused on efforts to promote energy saving actions by utilizing various data regarding energy use of households. When promoting energy-saving behavior, analysis and prediction of households' equipment ownership status will be able to be used for the personalization of energy-saving tips such as energy-saving measures and home appliance replacement in order to promote behavior change effectively. In this paper, we compared the accuracy of methods for predicting equipment ownership status using the national survey of carbon dioxide emissions from residential sector. We employed four prediction methods for comparison: binary logistic regression, decision tree, random forest and XGBoosting. We also evaluated the importance of explanatory variables by using permutation test, which remove variables' feature by randomizing the values of each variable. We find that machine learning methods such as Random Forest and XGBoosting generate relatively higher prediction accuracy. Furthermore, these methods show less degradation of prediction accuracy when important explanatory variables are permuted from the full model.

Keywords : Home appliances prediction, Machine learning, Residential CO₂ emission survey, Behavior change

1. はじめに

家庭におけるスマートメータの普及や情報通信技術の高度化に伴い、世帯のエネルギー利用に関する各種データを活用して省エネ行動を促す取組みに注目が集まっている。特に、世帯別での機器保有状況を分析・予測することで、省エネ対策や家電買い替えに関するアドバイスをパーソナリ化し、効果的に行動変容を促せるものと期待される。

世帯別での機器保有状況を分析・予測する際、候補となる説明変数は大きく2種類に分類される。第1に、世帯・住宅などの属性情報であり、機器保有状況の要因分析で用いられる場合が多い。例えば Michelsen and Madlener (2012)¹⁾ や Braun (2010)²⁾ は、アンケートデータを用いて、ドイツの家庭部門における暖房機器保有状況について、世帯属性・住宅属性・居住地域などの要因分析を行っている。また、Lillemo et al. (2013)³⁾ は、同様の要因分析をノルウェーで行っている。暖房機器以外にも、給湯機器の保有状況⁴⁾ や、省エネ家電全般⁵⁾ を分析対象にした例もある⁶⁾。

以上の既往研究では、分析手法としてロジスティック回帰が採用される場合が多いが、機械学習など複数の分析手法を用いて結果を比較検証した事例は少ない。数少ない例として、Rao and Ummel (2017)⁸⁾ は、ロジスティック回帰や機械学習により、ブラジル・インドの白物家電普及に係る要因分析結果の比較検証を行っている。世帯属性や住宅属性を用いた機器保有状況に関する分析を行う場合、複数手

法の比較検証を通して、分析結果の頑健性向上や予測精度の改善が見込まれる。

第2に、エネルギー使用量から機器保有状況を特定・予測する場合も想定される。スマートメータや HEMS の普及に伴い、高分解能のエネルギー使用量データを用いて世帯の機器保有状況を特定・予測する既往研究^{9,10)} が蓄積されている。これらの既往研究では時間単位・分単位のエネルギー使用量データを用いられているが、月単位でのエネルギー使用量データでも、暖房機器や給湯機器などの保有状況を予測ができる可能性がある。

本稿では、これら世帯属性・住宅属性や、エネルギー使用量情報を説明変数として用い、機器保有状況の予測手法を検証する。検証のため、環境省が実施している「平成29年度 家庭部門のCO₂排出実態統計調査」(以下、家庭CO₂統計)の個票データを用いる。

以降の構成は以下の通りである。2章では、分析・予測方法の枠組みを述べる。3章では、家庭CO₂統計の概要と本稿で用いるデータ種類を述べる。4章では、機器保有状況の分析・予測結果を述べる。7章では結論を述べる。

2. 方法

2.1 全体像

本稿では、機器保有状況に関する予測手法を、R言語を用いて以下の手順で検証した¹¹⁾。本章では、各ステップについて詳述する。

- Step 1: 保有状況の予測対象とする機器を指定

*一般財団法人 電力中央研究所 社会経済研究所
〒100-8126 東京都千代田区大手町 1-6-1

- Step 2: 保有状況の検証対象とする予測手法を指定
- Step 3: 指定した予測手法について、ハイパーパラメータをチューニング(※決定木・ランダムフォレスト・XGBoostのみ)
- Step 4: チューニング後のパラメータを用いて、保有状況を予測
- Step 5: 説明変数の重要度を評価
- Step 6: 各予測手法について、Step 2~5を繰り返し、予測手法別での保有状況の予測精度を比較
- Step 7: 各機器について、Step 6を繰り返し、機器別での保有状況の予測精度を比較

2.2 保有確率の予測手法

Step 1にて予測対象となる機器を指定した後、Step 2以降では、指定した予測手法を用いて、保有確率の予測を行う。ある世帯*i*が、ある機器を保有している場合に1をとるダミー変数を Y_i としたとき、世帯*i*による機器保有確率 P_i は

$$P_i = \text{Prob}(Y_i = 1 | \mathbf{x}_i)$$

と表される。ここで、 \mathbf{x}_i は説明変数のベクトルであり、後述する説明変数用データを用いる。

本稿では、機器保有状況の予測を2値分類問題として扱う。他方で、例えば、製造年別でエアコンの保有状況を予測対象とした場合、1999年以前・2000~2010年・2011年以降、と3値以上の分類問題として扱うほうが適切な場合もある。しかし本稿では、予測手法の比較検証を優先し、保有状況を2値変数として表される場合のみを想定する。3値以上の分類問題については今後の課題である。

保有確率の推定には、分類問題に用いられる回帰や機械学習の各種手法が候補となりうる。本稿では、二項ロジスティック回帰、決定木、ランダムフォレスト、XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) の4種類について、保有状況の予測精度を比較検証する。特に、XGBoostは、勾配ブースティングを効率処理するアルゴリズムである。他の機械学習手法と比べて、XGBoostでは多くのハイパーパラメータを柔軟に調整できるというメリットがあり、精度向上を報告する事例が増加している。

2.3 予測精度の評価方法

Step 3では、決定木・ランダムフォレスト・XGBoostについて、グリッドサーチによりハイパーパラメータのチューニングを行う。また、Step 4~7においても、予測精度の評価の際の指標が必要となる。本稿では、分類問題で用いられるAUC (Area under the ROC curve) を評価指標として用いた。

AUCは、正解率をより一般化した指標であると言える。正解率とは、保有確率が閾値*C*以上の場合は保有、と仮定した際の予測結果が、真の保有状況と等しくなる割合である。世帯*i*の真の保有状況を表すダミー変数を $truth_i$ 、保有状況の予測結果を表すダミー変数を $predict_i$ とすると、 $P_i \geq C$ の場合 $predict_i = 1$ 、 $P_i < C$ の場合 $predict_i = 0$ であり、正解率は $ACC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (truth_i = predict_i)$ と表される。

正解率は、閾値*C*の値に依存する指標である。例えば、閾値*C*を0.5よりも0に近い値に設定すると、保有している世帯を正しく予測する割合 (TPR, True positive rate) は増加する一方で、保有していない世帯を誤って保有していると予測する割合 (FPR, False positive rate) も増加する。

そこで、より一般化された評価指標としてAUCが用いられる。AUCとは、ROC (Receiver Operator Characteristic) 曲線の下部面積として定義される。ROC曲線とは、閾値*C*を0から1に変化させた際にTPRとFPRの組み合わせとして描かれる曲線であり、縦軸にTPR、横軸にFPRを用いて表現される(図1)。ROC曲線は、閾値を変化させることによる予測精度への影響を視覚的に理解する際に用いられ、弧が図の左上に広がるほど予測精度が高いことを意味する。また、ROC曲線を指標化したものがAUCであり、値が1に近づくほど予測精度が高いことを意味する。

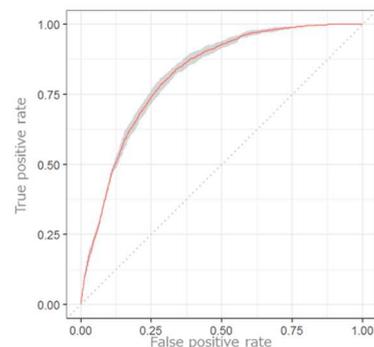


図1 ROC曲線の例

本稿では、交差検証 (Cross validation) 法を用いてAUCの比較検証を行った。交差検証法とは、データをランダムに*k*分割し、*k*-1のデータを学習データとして、残りを検証データとして用い、それを*k*回繰り返して予測精度の平均値を評価する方法である。本稿では、*k* = 5として交差検証法を実施した。

2.4 変数重要度

Step 5では、説明変数の重要度を評価する。回帰モデルを用いる場合、各説明変数の影響度合いは、各種係数の符号や統計的有意性に基づいて要因影響の有無を評価する。一方で、機械学習を用いる場合、回帰係数に該当する推定

表1 予測対象とする機器保有状況に関するダミー変数

種類	項目	データ有効件数	平均値
暖房機器	最頻使用暖房機器：エアコン（電気）	9,505	0.309
暖房機器	最頻使用暖房機器：電気カーペット・こたつ	9,505	0.163
暖房機器	最頻使用暖房機器：灯油ストーブ類	9,505	0.296
暖房機器	エアコン製造時期（1台目）：2000年以前	7,664	0.143
暖房機器	エアコン製造時期（1台目）：2005年以前	7,664	0.290
暖房機器	エアコン製造時期（1台目）：2010年以前	7,664	0.535
給湯機器	電気ヒートポンプ式給湯器（エコキュート、ネオキュート）	9,359	0.158
給湯機器	電気温水器	9,359	0.102
給湯機器	ガス給湯器・風呂がま（エコジョーズを含む）	9,359	0.593
給湯機器	灯油給湯器・風呂がま（エコフィールを含む）	9,359	0.149
冷蔵庫	冷蔵庫製造時期（1台目）：2000年以前	8,842	0.146
冷蔵庫	冷蔵庫製造時期（1台目）：2005年以前	8,842	0.306
冷蔵庫	冷蔵庫製造時期（1台目）：2010年以前	8,842	0.589
照明機器	居間で最も使用時間の長い照明：蛍光灯	9,505	0.503
照明機器	居間で最も使用時間の長い照明：LED	9,505	0.424

値がないため、分析過程がブラックボックスとなり、結果解釈ができない点が課題として指摘されてきた。

近年、データ大規模化・計算能力向上と機械学習の実用化に伴い、機械学習のブラックボックス化に対する問題意識の高まりとともに、結果の解釈手法について検討が進められている^{12,13)}。本稿では、説明変数の重要度を解釈するため、パーミュテーション検定による評価方法を用いた。これは、評価指標や予測手法に依らず、ある1つの変数を無効化した場合の評価指標の損失量を評価する方法であり、無効化は変数内の値をランダムに入れ替えることで行う。無効化したことにより予測精度が大幅に劣化した場合、その説明変数の重要度は高いと評価される。本稿では、予測精度の損失量を1-AUCと定義し、各説明変数について、パーミュテーション検定を10回繰り返して得られるAUC損失量の平均値を用いて、変数重要度を評価する。

3. データ

3.1 家庭CO₂統計の概要

本稿では、家庭CO₂統計の個票データを用いる¹⁴⁾。家庭CO₂統計とは、家庭部門の詳細なCO₂排出実態等を把握し、地球温暖化対策の企画・立案西する基礎資料を得ることを目的に実施されている調査である。毎月のエネルギー使用量調査（毎月実施）、夏季調査（平成29年度8月末時点）、冬季調査（平成30年2月末時点）で構成される。調査世帯数は13,000世帯であり、うち9505世帯が集計対象世帯となっている。

3.2 予測対象とする機器

本稿では、家庭における最終エネルギー需要の多い暖房機器・給湯機器・冷蔵庫・照明について、機器種類および

製造時期を予測対象とする。具体的には、表1に示す機器15種類を予測対象とする。なお、普及率の低い機器については、予測手法の応用機会が限定的であることや、予測精度の向上が困難であることが予想される。そのため、保有率10%未満の機器については、本稿の対象から除外した。

3.3 説明変数

1章で前述の通り、機器保有状況を分析・予測する場合、候補となる説明変数は大きく2種類に分類される。第1に、世帯属性や住宅属性が候補として挙げられる。本稿では、以下を説明変数として用いた。

- 世帯人数別のダミー変数5種類
- 世帯年収別のダミー変数7種類
- 世帯主年齢別のダミー変数9種類
- 世帯構成に関するダミー変数3種類（配偶者・子供・親の同居有無）
- 居住地域別のダミー変数10種類
- 都市階級別のダミー変数3種類
- 建物種別のダミー変数1種類
- 所有関係のダミー変数1種類
- 築年数別のダミー変数9種類
- 延床面積の連続変数
- 太陽光発電ダミー変数

第2に、エネルギー使用量情報が候補として挙げられる。本稿では、以下を説明変数として用いた。

- 年間での電気使用量
- 年間での都市ガス使用量
- 年間でのLPガス使用量
- 年間での灯油使用量
- 夏季7～9月の平均電気使用量
- 冬季12～3月の平均電気使用量

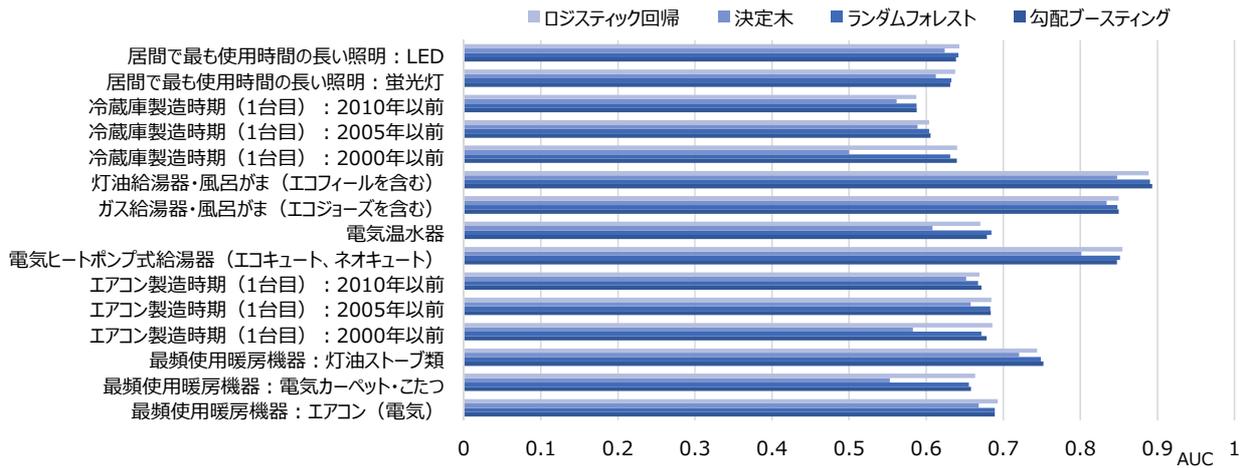


図2 機器保有状況の AUC（世帯属性・住宅属性を説明変数とした場合）

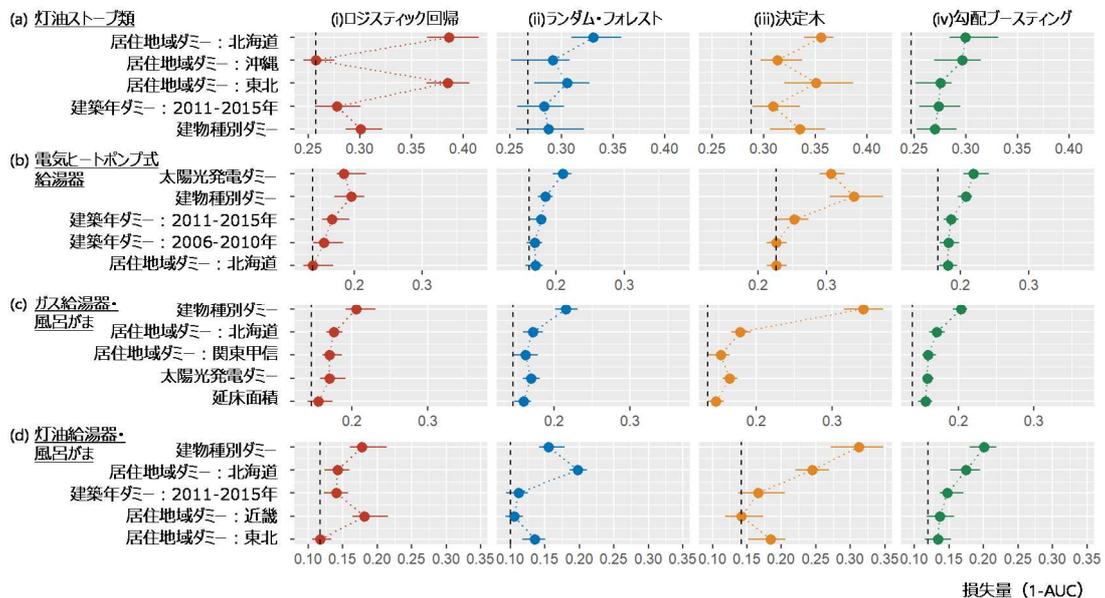


図3 予測対象別・予測手法別での変数重要度上位5種の評価結果（世帯属性・住宅属性を説明変数とした場合）

以上の説明変数候補について、記述統計量等の詳細は文献¹⁴⁾を参照されたい¹⁴⁾。

4. 予測精度の検証結果

4.1. 世帯属性・住宅属性による保有予測

図2に、機器別・予測手法別でのAUCを示す。AUCが0.7を超えている機器として、最頻使用暖房機器の「灯油ストーブ類」、給湯機器の「電気ヒートポンプ式給湯器（エコキュート、ネオキュート）」「ガス給湯器・風呂がま（エコジョーズを含む）」「灯油給湯器・風呂がま（エコフィールを含む）」の4種類が該当する。また、予測手法別に見ると、決定木の予測精度が比較的低い。また、ロジスティック回帰、ランダムフォレスト、XGBoostの結果で大きな差異は見られない。

次に、予測精度AUCが0.7以上の予測対象機器について、変数重要度の評価結果を図3に示す。これは、予測対象別に、XGBoostにおける損失量の大きい上位5種類の説明変数を抽出し、予測対象別・予測手法別に損失量を整理したものである。なお、図3で未表示の説明変数についても変数重要度を確認しており、予測手法に依らず、重要度が概ね低かったことを確認している。

各図内の左端の点線は、パーミュテーション検定前の予測精度を用いて算出したAUC損失量(1-AUC)である。また、各図内のバーは、変数重要度の評価の際にパーミュテーションを10回繰り返した際の最小値・最大値の幅であり、バー中央付近のプロットは平均値を示している。プロットが左端の点線から離れて右側に寄るほどAUC損失量が大きく、説明変数の重要度が高いことを意味する。

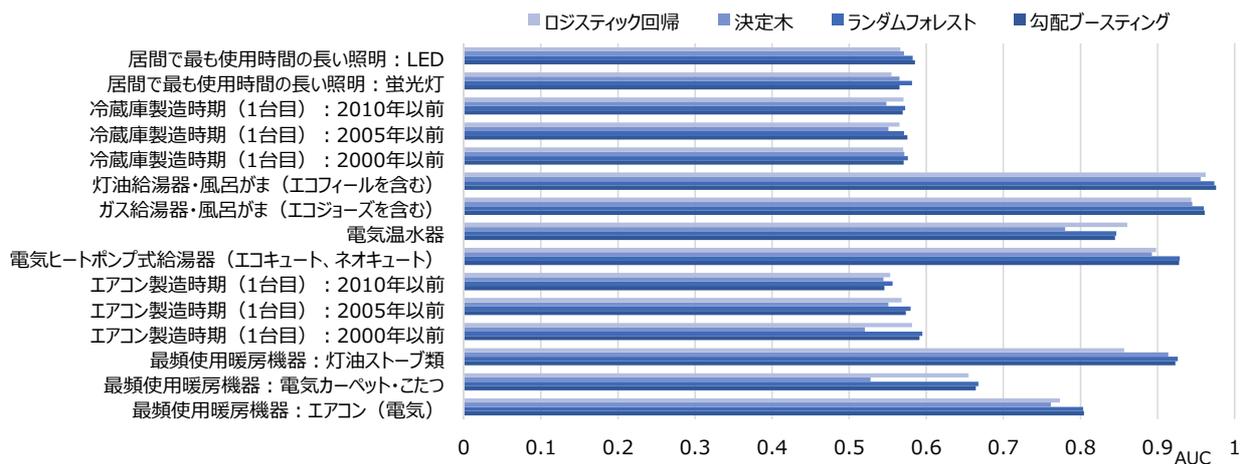


図4 機器保有状況のAUC（使用量情報を説明変数とした場合）

最頻使用暖房機器の「灯油ストーブ類」（図3-a）の結果を見ると、居住地域ダミー（北海道，沖縄，東北），建築年，建物種別の変数重要度が高めに出現している。これは，地域別に最頻利用暖房機器が異なる点等を反映しているものと考えられる。

給湯機器の「電気ヒートポンプ式給湯器」「ガス給湯器・風呂がま」「灯油給湯器・風呂がま」（図3-b,c,d）の結果を見ると，居住地域，建物種別，建築年，延床面積，太陽光発電設置の有無などの変数重要度が高めの傾向にある。

また，各説明変数のAUC損失量を予測手法別に比較すると，XGBoostやランダムフォレストと比べて，ロジスティック回帰や決定木においてAUC損失量が高い説明変数が散見される。XGBoostやランダムフォレストを用いた場合の予測精度が特定の説明変数に過度に依存しておらず，一部の説明変数が欠如しても予測精度の低下が少ない可能性を示唆している。

4.2. 使用量情報による保有予測

図4に，使用量情報を説明変数とした場合の，機器別・予測手法別でのAUCを示す。AUCの結果を見ると，最頻使用暖房機器と給湯機器で予測精度が高めの傾向が観察される。

また，予測手法別に結果を見ると，XGBoostやランダムフォレストの予測精度が他手法よりも安定して高い傾向が見られる。例えば，最頻使用暖房機器の「灯油ストーブ類」については，ロジスティック回帰ではAUCが0.86であったのに対して，ランダムフォレストでは0.93，XGBoostでは0.92と，0.06～0.07程度の改善が見られた。

なお，世帯属性・住宅属性を説明変数とした場合の結果（図2）と比較すると，暖房機器と給湯機器の予測精度が高めである。一方で，エアコン製造時期・冷蔵庫製造時期・

照明種類については，使用量情報よりも世帯属性・住宅属性に関する情報を説明変数として用いた場合のほうが高い予測精度が観察された。ただし，それでもAUCは0.7未満であり，一般に予測精度が高いとは言えない。

図5に，予測精度AUCが0.7以上の予測対象機器について，変数重要度の評価結果を示す。最頻使用暖房機器の「エアコン（電気）」「灯油ストーブ類」（図5-a,b）について，予測精度の高いランダムフォレスト，XGBoostの結果を見ると，灯油の年間使用量や電気の冬季使用量が，他の説明変数と比べて重要度が高めに評価されている。

また，給湯機器の「電気ヒートポンプ式給湯器」「電気温水器」（図5-c,d）を見ると，前者は，ガス併用状況に関する情報も重要度が高く評価される傾向にあるのに対して，後者は安定的に電気の年間使用量の重要度が高めに評価されている。これは，電気ヒートポンプ式給湯器が省エネ性能が高く，電気使用量情報のみでは保有状況の予測が難しいことが要因であると考えられる。その他，給湯機器の「ガス給湯器・風呂がま」「灯油給湯器・風呂がま」（図5-e,f）の結果を見ると，各機器のエネルギー源に関する使用量情報の重要度が高く評価される傾向が確認される。

5. 考察

本稿では，家庭CO₂統計を用いて，機器保有状況の予測手法の比較検証を行った。その結果，機械学習手法を用いることで，予測手法の精度向上や，説明変数の重要度を頑健に分析できる可能性があることが示唆された。

世帯属性・住宅属性に関する情報を説明変数として用いた場合，ロジスティック回帰や決定木と比べてXGBoostやランダムフォレストのほうが，変数重要度の高い説明変数に関するAUC損失量が少ない様子が観察された。これは，

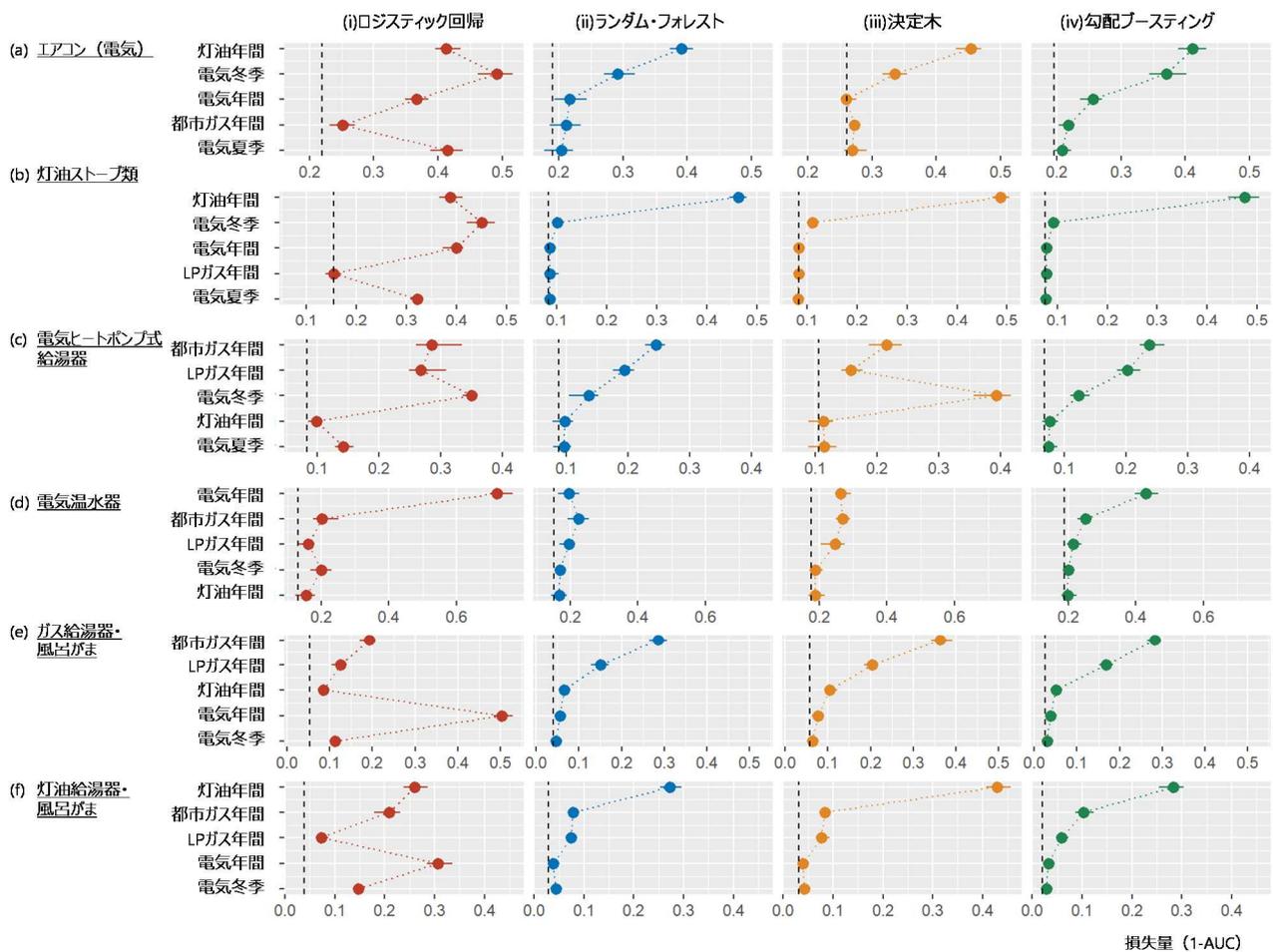


図5 予測対象別・予測手法別での変数重要度上位5種の評価結果（使用量情報を説明変数とした場合）

予測時に利用可能な属性情報が少ない場合にも、機械学習手法では予測精度の劣化が抑制できる可能性があることを示唆している。

また、使用量情報を説明変数として用いた場合、ランダムフォレストやXGBoostなどの機械学習手法で、高い予測精度が確認された。本稿では、家庭CO₂統計に含まれる電気・都市ガス・LPガス・灯油の年間使用量や、電気の夏季・冬季使用量を説明変数として用いた。しかし、スマートメーターデータや地域別の気温などの情報が利用可能な場合、それらと組み合わせることで、更なる精度向上も期待され、今後の課題である。

さらに、変数重要度を予測手法別に比較した結果、重要度が予測手法によって異なる様子が観察された。従来、ロジスティック回帰による要因分析が主流であったものの、複数の手法による分析結果を比較することで、より頑健な影響要因の分析ができる可能性がある。以上の分析結果は機械学習の有用性を示すものであり、エネルギー分野における活用拡大が望まれる。

参考文献

- 1) Michelsen, C.C., and Madlener, R., 2012, Homeowners' preference for adopting innovative residential heating system: A discrete choice analysis for Germany, *Energy Economics*, 34, 1271-1283.
- 2) Braun, F.G., 2010, Determinants of households' space heating type: A discrete choice analysis for German households, *Energy Policy*, 38, 5493-5503.
- 3) Lillemo, S.C., Alfnes, F., Halvorsen, B. and Wik, M., 2013, Households' heating investments: The effect of motives and attitudes on choice of equipment, *Biomass and Bioenergy*, 30, 1-9.
- 4) Ma, B., Yu, Y., and Urban, F., 2018, Green transition of energy systems in rural China: National survey evidence of households' discrete choices on water heaters, *Energy Policy*, 113, 559-570.
- 5) Jridi, O., Bargaoui, S. A., and Nouri, F. Z., 2015, Household preferences for energy saving measures: Approach of discrete choice models, *Energy and Buildings*, 103, 38-47.
- 6) Goto, H., Goto, M. and Sueyoshi, T., 2011, Consumer choice

- on ecologically efficient water heaters: Marketing Strategy and policy implication in Japan, *Energy Economics*, 33, 195-208.
- 7) Liao, X., Shen, S. V. and Shi, X., 2020, The effects of behavioral intention on the choice to purchase energy-saving appliances in China: the role of environmental attitude, concern, and perceived psychological benefits in shaping intention, *Energy Efficiency*, 13, 33-49.
 - 8) Rao, N.D. and Ummel, K. 2017, White goods for white people? Drivers of electric appliance growth in emerging economies, *Energy Research and Social Science* 27: 106-116.
 - 9) Kavousian, A., Rajagopal, R. and Fischer, M., 2015, Ranking appliance energy efficiency in households: Utilizing smart meter data and energy efficiency frontiers to estimate and identify the determinants of appliance energy efficiency in residential building, *Energy and Building* 99: 220-230.
 - 10) Weiss, M., Helfenstein, A., Mattern, F. and Staake, T., 2012, Leveraging smart meter data to recognize home appliances, 2012 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, Lugano (19-23 March 2012)
 - 11) Lang, M., Schratz, P., Binder, M., Pfisterer, F., Richter, J., Reich, N. G. and Bischl, B., “mlr3 book”, a version of May 19, 2020, <https://mlr3book.mlr-org.com/>
 - 12) Biecek, P. and Burzykowski, T. “Explanatory Model Analysis: Explore, Explain and Examine Predictive Models,” a version of March 8, 2020, <https://pbiecek.github.io/ema/>
 - 13) Molnar, C. “Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable”, a version of June 1, 2020. <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book/>
 - 14) 環境省（平成 31 年 3 月）平成 29 年度 家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査：調査の結果（確報値）の概要
(注)
 - i) 世帯属性・住宅属性以外では、世帯の環境意識^{1,3,7)}や経済性意識¹⁾などを含める場合がある。
 - ii) 世帯構成（配偶者・子供・親の同居有無）や夏季・冬季の電気使用量など、一部の説明変数は個票データから筆者らが加工・作成した。

家庭 CO2 統計に基づく需要能動化を考慮した住宅 PV システムの定量評価

Quantitative Evaluation of Residential PV system considering demand shift

大竹 宏明 *・新富 凌汰 *・井上 裕史 **
Hiroaki Otake Ryota Shintomi Yushi Inoue

In Japan, the installation of residential Photovoltaics (PV) systems have increased due to the Feed in tariff (FIT) scheme. PV power generations depending on the weather conditions are expected to be able to effectively utilize by demand shift of Heat pump water heater (HP) and Electric Vehicle (EV).

In this paper, we analyzed the effectiveness of demand shift of charging and discharging of EV and boiling of HP in residential PV system.

In the simulation, we constructed a simulation model assuming optimal economic operation, and analyzed quantitative effectiveness based on the statistical survey of carbon emission in the residential sector. The simulation shows that demand shift of HP and EV can reduce power costs and increase self-consumption rates by effectively utilizing surplus power generated from PV.

Keywords :CO₂ emissions, Residential sector, demand shift, demand response, Photovoltaics, Heat Pump, Electric Vehicle

1. はじめに

「地球温暖化対策計画」(平成 28 年 5 月 13 日閣議決定)において、温室効果ガス排出量を 2030 年度に 2013 年度比 26%削減する目標が掲げられており、家庭部門では約 4 割削減することが目安とされている。家庭部門における 2018 年度の CO₂ 排出量は 2013 年度比で 20.3%減少となり、削減は着実に進んでいるものの、目標達成に向けて一層の削減が必要な状況である。

家庭部門の CO₂ 削減には、FIT 制度導入によって普及が進んだ住宅用の太陽光発電(以下 PV)システムが効果的であると考えられるものの、PV は気象条件によって発電出力が大きく変動する再生可能エネルギーであり、電力システム全体における PV 比率を向上するためには需給バランスの安定化が必要である。再生可能エネルギーの出力変動に対応するための調整力確保の解決策の一つとして期待されているのが、需給一体型の再エネ活用モデルであり、促進するための政策が検討されているところである²⁾。

需給一体型モデルでは、エコキュート(ヒートポンプ給湯機、以下 HP)や電気自動車(以下 EV)による需要能動化機能によって昼間の PV 余剰電力を有効活用することで、自家消費率の向上が可能である。また、住宅 PV システムの課題として、FIT 制度の買取期間を満了した、いわゆる卒 FIT 電源がある。FIT 制度後の買取単価は FIT 制度中に比べて大幅に落ち込むため、安い価格で売電するよりも、発電した電気を自家消費の方が経済的であると考えられ

る。以上の通り、住宅 PV システムにおいては、需要能動化による自家消費率の向上や、それによる経済効果が期待される。他方、PV、HP、EV の保有有無が同一の場合においても、各機器の設備容量や地域、電力消費量、各機器の運用制御方式などの組み合わせによって設備導入効果は変わるため、定量評価は条件の設定に依るところが大きい。

本研究では、PV を有する世帯に焦点を当て、需要能動化機器(HP または EV)を最適運用した場合を想定し、より実態に即した条件に基づくシミュレーションを行うことで、需要能動化による PV 余剰電力の自家消費率向上効果とランニングコスト削減効果について、定量的に評価を行った。

2. 既往調査・研究

家庭部門の CO₂ 排出量やエネルギー消費量の実態を把握するための統計調査として、環境省では、平成 29 年度より「家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査」³⁾(以下、家庭 CO₂ 統計)を実施している。家庭 CO₂ 統計では CO₂ 排出量の増減に影響する要因について網羅的な調査を行っており、電力消費量、PV 発電量、自動車や給湯によるエネルギー消費量などが調査されている。住宅 PV システムの HP や EV 適用による評価は既に多くの調査研究が行われている⁴⁾⁵⁾⁶⁾ものの、PV 容量など特定の条件を設定したうえでの評価が行われている。実在する複数の住宅 PV システムの条件を反映した研究⁷⁾では、電力需要と HP の実測データを用いて、ガス給湯器と比較して HP および PV システムの導入効果を評価しているが、本研究では家庭 CO₂ 統計の個票データを用いることで、より地域偏在性のない母集団を対象

*株式会社三菱総合研究所 環境・エネルギー事業本部 研究員

**株式会社三菱総合研究所 環境・エネルギー事業本部 主席研究員
〒100-8141 東京都千代田区永田町二丁目 10 番 3 号

とした、住宅 PV システムを有する世帯の具体的な条件を反映した評価を行う。

3. 分析条件

本研究では、PV システムと HP または EV を有する世帯を分析対象とする。システム構成は、HP および EV の保有状況に応じて、以下 4 パターンを設定し、HP または EV を有し需要能動化が可能であるシステム 2 からシステム 4 について評価を行う。ここで、HP や EV の最適運用制御を行うのは、家庭用エネルギー管理システム（以下 HEMS）の導入が必要と考えられるものの、本研究では HEMS が導入されていなくても対象に含めた。また、HP 保有については給湯機器として HP のみ保有の世帯を対象とした。

- ・ システム 1 : PV 保有、HP 未保有、EV 未保有
- ・ システム 2 : PV 保有、HP 保有、EV 未保有
- ・ システム 3 : PV 保有、HP 未保有、EV 保有
- ・ システム 4 : PV 保有、HP 保有、EV 保有

分析対象となる各システムの世帯数を表 1 に示す。本研究では月別の電力消費量、PV 発電量、自動車や給湯によるエネルギー消費量の回答を用いるため、それらのデータとして適切な回答が得られた個票（表中、データ有に該当）を対象に、分析を行う。

システム	全データ					データ有			
	1	2	3	4	全個票	1	2	3	4
PV	○	○	○	○	-	○	○	○	○
HP	×	○	×	○	-	×	○	×	○
EV	×	×	○	○	-	×	×	○	○
世帯数	285	463	10	13	9505	235	349	7	12
うち HEMS あり	25	69	2	2	177	21	56	2	2
世帯数分布 (10 万分比)	2,869	4,376	115	139	100,000	2,452	3,277	80	119
うち HEMS あり	343	637	24	17	2,002	314	508	24	17

表 2 前提条件

項目	評価に用いた想定
PV 発電	時間別発電プロファイルは、電力 10 社が公表する電力需給実績から得られる時間別 PV 発電実績と、固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト公開される、10 エリアの PV 容量から設定。 上記を平成 29 年度家庭 CO2 統計の個票データに記載される月別 PV 発電量となるように月別に定数倍することで作成。
電力需要	時間別需要プロファイルは、文献 8)より設定。 上記を平成 29 年度家庭 CO2 統計の個票データに記載される月別電力消費量となるように月別に定数倍することで作成。
HP 需要	時間別需要プロファイルは、「第 2 回低炭素電力供給システムに関する研究会 新エネルギー大量導入に伴う系統安定化対策・コスト負担検討小委員会資料」（2008 年 10 月）より設定。 上記を平成 29 年度家庭 CO2 統計の個票データに記載される給湯機器によるエネルギー消費量と一致するように定数倍することで作成。
EV 需要	時間別需要プロファイルは、岩船他「2050 年の電気自動車走行需要に関する検討」、第 37 回エネルギー・資源学会研究発表会（2018）より OD 調査の走行データを平日・休日ごとに 5 つのクラスターに類型化した走行パターンを元に設定。 上記を平成 29 年度家庭 CO2 統計の個票データから推計した EV によるエネルギー消費量と、と一致するように定数倍することで作成。 EV のエネルギー消費量は、個票データに記載された自動車によるエネルギー消費量を、車種ごとの年間走行距離と、日本自動車研究所「総合効率と GHG 排出の分析」（2011 年 3 月）より得られる車種ごとの効率（JC08 モード）より推計。
売電価格	卒 FIT を想定し、卒 FIT 住宅用太陽光の買取を表明している事業者の例を参考に 10 円/kWh で設定。
買電価格	システム 1（HP および EV を有しない世帯）：総務省統計局「家計調査報告」より 24.4 円/kWh と想定。 システム 2-4（HP および EV を有する世帯）：2 段階料金プランを想定し、文献 8)より日中 31.41 円/kWh、夜間 13.13 円/kWh と設定。ここで、日中料金は 8-23 時、夜間料金は 23-8 時に適用されるものと仮定。

分析で用いる前提条件は、平成 29 年度家庭 CO2 統計の個票データや文献 8)などを参考に、表 2 の通り設定した。

4. 分析方法

本研究で想定する住宅 PV システム構成を図 1 に、図中で使用した変数およびパラメータの説明を表 3 に示す。系統受電と PV 発電電力を、HP の貯湯タイミングや EV による充放電を経済最適運用しながら EV 走行需要と電力需要で消費する、PV システムの経済性評価モデルを使用する。

評価モデルでは、PV システムを有する住宅における電力コストを、数理計画問題上の混合整数線形計画問題として定式化している。

本モデルの目的関数は式(1)の通り、1 日単位での電力コスト最小とした。

$$\min \sum^T \{c_t^{gri} x_t^{gri} + c^{gro} x_t^{gro}\} \quad (1)$$

c_t^{gri} : 時刻 t の系統電力買電単価[円/kWh]

c^{gro} : PV 発電による余剰電力の売電単価[円/kWh]

制約条件は式(2)-(11)に示す通り、1 時間毎の需給バランスの確保、EV・HP の需要シフト前後のバランスの確保、各機器の出力制約とした。ここで、式(2)-(10)については、図 1 中の該当箇所に式番号を記載した。

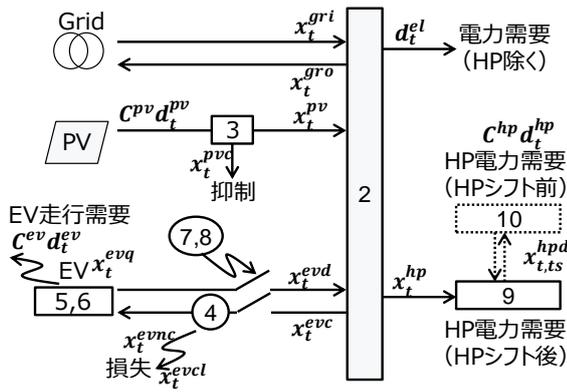


図 1 住宅 PV システム構成

$$d_t^{el} + x_t^{hp} = x_t^{gri} - x_t^{gro} + x_t^{pv} + x_t^{evd} - x_t^{evc} \quad (2)$$

$$C^{pv} d_t^{pv} = x_t^{pv} + x_t^{pvc} \quad (3)$$

C^{pv} : PV 容量[kW]、月別に個票データより補正

$$x_t^{evc} = x_t^{evnc} + x_t^{evcl} \quad (4)$$

$$x_t^{evnc} = \eta^{evc} x_t^{evc} \quad (5)$$

η^{evc} : EV のサイクル効率、0.9 と想定

$$x_t^{evq} = x_{t-1}^{evq} + x_t^{evnc} - x_t^{evd} - C^{ev} d_t^{ev} \quad (6)$$

C^{ev} : EV 走行需要係数、月別に個票データより補正

$$\{x_t^{evd} = 0, x_t^{evq} = 0 \mid t \in t_{ev}\} \quad (7)$$

t_{ev} : EV 充電可能時刻

$$\{t_{ev} \mid d_t^{ev} > 0\} \quad (8)$$

$$x_t^{hp} = \sum_{t,ts} x_{t,ts}^{hpd} \quad (9)$$

$$C^{hp} d_{ts}^{hp} = \sum^t x_{t,ts}^{hpd} \quad (10)$$

C^{hp} : HP 需要係数、月別に個票データより補正

$$\text{各機器の上下制限制約} \quad (11)$$

分析では、需要能動化が可能であるシステム 2 からシステム 4 について、PV が無い場合と比較した PV 導入によるランニングコストに関する経済性と、EV や HP の導入有無が及ぼす自家消費率の影響について評価した。

表 3 変数・パラメータの説明

変数	
x_t^{gri}	時刻 t の 系統電力から調達した受電電力[kW]
x_t^{gro}	時刻 t の 系統電力へ送電した売電電力[kW]
x_t^{pv}	時刻 t の PV 発電のうち抑制後の発電電力[kW]
x_t^{pvc}	時刻 t の PV 発電のうち抑制した発電電力[kW]
x_t^{evd}	時刻 t の EV の放電電力[kW]
x_t^{evc}	時刻 t の EV の蓄電電力[kW]
x_t^{evnc}	時刻 t の EV の正味の蓄電電力[kW]
x_t^{evcl}	時刻 t の EV の蓄電ロス電力[kW]
x_t^{evq}	時刻 t の EV の蓄電電力量(SOC)[kWh]
$x_{t,ts}^{hpd}$	時刻 t の 時刻 ts からシフトした HP 需要[kW]
x_t^{hp}	時刻 t の シフト後の HP 需要[kW]
x_t^{cost}	時刻 t の コスト[円]
パラメータ	
d_t^{pv}	時刻 t の PV 容量あたりの PV 発電電力[kW/kW]
d_t^{ev}	時刻 t の EV の電力消費[kW]
d_t^{el}	時刻 t の HP を除いた電力需要[kW]
d_t^{hp}	時刻 t の HP の電力需要[kW]

5. 分析結果

各シナリオの自家消費率と PV 導入によるランニングコスト削減の分析結果を表 4 に示す。まず、需要能動化機器による自家消費率の向上効果は、HP は 32%、EV は 39%、HP+EV は 58%であった。続いて、需要能動化機器を有する世帯における PV 導入によるランニングコスト削減効果は、PV のみは 8.6 万円/年、PV+HP は 10.2 万円/年、PV+EV は 10.1 万円/年、PV+HP+EV は 10.2 万円/年であった。以上の通り、HP および EV の導入による自家消費率の向上と PV 導入によるランニングコスト削減効果が確認することができた。

以上の分析結果は各世帯の結果の平均値によるものである。以降では、各システムにおける世帯毎の結果について確認する。

5.1 システム 2 : PV+HP 保有

PV と HP を保有する世帯の経済性と自家消費率の分析結果を図 2 に示す。PV と HP を保有するシステム 2 は、平均値で見て年間電力需要量は 8.1MWh、年間 PV 発電量は 5.2MWh、電力需要から PV 発電を除いた正味の需要量は

表 4 分析結果

	PV	PV+HP	PV+EV	PV+HP+EV
自家消費率[%]				
システム 2	システム全体	36%	67%	
(n=349)	HP による自家消費率向上	基準	32%	
システム 3	システム全体	22%	54%	
(n=7)	EV による自家消費率向上	基準	32%	
システム 4	システム全体	37%	77%	96%
(n=12)	EV,HP による自家消費率向上	基準	39%	58%
加重平均	EV,HP による自家消費率向上	基準	32%	39%
PV 導入によるランニングコスト削減[万円/年]				
システム 2		8.7	10.3	
システム 3	PV 有のランニングコストと	8.0	10.0	
システム 4	PV 無のランニングコストの	7.4	9.2	10.1
	差分			10.2
加重平均		8.6	10.2	10.2

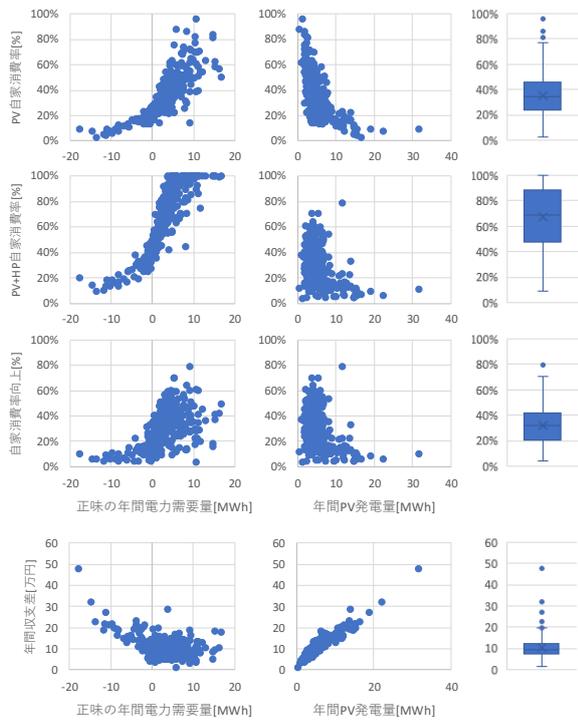


図 2 システム 2 : PV+HP 保有の分析結果

2.9MWh、年間 HP 電力消費量は 2.2MWh であった。

自家消費率は PV 発電に対して電力需要が大きいかほど増加するため、正味の電力需要量と自家消費率は正の相関がある。また、PV 導入による年間収支増は、PV 容量が大きいかほど収支増となるため、PV 発電量と年間収支は正の相関がある。

5.2 システム 3 : PV+EV 保有

PV と EV を保有する世帯の経済性と自家消費率の分析

結果を図 3 に示す。PV と EV を保有するシステム 3 は、平均値で見ると年間電力需要量は 6.4MWh、年間 PV 発電量は 4.9MWh、電力需要から PV 発電を除いた正味の需要量は 1.4MWh、年間 EV 電力消費量は 2.6MWh であった。

世帯毎の結果を確認すると、向上率が 10 ポイント未満と EV による自家消費率向上効果が低い家庭が半分弱程度を占めている。

5.3 システム 4 : PV+HP+EV 保有

PV,HP,EV を保有する世帯の経済性と自家消費率の分析結果を図 4 に示す。PV,HP,EV を保有するシステム 4 は、平均値で見ると年間電力需要量は 9.5MWh、年間 PV 発電量は 4.9MWh、電力需要から PV 発電を除いた正味の需要量は 4.7MWh、年間 HP 電力消費量は 2.4MWh、年間 EV 電力消費量は 1.6MWh であった。

システム 3 と同様、EV による自家消費率向上効果を個別に確認すると、向上率が 10 ポイント未満と低い家庭が半分程度を占めている。

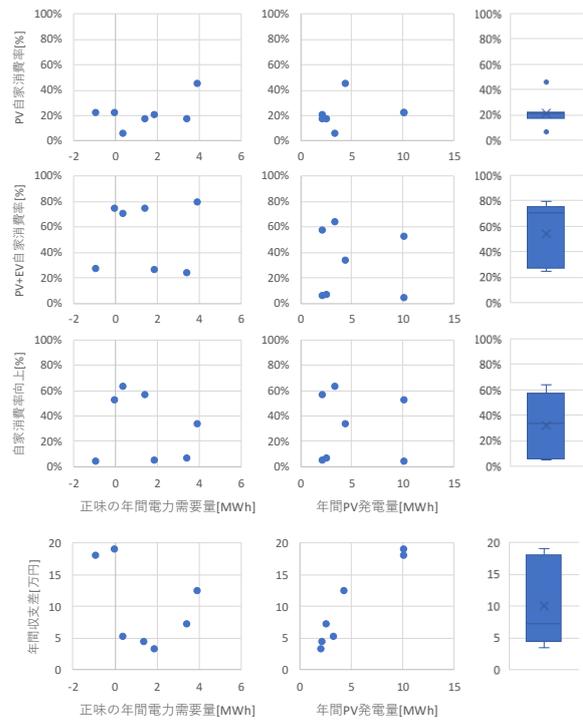


図 3 システム 3 : PV+EV 保有の分析結果

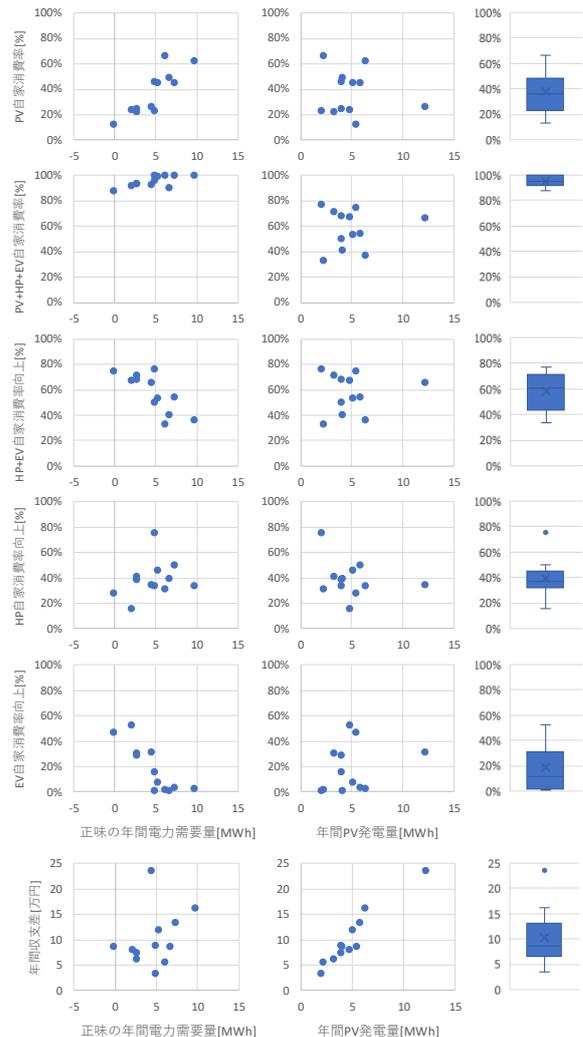


図 4 システム 4 : PV+HP+EV 保有の分析結果

6. 考察

本節では、図 5 に示す、システム 4 の電力需給結果例を参考に、HP と EV の運用について考察を行う。

本シミュレーションでは需要能動化機器を経済最適運用する想定であるため、HP であれば夜間蓄熱運用ではなく PV 余剰電力活用を想定した運用結果であることが図 5 より読み取れる。現在、HP は夜間蓄熱での運用が大半を占めているものの、今後 PV が拡大していき卒 FIT の世帯が増えた場合は、昼間主体運転の運用が自家消費率の観点でもランニングコストの観点でも有益と考えられる。

EV については日中に PV 余剰電力を活用できる環境を構築することが重要と考えられる。今回想定した EV 走行需要は図 5 の赤矢印に示す通り、日中においても充放電可能と想定し、V2H や V2G を加味した運用が最適と求められた。平日の朝と夜のみ走行需要がある状況として通勤用途が考えられるが、日中は自宅ではなく勤務地などで電力系統とつなぐことで、電力システム全体で見たときの余剰電力活用に資すると考えられる。

7. おわりに

本研究では家庭 CO₂ 統計の個票データを用いて、PV を有する世帯における HP や EV による需要能動化による効果の定量評価を行った。その結果、HP の昼間余剰電力活用および EV の日中の余剰電力充電により、自家消費率の向上やランニングコスト削減が確認された。

本評価の課題としては、PV 発電、電力需要、EV 走行需要などの予測誤差の考慮が挙げられる。本評価ではこれらの予測誤差をゼロとみなして最適化しているため、実運用においては予測誤差などにより自家消費率は低下すると考えられる。また、平成 29 年度家庭 CO₂ 統計において EV を有する世帯は全体の 1%未満と少ないため、今後 EV が普及した際には、実態を踏まえた評価が必要と考えられる。

謝辞：この成果は、環境省の調査事業による成果の一部である。また、本研究はエネルギー・資源学会主催の「家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査利用研究会」における取組の一環として行ったものであり分析に使用した「家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査」の統計データも同研究会を通じて提供頂いたものである。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 温室効果ガスインベントリオフィス, 日本の温室効果ガス排出量データ 2020 年公開版(確報値: 1990~2018 年度), <http://www-gio.nics.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>, 2020 年 6 月 20 日アクセス。

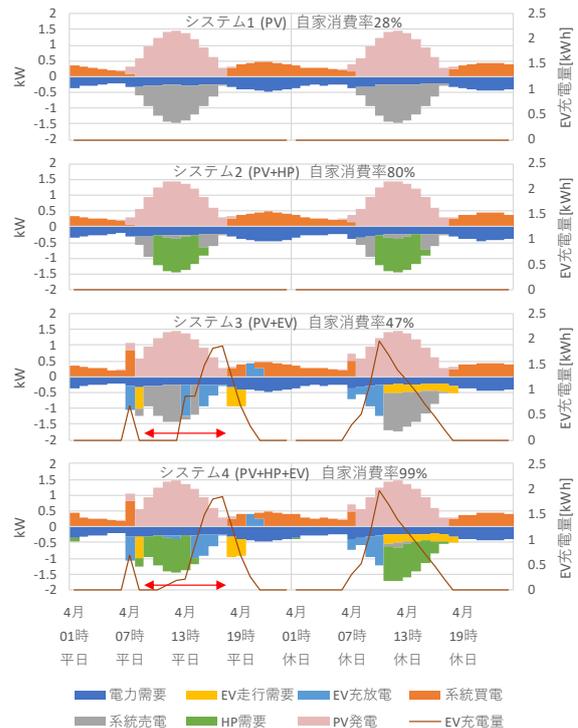


図 5 需給結果の例

- 2) 経済産業省, 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 - 中間整理 (第 3 次), https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/20190820001_01.pdf, 2020 年 6 月 20 日アクセス。
- 3) 環境省, 家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査 (家庭 CO₂ 統計), <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html>, 2020 年 6 月 20 日アクセス。
- 4) 八太啓行, 給湯機の運用制御による太陽光発電余剰電力の有効活用効果, 電気学会, 電力・エネルギー部門電力系統技術研究会(2011)
- 5) アシコムスタッフ, 岩船由美子, EV バッテリーの利用による PV 余剰電力の削減効果の評価, エネルギー・資源学会, 第 29 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2013)
- 6) 中村翔悟, 長坂研, 再生可能エネルギーを用いた家庭での電力使用へのデマンドレスポンスの適用, エネルギー・資源学会, 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2018)
- 7) 佐々木 聡, 酢山明弘, 荻本和彦, 馬場博幸, 太陽光発電の導入拡大後における家庭向けヒートポンプ給湯器の経済性評価, 電気学会, 平成 28 年電力・エネルギー部門大会(2016)
- 8) 環境省, 平成 29 年度パリ協定等を受けた中長期的な温室効果ガス排出削減達成に向けた再生可能エネルギー導入拡大策検討調査委託業務報告書(2018)

家庭 CO2 統計を用いた住設機器・自家用車の電化ポテンシャルおよび CO2 排出削減効果の推計

Estimation of the electrification potential of home appliances and private vehicles and its impact on CO2 emissions by using the Survey on the Actual Conditions of Carbon Dioxide Emissions from Residential Sector

岩 船 由 美 子 * ・ 河 合 俊 明 ・ 森 裕 子
Yumiko Iwafune Toshiaki Kawai Yuko Mori

Electrification of final energy uses has potential to reduce energy consumptions and CO2 emissions. Electrification of thermal demand for water-heating and space-heating use by heat-pump technologies and deployment of electric vehicles could contribute to improvement of demand-side energy efficiency and mitigation of imbalances between supply and demand in electric power system, which would be led by the large-scale introduction of volatile and intermittent renewable energy sources, such as photovoltaic and wind power, by generating new electricity demand and creating various demand shift factors. In this paper we estimate the electrification potential of home appliances such as cooking heater, water heater, space heater and private vehicle and its impact on CO2 emissions by using official statistics, “the Survey on the Actual Conditions of Carbon Dioxide Emissions from Residential Sector”.

When the electrification impact on CO2 emission was analyzed by considering an ideal situation where all appliances are substituted, and the CO2 emission was determined on the basis of the carbon intensity of electricity in 2030, our results scaled up to the total population show that home electrification of cooking heater, water heater and space heater can potentially reduce approximately 4.4% of CO2 emission and private vehicles electrification can potentially reduce approximately 71.6% of CO2 emission.

Keywords :residential CO2 emission survey, electrification,

1. はじめに

最終消費部門における電化率の向上は、需要端の機器の高効率化、電源の再エネ主力化、DR 資源の創出の 3 つの観点から、省エネと CO2 排出量削減に貢献することが期待できる。家庭部門においては、直接燃焼技術をヒートポンプ技術で代替することで、給湯、暖房機器の高効率化が、運輸部門においては電気自動車やハイブリッド車の導入により燃費の向上が可能であり、また、電化による電力需要の増大は、太陽光発電や風力発電の大量導入時の受け皿となるとともに、ヒートポンプ給湯機や電気自動車が、蓄エネルギー設備として、再生可能エネルギーの出力変動を吸収する役割をになうことが可能である¹⁾²⁾³⁾。本研究では、平成 29 年度に実施された環境省「家庭部門の CO2 排出実態統計調査」を用いて、家庭における住設機器（厨房、給湯、暖房用機器）および自家用車の電化の可能性と電化が CO2 排出量に及ぼす影響を推計した。

2. 推計方法

環境省「家庭部門の CO2 排出実態統計調査」（以下 CO2 統計）は、家庭部門の詳細な CO2 排出実態等を把握するこ

とを目的に、平成 29 年度より年 1 回実施されている一般統計調査である。本研究において使用した平成 29 年度調査は、調査期間が平成 29 年 4 月～平成 30 年 3 月、調査世帯数は、全国 13,000 世帯（母集団 5 千万世帯）であり、この内 9,505 世帯が有効サンプルである。

CO2 統計においては、ガソリン、軽油を含む世帯別の種別エネルギー消費量とともに、世帯属性、住宅属性、機器の使用状況、車両の使用状況等、エネルギー消費量に関連する情報が網羅的に調査されている。本研究では、これらエネルギー消費量と世帯情報が結びついた個票データを使用することで、使用している住設機器または乗用車とエネルギー消費量の関係を分析し、電化の可能性と電化が CO2 排出量に及ぼす影響を推計した。

推計シナリオは、「現状」、「電化 1」、「電化 2」の 3 つとする。「現状」は CO2 統計の実施年である 2017 年時点、「電化 1」は「現状」から電化の蓋然性が高い世帯が電化した場合、「電化 2」は、「現状」から電化が可能な世帯が全て電化した場合である。電化の蓋然性が高い世帯は、ロジスティック回帰により電化と世帯属性の関係を明らかにし、抽出した。

各エネルギーの熱量換算係数および CO2 排出係数は、表 1 の通りとする。都市ガスの熱量、電気の CO2 排出係数は、本来は供給会社ごとに異なるが、全国一律とした。また、

* 東京大学 生産技術研究所 エネルギーシステムインテグレーション社会連携部門
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 As 棟 213
E-mail : iwafune@iis.u-tokyo.ac.jp

電気のCO2排出係数については、家庭用太陽光発電による発電を考慮していない。電力のCO2排出量は2017年、2030年、2050年の3パターンの排出係数で推計した。

推計の結果は、全てウェイト調整した全国5千万世帯当たりの数値である。

表1 熱量換算係数・CO2排出係数⁴⁾

エネルギー	熱量換算係数	CO2排出係数
電気	3.6 MJ/kWh	2017年 0.496 kg-CO2/kWh 2030年 0.37 kg-CO2/kWh ⁵⁾ 2050年 0 kg-CO2/kWh
都市ガス	45 MJ/m ³	14.04t-C/TJ
LPガス	50.06 MJ/kg	16.38t-C/TJ
灯油	36.49 MJ/L	18.71t-C/TJ
ガソリン	33.37 MJ/L	18.72t-C/TJ
軽油	38.04 MJ/L	18.79t-C/TJ

3. 住設機器の電化ポテンシャル

3.1 住設機器の分類

CO2統計のコンロ、給湯器、暖房に関する設問の回答から、表2の設備区分にのっとり各世帯を使用している住設機器ごとに分類した。給湯は主たる給湯器、暖房は最もよく使用する暖房機器を基準に分類した。以降、文中においては、設備区分の名称は、「IH」、「HP」等、括弧つきで表記し、IHクッキングヒータ、電気HP給湯機等の機器名と区別する。本稿において住設機器の電化とは、設備区分の熱源が電気になることとする。上記のように給湯と暖房は主な使用機器であるため電化世帯においてもガスまたは灯油機器を併用している場合があること、「その他」には、電気HP給湯機と電気温水器の併用等、電気機器のみを使用している世帯も含まれているが、熱源の種類としては、電気とみなしていないことに留意する必要がある。

表2 設備区分

用途	設備区分	熱源	主たる使用機器
厨房	IH	電気	IHクッキングヒータ
	ガス	ガス	ガスコンロ
	その他	その他	電熱式コンロ、IH・ガス併用、不使用、不明等
給湯	HP	電気	電気HP給湯機
	電温	電気	電気温水器
	ガス	ガス	ガス給湯器
	灯油	灯油	灯油給湯器
	その他	その他	エネファーム、エコウィル、小型ガス瞬間湯沸かし器、不使用、不明等
暖房	AC	電気	電気エアコン
	電熱	電気	電気ストーブ、ホットカーペット・こたつ
	他電気	電気	電気全館空調、蓄熱暖房、電気床暖房等
	ガス灯油	ガス・灯油	ガスまたは灯油を熱源とする暖房全て
	その他	その他	太陽熱暖房、まきストーブ、不使用、不明等

3.2 住設機器の使用状況

2017年における電化状況を把握するため、設備区分別の世帯割合を集計した。住設機器の電化割合は、厨房21.6%、給湯20.1%であるのに対して、暖房61.9%であり、暖房に対して、厨房、給湯の電化余地が大きい。住宅の建て方別では、集合は、暖房の電化率が70.9%であり、戸建の54.5%を上回っているが、集合住宅は、賃貸契約が多いことや設置スペースの確保が難しいといった理由により、「IH」、「HP」の割合は少ない。温暖地・寒冷地別（寒冷地は、居住地为北海道・東北・北陸、温暖地は、寒冷地以外とする）では、温暖地の構成比は、全体の構成比とほぼ同じであるが、寒冷地は、全体に比べて厨房の「IH」、給湯の「灯油」、暖房の「ガス灯油」が多い。寒冷地では、ヒートポンプの効率が低下するため、給湯、暖房の電化は難しいが、戸建住宅が多く、都市ガスの供給地域が少ないことから厨房の電化割合が多くなっていると考えられる（表3～表5）。

尚、日本冷凍空調工業会によれば電気HP給湯機の販売累計台数が600万台を超えたのは2018年度であるが⁶⁾、CO2統計のHP世帯は646万世帯であり、実情よりもHP給湯機を使用している世帯割合が大きい。

表3 厨房設備区分別世帯割合

設備区分	世帯数（万世帯）					世帯割合（%）				
	全体	建て方別		居住地別		全体	建て方別		居住地別	
		戸建	集合	温暖	寒冷		戸建	集合	温暖	寒冷
IH	1079	877	202	862	217	21.6	31.8	9.0	20.2	29.4
ガス	3703	1798	1905	3212	491	74.1	65.1	85.1	75.4	66.5
その他	218	86	132	188	30	4.4	3.1	5.9	4.4	4.1

表4 給湯設備区分別世帯割合

設備区分	世帯数（万世帯）					世帯割合（%）				
	全体	建て方別		居住地別		全体	建て方別		居住地別	
		戸建	集合	温暖	寒冷		戸建	集合	温暖	寒冷
HP	646	597	49	555	91	12.9	21.6	2.2	13.0	12.3
電温	357	244	114	277	81	7.1	8.8	5.1	6.5	10.9
ガス	3304	1382	1922	2999	304	66.1	50.1	85.8	70.4	41.3
灯油	429	402	27	203	226	8.6	14.5	1.2	4.8	30.7
その他	264	137	127	228	36	5.3	5.0	5.7	5.4	4.9

表5 暖房設備区分別世帯割合

設備区分	世帯数（万世帯）					世帯割合（%）				
	全体	建て方別		居住地別		全体	建て方別		居住地別	
		戸建	集合	温暖	寒冷		戸建	集合	温暖	寒冷
AC	1671	829	841	1572	99	33.4	30.0	37.6	36.9	13.4
電熱	1309	575	734	1218	91	26.2	20.8	32.8	28.6	12.3
他電気	115	102	13	62	53	2.3	3.7	0.6	1.5	7.1
ガス灯油	1807	1210	598	1328	479	36.1	43.8	26.7	31.2	64.9
その他	98	45	54	82	16	2.0	1.6	2.4	1.9	2.2

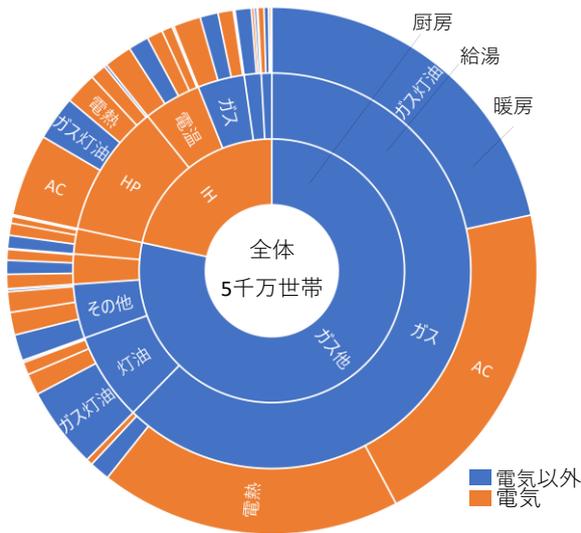


図1 設備区分別世帯割合

3.3 住設機器の電化蓋然性

「電化1」の電化の蓋然性が高い世帯を抽出するため、電化世帯であるか否かを目的変数、世帯属性を説明変数としてロジスティック回帰モデルを構築し、電化世帯とその世帯属性の関係を明らかにした。「IH」、「HP」、「電温」、「AC」、「電熱」について、該当の設備区分である場合を1の正例、そうでない場合を0の負例とする。モデルの構築は、統計ソフトRのglmパッケージを使用した。「電温」の割合は、7.15%と正例の割合が極端に低い不均衡データであるため、重みづけオプションに正例と負例の逆比を指定し正例の検出感度を向上させた。条件を揃えるため、全てのモデルについて重みづけを行った。

集合住宅や賃貸住宅においては、既設の設備を使用する以外の選択肢がなく、非電化である理由が、電化機器を所有していない、あるいは電化機器の導入が著しく困難であるという場合がある。このような自明な理由がモデルにおいて支配的な要因になることを防ぐため、「IH」については、戸建住宅世帯のみ、「HP」、「電温」については、戸建持ち家住宅世帯のみ、「AC」については、冷暖房を問わずエアコンを使用している世帯のみを分析の対象とした。

説明変数については、明らかに関係のない説明変数や、「IH」や「HP」とオール電化住宅など極めて親和性が高い説明変数を予め除外した。また、VIFが10以上とならないように変数の調整も行った。更に関連性の薄い説明変数を除外するため、全ての説明変数を用いて回帰モデルを構築し5%水準で有意な説明変数のみを抽出したのち、それら抽出した変数のみを用いて最終的なモデルを構築した。また、連続変数の説明変数については、標準化したzスコアを使用した。

以上のロジスティック回帰の結果より、住設機器を電化

する可能性が高い世帯の条件を作成した。例として、「IH」のモデルについて述べる。「IH」の最終モデルにおいて5%水準で有意な説明変数のオッズ比を比較すると、地域区分、持ち家、太陽光発電システム使用、世帯年収、都市階級といった説明変数の影響力が強い。地域区分と都市階級については、都市ガスの供給地域が多い大都市圏で「IH」世帯の可能性が低い。持ち家で、世帯年収が1500万円以上と裕福な世帯は「IH」世帯の可能性が高い。この他、調理食数が多い、世帯主年齢が若いといった傾向が「IH」世帯にみられる(図2)。これらの「IH」世帯の傾向より、「IH」になる蓋然性の高い世帯の選定条件を表6とした。選定条件において使用した閾値は、「IH」世帯の平均値である。世帯年収や世帯主年齢のようにカテゴリ値の平均を集計する際には、カテゴリ値の代表値を集計した。「HP」、「電温」、「AC」、「電熱」についても同様の作業により、選定条件を作成した。

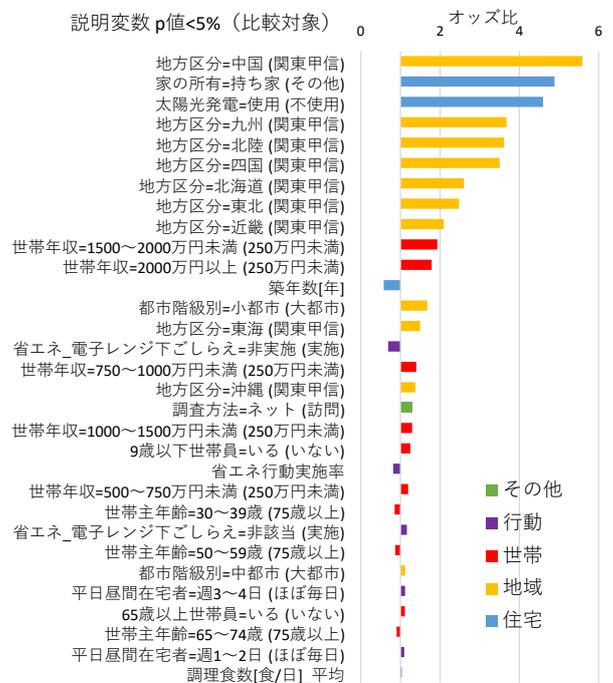


図2 「IH」回帰モデルのオッズ比 (5,474 サンプル)

表6 「IH」に変化する可能性が高い世帯選定条件

説明変数	条件
コンロ	「ガスコンロ」
居住地域	「北海道」、「東北」、「北陸」、「中国」、「四国」、「九州」
都市階級	「中都市」、「小都市」
家の所有関係	「持ち家」
住宅の建て方	「戸建」
世帯年収	「500~750万円未満」以上
調理食数平均	6食以上
世帯主年齢	「50~59歳」以下

3.4 住設機器の電化ポテンシャル世帯

「現状」、「電化1」、「電化2」の3つのケースにおける設

備区分別の世帯割合を表7～表9に示す。

「現状」は、CO2 統計より集計した 2017 年時点の世帯割合である。「電化 1」は、3.3 で求めた選定条件により抽出した電化の蓋然性が高い世帯が全て電化した場合である。

「HP」と「電温」、「AC」と「電熱」のように同じ用途で別々の機器に変更する可能性が高い世帯は、「HP」、「AC」を優先した。「電化 2」は、ガスまたは灯油機器を使用している全ての世帯が、厨房を「IH」、給湯を「HP」、暖房を「AC」にした場合である。「電温」、「電熱」、「他電気」のように既に電化している設備は変化しないものとする。また、設備に「その他」が一つでもある世帯は、同じく変化しないものとする。このため、「電化 2」においても、ガス・灯油機器の使用割合がゼロにならない。

表 7 電化前後厨房設備区分別世帯割合

設備区分	世帯数(万世帯)			世帯割合(%)			増減(万世帯)	
	現状	電化 1	電化 2	現状	電化 1	電化 2	電化 1	電化 2
IH	1079	1113	4510	21.6	22.3	90.2	34	3431
ガス	3703	3670	273	74.1	73.4	5.5	-34	-3431
その他	218	218	218	4.4	4.4	4.4	0	0

表 8 電化前後給湯設備区分別世帯割合

設備区分	世帯数(万世帯)			世帯割合(%)			増減(万世帯)	
	現状	電化 1	電化 2	現状	電化 1	電化 2	電化 1	電化 2
HP	646	723	4140	12.9	14.5	82.8	78	3494
電温	357	407	357	7.1	8.1	7.1	49	0
ガス	3304	3232	213	66.1	64.6	4.3	-72	-3091
灯油	429	374	26	8.6	7.5	0.5	-55	-403
その他	264	264	264	5.3	5.3	5.3	0	0

表 9 電化前後暖房設備区分別世帯割合

設備区分	世帯数(万世帯)			世帯割合(%)			増減(万世帯)	
	現状	電化 1	電化 2	現状	電化 1	電化 2	電化 1	電化 2
AC	1671	1675	3326	33.4	33.5	66.5	4	1656
電熱	1309	1328	1309	26.2	26.6	26.2	19	0
他電気	115	115	115	2.3	2.3	2.3	0	0
ガス灯油	1807	1784	152	36.1	35.7	3.0	-23	-1656
その他	98	98	98	2.0	2.0	2.0	0	0

3.5 住設機器の電化による省エネ効果

電化後のエネルギー消費量を推計するためには、住設機器の変更によるエネルギー消費量への影響を推計する必要があるが、表 3～表 5 に示した通り、エネルギー消費量に影響を及ぼす世帯属性が、設備区分毎に大きく偏っているため、住設機器の種類とエネルギー消費量の多寡を単純に関連づけることはできない。

本研究では、電化後のエネルギー消費量を推計するため、重回帰モデルの偏回帰係数を用いた。CO2 統計より目的変数を各世帯の年間エネルギー消費量の対数、説明変数を世帯属性および機器使用状況等としモデルを構築した。表 10 は、設備区分に係る住設機器の偏回帰係数を抜粋したものである。

各偏回帰係数は、基準となる機器から説明変数の機器に変更した場合の目的変数の変化割合を表している。電化後の各世帯の年間エネルギー消費量は式 (1) で表すことができる。

$$E_{ele} = E \times \frac{(1+a_{ele}+b_{ele}+c_{ele})}{(1+a+b+c)} \quad (1)$$

E : 電化前年間エネルギー消費量

E_{ele} : 電化後年間エネルギー消費量

a, b, c : 電化前住設機器偏回帰係数 (基準の機器は 0)

$a_{ele}, b_{ele}, c_{ele}$: 電化後住設機器偏回帰係数 (基準の機器は 0)

上記回帰モデルには、住宅の建て方、延床面積、冷房度日 (CDD)、暖房度日 (HDD)、世帯員数、世帯年収等の説明変数が組み込まれているため、住設機器の変更による年間消費エネルギーの変化割合は、それらの説明変数の影響を排除したものと考えられる。ただし、厳密には、ヒートポンプ機器の変化割合は、温暖地と寒冷地で異なるはずであり、暖房度日との交互作用を考慮すべきだが、モデルが複雑化すること、寒冷地はサンプルが少ないことから、簡易なモデルを用いた。

表 10 設備区分に係る機器の偏回帰係数

設問	説明変数	設備区分	偏回帰係数
コンロ (基準: ガスコンロ)	IH クッキングヒータ	IH	-0.0315
	ガスコンロ	ガス	-
主給湯器 (基準: ガス給湯器)	電気HP給湯機	HP	-0.1829
	電気温水器	電温	0.0976
	灯油給湯器	ガス	0.0716
	ガス給湯器	灯油	-
主暖房 (基準: 電気エアコン)	電気ストーブ類	電熱	0.0388
	電気カーペット・こたつ	電熱	-0.0687
	ガスストーブ類	ガス灯油	0.2027
	灯油ストーブ類	ガス灯油	0.2379
	ガス温水床暖房	ガス灯油	0.2707
	灯油温水床暖房	ガス灯油	0.3283
	セントラルガス	ガス灯油	0.3764
	セントラル灯油	ガス灯油	0.3721
電気エアコン	AC	-	

3.6 住設機器の電化による CO2 削減ポテンシャル

(式 1) の推計方法を使用して 3.4 で推定した 3 つのケースにおけるエネルギー消費量と CO2 排出量を求めた。CO2 排出量は、2017 年の CO2 排出係数では、電化が進むほど増加、2030 年の係数では、「電化 1」はほぼ横ばい、「電化 2」は減少、2050 年の係数では、電化するほど CO2 排出量が減少する。電化による電力使用量の増加は、「電化 1」で 4 TWh/年、「電化 2」で 99 TWh/年、エネルギー消費量の減少は、「電化 1」で 9 PJ/年、「電化 2」で 361 PJ/年となる (表 11)。「電化 2」において 2050 年の CO2 排出量がゼロにならない理由は、用途別設備区分の給湯及び暖房において主な給湯器と主な暖房機器を電化した世帯であっても、

ガス・灯油機器を併用している場合があること、また、エコウィル、エネファームを使用している世帯等、設備区分に「その他」が一つでもある世帯は、電化しないためである。

表 11 電化前後住設機器エネルギー消費量・CO2 排出量

	種別エネルギー消費量(PJ/年)				CO2 排出量[Mt-co2/年]			
	電気	都市 ガス	LPG	灯油	全体	2017	2030	2050
現状	793	417	150	318	1679	162	134	52
電化 1	808	414	143	304	1669	162	134	51
電化 2	1150	52	17	69	1308	168	128	10

4. 自家用車の電化ポテンシャル

4.1 前提事項

CO2 統計の車両に関する設問は、自動車、ガソリン二輪車、電動二輪車（電動アシスト自転車除く）の台数及び、3 台目までの自動車の種類、排気量、燃費、使用頻度、走行距離である。自動車の種類は、ガソリン車（ハイブリッド含む）、ディーゼル車（ハイブリッド含む）、電気自動車、プラグインハイブリッド車、その他（LPG 車、燃料電池車等）であるが、以降、それぞれ GV、DV、EV、PHEV、LPG 他と表す。本研究における自家用車の電化は、GV、DV が EV となる場合のみを分析の対象とする。PHEV は、ガソリンと電力の消費割合の把握が困難であり、LPG 他は、消費エネルギーの把握自体が困難であるためである。分析に使用した燃費、電費は表 12 の通り燃料種毎に一律とした。

表 12 自動車燃費⁷・電費

自動車	エネルギー	燃費/電費	エネルギー消費量 (MJ/km)
GV	ガソリン	12.2 km/L	2.74
DV	軽油	10 km/L	3.81
PHEV	ガソリン	16.5km/L	2.03
	電力	7 km/kWh	0.51
EV	電力	7 km/kWh	0.51

4.2 自家用車の使用状況

CO2 統計の集計結果によると、自動車の使用状況は都市階級（大都市、中都市、小都市）により大きな差がある。都市階級が小さいほど自動車を使用している割合が多く、自動車使用世帯のうち 5 分の 1 は、ガソリン二輪車も使用している（図 3）。自動車の世帯当たり平均使用台数は、大都市で 0.77 台、中都市で 1.13 台、小都市で 1.48 台である。世帯当たりのガソリンと軽油の消費量についても、都市階級が小さいほど消費量が多く、小都市は大都市の 2 倍の消費量である（図 4）。都市階級が小さいほど、公共交通機関が発達しておらず、自動車の利用頻度が多いことが原因と考えられる。

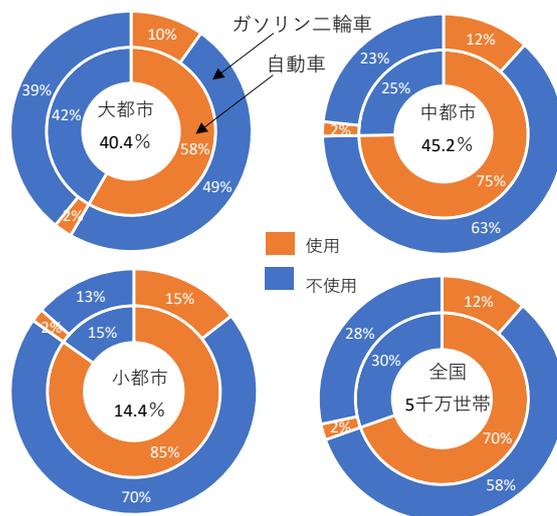


図 3 自動車・ガソリン二輪車使用世帯割合



図 4 世帯当たり年間ガソリン・軽油消費量 (9,125 サンプル)

自動車の燃料種別使用台数は、都市階級による大きな違いは見られず、いずれの都市階級においても GV が 95%以上となっている。燃料種の設問が、3 台目までしか設けられていないため、自動車の使用台数が多い小都市、中都市ほど、燃料種が不明な車が多いが、それらは、ほぼ GV であると考えられる。次世代自動車振興センターによると 2017 年度末の EV、PHEV の保有台数は、10.4 万台、10.3 万台であるが⁸⁾、CO2 統計の EV と PHEV の使用台数は、全国で 25.2 万台、17.7 万台であり、実情よりも EV、PHEV の使用割合が大きい。

4.3 自家用車の電化蓋然性

3.3 と同様の方法で、自家用車を EV にする蓋然性の高い世帯の選定条件を定めた。まず、EV を使用している世帯を 1 の正例、EV を使用していない世帯を 0 の負例とし、ロジスティック回帰モデルを構築した。分析対象は、自動車を 1 台以上使用している世帯のみとした。EV を利用している世帯は、分析対象のサンプルの 0.5% 程度と少ないためか、有意となる変数が少なかった。その中で EV の使用に影響を与える変数は、地域区分と太陽光発電システムの使用が上位となった。この他、戸建住宅や自動車利用台数が多い、走行距離が多い、省エネ運転を実施している等が、EV を使用している可能性が高いという傾向が出た（図 5）。以上の傾向より、EV を使用する蓋然性の高い世帯の選定条件を表 13 とした。選定条件において使用した閾値は、EV 使用

世帯の平均値である。

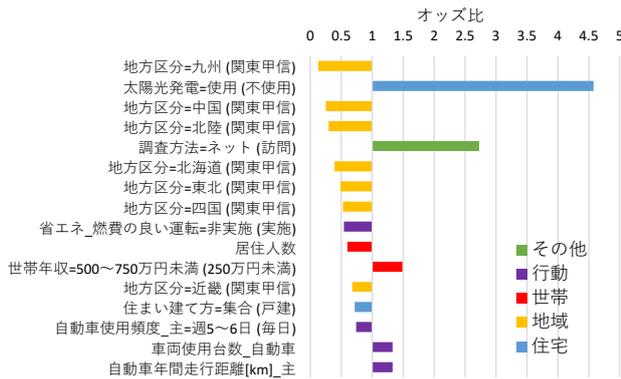


図5 EV回帰モデルのオッズ比 (7,178 サンプル)

表13 EVを使用する可能性が高い世帯選定条件

説明変数	条件
太陽光発電	「使用」
住宅の建て方	「戸建」
居住地域	「関東甲信越」
自動車利用台数	2台以上
走行距離	11,647km以上
省エネ運転	「実施」

4.4 自家用車の電化ポテンシャル世帯

「現状」、「電化1」、「電化2」の3つのケースにおける使用自動車別の世帯割合を表14に示す。「現状」は、CO2統計より集計した2017年時点の世帯割合である。「電化1」は、表13の選定条件により抽出したEVを使用する可能性が高い世帯が全て電化した場合である。選定された世帯は、自動車の使用台数が複数台であったとしても、すべてEVのみを使用する世帯に変わるものとする。「電化2」は、ガソリンまたはDV使用世帯が全てEVのみを使用する世帯に変わった場合である。PHEVまたはLPG他を使用している世帯は、変化しないものとする。使用している自動車の種類が不明な世帯については、ガソリン、軽油の使用量およびガソリン二輪車の使用有無から推定した。推定不能な場合は、すべてGVに分類した。

表14 電化前後使用自動車別世帯数

使用自動車	世帯数(万世帯)			世帯割合(%)				増減(万世帯)	
	現状	電化1	電化2	現状	電化		電化		
					1	2	1	2	
GV	3328	3289	-	66.6	65.8	-	-39	-3328	
DV	40	40	-	0.8	0.8	-	-	-40	
EV	10	51	3448	0.2	1.0	69.0	41	3438	
PHEV	10	10	10	0.2	0.2	0.2	-	-	
LPG他	9	9	9	0.2	0.2	0.2	-	-	
GV+DV	56	54	-	1.1	1.1	-	-	-56	
GV+EV	14	14	-	0.3	0.3	-	-	-14	
GV+PHEV	7	7	7	0.1	0.1	0.1	-	-	
GV+LPG他	4	4	4	0.1	0.1	0.1	-	-	
GV+EV+PHEV	0	0	0	0.0	0.0	0.0	-	-	
自動車不使用	1522	1522	1522	30.4	30.4	30.4	-	-	

「現状」に比べて、EV使用台数の増加数は、「電化1」で109万台、「電化2」で5,123万台である。「電化2」においても、GVがゼロにならない理由は、GVとPHEVまたはLPG他を併用している世帯があるためである(表15)。

表15 電化前後自動車使用台数

	自動車使用台数(万台)					
	GV	DV	EV	PHEV	LPG他	全体
現状	5033	90	25	18	16	5182
電化1	4926	88	134	18	16	5182
電化2	20	0	5128	18	16	5182

4.5 自家用車の消費エネルギー

ガソリンと軽油の消費量は、CO2統計の調査項目であるが、不明な世帯が380世帯と多く、また、自家用車の電力消費量は調査項目にない。そのためガソリンと軽油の消費量が不明な世帯およびEVとPHEVを使用している世帯について、走行距離を燃費で除してエネルギー消費量の推計を行った。ただし、PHEVについては、PHEVのみを使用している世帯を対象とし、まず燃費とガソリン消費量から、ガソリンで走行した距離を推計し、残りの走行距離を電費で除して、電力消費量を推計した。LPG他のエネルギー消費量については、推計が困難なため分析対象から除外した。以上の推計方法で推計不能なサンプルは、都市階級により自動車の使用頻度に偏りがあることを考慮し、都市階級別自動車燃料種別消費量の世帯平均で補完した。ただし、「GV+PHEV」、「GV+EV+PHEV」の電力消費量は、推計できないため、「GV+EV」の平均値で補完した。以上の推計結果を表16に示す。

表16 使用自動車別年間エネルギー消費量

使用自動車	(TJ)			世帯当たり(MJ/世帯)		
	ガソリン	軽油	電力	ガソリン	軽油	電力
GV	843,089	3,500	-	25,331	105	-
DV	464	11,240	-	1,172	28,385	-
EV	200	-	383	1,995	-	3,815
PHEV	1,242	-	192	12,307	-	1,905
LPG他	529	-	-	5,832	-	-
GV+DV	17,098	14,533	-	30,360	25,805	-
GV+EV	2,159	-	1,539	15,860	-	11,305
GV+PHEV	2,672	49	798	36,388	674	10,863
GV+LPG他	947	-	-	25,214	-	-
GV+EV+PHEV	71	-	16	23,759	-	5,267
自動車不使用	36,415	1,254	-	2,393	82	-
全体	904,887	30,576	2,927	18,098	612	59

推計したガソリンと軽油の消費量は、自動車だけでなく自動二輪車による消費量も含まれている。また、GV、PHEV、ガソリン二輪車を使用していない世帯においてもガソリンの消費量があること、DVを使用していない世帯においても軽油の消費量があることから、農機具や発電機等、自動車や自動二輪車以外の用途についてもガソリン・軽油の消

費量があることが分かる。これら自動車以外の用途を自動車の用途と分離することは困難であるため、電化によるエネルギー消費量の変化を推計する際には、世帯のガソリン、軽油の消費量をすべて自動車用途の消費エネルギーとする。

総合エネルギー統計⁹⁾の輸送部門最終エネルギー消費によると、自家用乗用車のガソリン消費量 1388 PJ に対して二輪車のガソリン消費量は 12 PJ となっている。今回の推計と単純な比較はできないが、自家用車に対して、二輪車のガソリン消費量は 1%に満たないため、推計に及ぼす影響は小さいと考えられる。(総合エネルギー統計の自家用車の定義は不明であるが、道路運送法の第 5 章によれば、車のナンバープレートの区別において、自家用車とは、有償で旅客、貨物の輸送を行うための事業用自動車以外の自動車であり、自家用車には、レンタカー、官公庁の公用車、会社の営業車・社用車なども含まれる。また二輪車は、自家用だけでなく営業用も含んでいる。これらの理由により、総合エネルギー統計の消費量が、今回の推計値を大きく上回っていると考えられる。)

4.6 乗用車の電化による CO2 削減ポテンシャル

4.4 で推定した 3 つのケースにおけるエネルギー消費量と CO2 排出量を推計した。推計方法は、4.5 で推計した電化前のガソリン、軽油の消費量に GV、DV に対する EV の燃費の比を乗じて求めた。

消費エネルギー、CO2 排出量ともに電化が進むほど減少し、「電化 2」においては、エネルギー消費量が「現状」の 4 分の 1 以下、CO2 排出量が 2017 年係数で「現状」の 2 分の 1 以下となった。現状に対する電力消費量の増加は、「電化 1」で 0.8TWh/年、「電化 2」で 45.6TWh/年である(表 17)。尚、表 17 のエネルギー消費量は、自動車不使用世帯のエネルギー消費量 38 PJ (ガソリン 36 PJ、軽油 1 PJ)を除いた数値である。また、使用自動車が「PHEV」、「GV+PHEV」、「GV+LPG 他」等の世帯は、電化されないため、「電化 2」においても CO2 排出量がゼロにならない点に留意が必要である。

表 17 電化前後自家用車エネルギー消費量・CO2 排出量

	種別エネルギー消費量(PJ/年)				CO2 排出量[Mt-co2/年]		
	ガソリン	軽油	電力	全体	2017	2030	2050
現状	868	29	3	901	62	62	62
電化 1	853	29	6	888	61	61	61
電化 2	6	0	167	173	23	18	0

5. まとめ

住設機器の電化については、現状の熱量当たりの CO2 排出係数は、電力がガス・灯油の 2 倍以上であるため、電化により CO2 排出量が増加する結果となった。検証のため、CO2 統計より、電力 2 次換算と電力 1 次換算 (9.76MJ/kWh

で計算)の年間エネルギー消費量を回帰した結果を比較する。表 18 は、両モデルの偏回帰係数を比較したものである。偏回帰係数は、基準となる機器を使用した場合に比べて説明変数の機器を使用した場合に増加する電力消費量 (kWh/年)を表している。電気 HP 給湯機は、電力 2 次換算では、ガス給湯器、灯油給湯器よりも省エネの傾向を示しているが、電力 1 次換算では、増エネの傾向を示している。対して、電気エアコンは、電力 1 次換算においても灯油給湯器に対して省エネの傾向を示している。同じヒートポンプ機器でも、電気 HP 給湯機は、電気エアコンに比べて高い熱量を必要とし、更に貯湯タンクからの放熱ロスもあるため、システム効率では直接燃焼系の給湯器よりも劣っている可能性がある。IH ヒーターについては、比較できなかったが、原理的に熱効率が 1 を超えることはないため、1 次換算のエネルギー効率は、ガスコンロよりも悪いと考えられる。このため、CO2 排出係数が現状程度の場合、住設機器の電化は需要端で省エネであっても、CO2 排出量から見れば、むしろ増加となってしまふと考えられる。

表 18 年間エネルギー消費量回帰モデル偏回帰係数

	説明変数	電力 2 次	電力 1 次
		主給湯器 (基準：ガス給湯器)	電気 HP 給湯機
	電気温水器	1,759	27,106
	灯油給湯器	3,727	2,640
主暖房 (基準：電気エアコン)	電気ストーブ類	2,267	-
	電気カーペット・こたつ	-1,844	-5,820
	ガスストーブ類	6,792	-
	灯油ストーブ類	8,481	2,708

以上より、CO2 排出量を抑えながら、住設機器の電化を進めるためには、CO2 排出係数の更なる低減やヒートポンプ機器の効率改善が必要である。2017 年の熱量当たりの CO2 排出係数は、電気が都市ガスの 2.6 倍なので、理論的には、ヒートポンプ機器の年間給湯効率 (APF) がその値を超えれば、電化により CO2 排出量を抑えることができるが、電気 HP 給湯機の効率は年々改善されており、最近では APF4.0 の商品も販売されている¹⁰⁾。今回の推計結果は、あくまでもストックベースの機器性能を前提としたものであり、実際に新規の HP 給湯機が導入される場合は、直接燃焼機器に比べて、CO2 排出量の少ない機器が導入される可能性が高い。また、HP 給湯機については、DR 資源としての活用も期待されており、電力システム全体における CO2 削減効果を評価する必要がある。

自家用車の電化については、電化が進むほど CO2 排出量が減少する結果となり、EV 大量導入時には大幅な CO2 削減が期待できる。GV と DV の燃費についても近年改善が進んでいるが、ガソリン車の 2017 年における新車の平均燃費 22 km/L¹¹⁾で計算しても、走行距離当たりの CO2 排出量 (2017 年係数)は、104.1 g-CO2/km で、電費 7 km/kWh の

EV の約 1.5 倍となり、EV 導入による CO2 排出量削減効果の方が大きい。また、HP 給湯機と同様 EV は、DR 資源としても活用が可能であり、V2G の実用化が進めば、電力システム全体に及ぼす CO2 削減効果は、より大きいものになると考えられる。

「電化 2」における電力消費量の増加は、住設機器で 99 TWh/年、自家用車で 45.6 TWh/年となり、これは、2017 年度の全国の電力需要 965 TWh/年⁹⁾のそれぞれ 10.3%、4.7% に相当する。

尚、3.2 および 4.2 で述べた通り、CO2 統計においては、HP 給湯機と EV の使用割合が高い。こうした傾向は太陽光発電の導入割合にも見られ、戸建住宅の PV 普及率は、太陽光発電協会のデータでは 8%であるのに対して¹²⁾、CO2 統計では 13.4%となっている。(CO2 統計は、世帯数であるのに対して、太陽光発電協会は、住宅数であり、太陽光発電協会の母数は、「住宅・土地統計調査」より 2013 年の戸建住宅総数を参照している点に留意が必要である。)こうした傾向から、CO2 統計の調査対象世帯は、やや電化した世帯に偏っている可能性があるが、原因は不明である。

謝辞

本研究は、環境省委託業務「令和元年度民生部門における脱炭素化対策・施策検討委託業務」において実施したものである。

本研究の分析に用いた気象データは、東京大学生産技術研究所喜連川研究室の GPV Data Archive のデータを利用した。

参考文献

- 1) 西尾健一郎，星野優子；主要 7 か国の電気利用技術による CO2 削減ポテンシャル—家庭ヒートポンプと電気自動車のケース分析—，電力中央研究所報告 (2010)
- 2) 岩船由美子，東仁，松岡綾子，下田吉之，荻本和彦；2030 年電力需給におけるヒートポンプ給湯器のインパクト評価，エネルギー・資源学会第 35 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 (2019)
- 3) 岩船由美子，荻本和彦，東仁；2030 年の電力需給における電気自動車の評価，電気学会電力技術/電力系統技術合同研究会 (2018)
- 4) 環境省；「平成 29 年度 家庭部門の CO2 排出実態統計調査 調査の概要」
- 5) 電気事業連合会；「電気事業における低炭素社会実行計画」における 2030 年度の目標値
- 6) 日本冷凍空調工業会 HP (アクセス日 2020.1)；
<https://www.jraia.or.jp/statistic/detail.html?ca=0&ca2=1>
- 7) 国土交通省；「平成 29 年度 自動車燃料消費量調査」
- 8) 次世代自動車振興センターHP (アクセス日 2020.1)；
<http://www.cev-pc.or.jp/tokei/hanbai.html>
- 9) 資源エネルギー庁；「総合エネルギー統計 2017 年度」
- 10) コロナ HP (アクセス日 2020.1)；
<https://www.corona.co.jp/premiumeco/>
- 11) 国土交通省；「自動車燃費一覧 (平成 31 年 3 月)」
- 12) 一般社団法人 太陽光発電協会；「太陽光発電の現状」(2018 年 10 月 24 日)

建物の省エネ化とEV化およびPV導入による地域民生部門 低炭素化の定量評価

An Empirical Study on the Regional Low-carbonization of Residential Sector Focusing on the Contributions of Energy Conservation, EVs and PVs

森 俊介 * 桐山 恵理子 ** 篠原 百合絵 ***
Shunsuke Mori Eriko Kiriya Yurie Shinohara

In order to meet the carbon reduction target pledged by Japan Government, a 26% reduction in carbon emissions of 2013 value by 2030, and aims to reduce it by 80% by 2050, various technology options have been proposed. Especially ZEH (Zero Energy Houses) and ZEB (Zero Energy Buildings) are expected for the residential sector as well as the penetration of Electric vehicles (EVs) the photovoltaics (PV). However, the evaluation of possible “synergies” among ZEH/ZEB, PV and EV have not been well evaluated since the survey on the base-line energy consumptions and driving pattern of vehicles was limitedly established. The effects of weather and other regional conditions are not discussed well. “The CO2 Emission Survey of Household Sector in 2018” by Ministry of Environment provides detailed data including daily usage of passenger cars. This study aims at the quantitative evaluations of energy demand changes and low carbonization in the residential sector considering regional differences. We show the contribution of implementing efficient energy facilities, ZEH/ZEH-M designs, PV installation, and the replacement of ICE vehicles by EV.

Keywords : ZEB/ZEH, EV charging, driving pattern questionnaire, reorganization of buildings

1. 背景と目的

気候変動リスクに関する科学的知見が進んだ結果、より厳しい温度上昇制約が求められつつある。パリ協定では今世紀末までの2°C上昇の制約からさらに一步踏み込んだ1.5°C目標に言及され、日本政府も2050年以降の「ゼロエミッション目標」を掲げている。2020年に世界を襲ったコロナウィルス感染による影響が今後の温暖化対策とどのように関連しあうかはなお不明ではあるものの、「気候変動」と「パンデミック」という異なるリスクに対し、社会の持続可能性を探る道は一段と大きな障壁にぶつかったように思われる。社会が温暖化ガス排出を0に近づけるだけでなく、さらに BECCS など「負の排出」オプションを必要とし、大きなコストを必要とするようになると、それを支える経済システムやエネルギーシステムも「効率性」に加え「安全と安心」が要求されるようになる。これに対し、SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5°C¹⁾ や IASA-LED シナリオ²⁾ は、抜本的なイノベーションによるエネルギー需要削減を行えば、ネガティブエミッションオプションの導入を回避しても1.5°C目標を達成する可能性を示している。日本を対象とした低炭素

社会戦略センター(LCS)の電源評価モデル研究³⁾も、電力需要が上昇すると二酸化炭素排出の2050年80%削減時の追加費用が急激に上昇することを示した。太陽光発電など再生可能エネルギーの拡大だけでなく、エネルギー需要削減は低炭素社会実現の負担を下げる重要な要素の一つとなっている。

注目される民生部門と輸送部門では、太陽電池(PV)の急速な価格低下と並行して、民生用建物の大幅な省エネ化を実現するZEH/ZEBや、電気自動車(EV)による乗用車部門の低炭素化、地域の統合的なエネルギー管理も現実的なものとなりつつある。

民生部門や輸送部門へのこれらの技術導入効果を定量的に評価するためには、よりミクロな視点から建物と輸送エネルギーシステムのスマート統合の可能性を見る必要がある。ここで、家庭用の用途別エネルギー需要や乗用車に対する需要、再生可能エネルギー供給とも地域性の影響が大きい点に注意が必要である。エネルギー供給側では気象関連など地域細分化されたデータが存在するが、需要側ではこれまで調査が限られており推計に頼らざるを得なかった。これに対し、近年、ミクロなエネルギー需要データに関する調査結果の報告も積み上がりつつある。環境省による家庭部門のCO2排出実態統計調査⁴⁾は、地域別エネルギー消費量/(世帯・月)のアンケート調査データを提供している。

* 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター研究統括/上席研究員
〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ
E-mail: mori@jst-lcs.jp
** 東京工業大学 環境・社会理工学院
*** キヤノン株式会社

業務用ビルでは、(一社)環境共創イニシアチブの BEMS 公開データ⁵⁾により時間当たりエネルギー消費量の実測値が一部把握できるようになった。家庭用自動車用エネルギーの地域差についても、上記家庭部門の CO2 排出実態統計調査や全国自動車利用 Web アンケート調査(東京理科大学)⁶⁾が利用可能となった。

本報告では、それらを用い、家庭部門エネルギー消費量、運輸エネルギー消費量の地域別評価についての評価結果を示し、CO2 排出削減の可能性を定量的に評価する。

EV の利用拡大はガソリンなど化石燃料消費の代替による CO2 排出削減と同時に、増加した電力需要を太陽電池(PV)など再生可能エネルギー供給でどこまで賄えるかが、天候も考慮した評価を必要とする。最終的にはこのような連携が相乗効果となるか相殺効果となるかを明らかにしなければならない。

この問題を分析するには、まず個別の需要家の行動と自動車の利用状況を組み合わせた評価を行い、さらにここで生じた電気事業者への需要変化が将来的にどのような電源構成と運用をもたらすかを評価する必要がある。すなわち地域エネルギー、自動車利用、電源計画を統合したアプローチが必要となる。

本研究は、以上の視点に基づいて遂行された現在科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「建物と輸送エネルギーシステムのスマート統合がもたらす地域民生部門炭素排出削減の定量評価」(LCS-FY2019-PP-19)⁷⁾の一環であるが、本報告にありうる誤りはすべて筆者の責に帰すものである。

2. 地域エネルギー需要評価のフロー

上記科学技術振興機構低炭素社会戦略センターでは、最終目的を明るく豊かな低炭素社会の構築に置き、その中の地域からの低炭素社会構築のシナリオ評価を以下のような構成で始めることとした。まず日本の社会経済を図-1 のように A.人口関連、B.産業部門、C.輸送部門、D.民生部門、E.ライフスタイルの大きく 5 つの分野に分ける。日本の地域的多様性を考慮しつつ分析を進める。ここでは、D.民生部門のうち家庭部門に着目する。次いで C.輸送部門との連携について、電気自動車の効果を地域ごとの家庭用自動車輸送需要や保有台数の差異に着目して分析する。[8]では、この一試算として、家庭と自動車の電力化が進展した場合の電気事業者への影響の評価を行った。

本研究では地域エネルギー評価を以下の手順で行われる。

民生部門の低炭素化には建物の省エネルギー化とエネルギーインフラの低炭素化、運輸部門の低炭素化には EV 化とシェアリングに期待がある。まず始めに家庭の既存のエネルギー需要を把握し(図-20)、次に高効率ヒートポンプ導入による

暖房および給湯エネルギーの削減を行う(図-2A)。続いて、住宅の断熱性能向上による暖房および冷房エネルギーの削減を

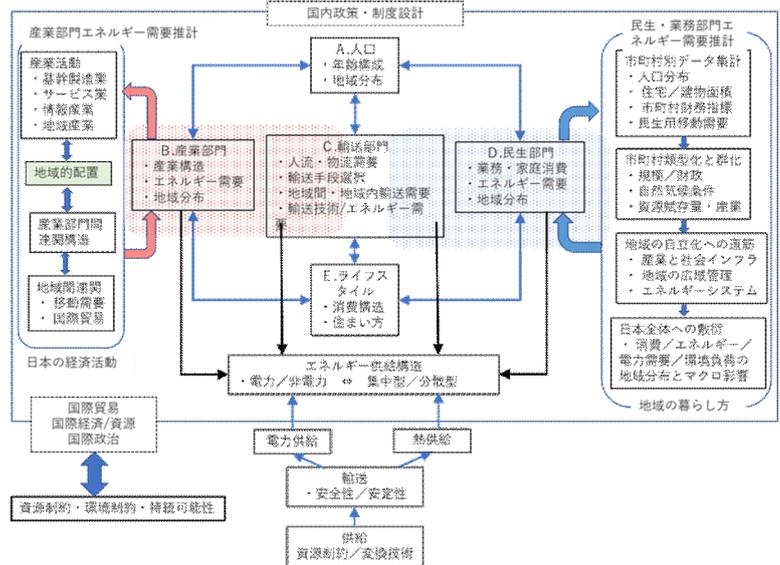


図-1 日本の社会経済シナリオ構築のマクロフレームと本提案の対象範囲

行う(ZEH-Ready)(図-2B)。ZEH/ZEB の定義に従い、エネルギー消費量と年間発電量が一致する PV 容量等を算出する(図-2C)。ただし集合住宅やオフィスビルでは、PV 設置面積の制約が強いため、戸建住宅に注目する。次いで EV 導入効果を評価する。(図-2D)ZEH では年間を通すと電力消費合計は PV 電力供給と一致する。しかし、各時刻ごとには電気事業者からの供給、蓄電池、他需要家との相互融通などの最適な運用が必要となる。

図-2E では、スマート化により複数の需要家と複数のエネルギー供給源が合理的に連携される。この段階では価格と需給に関する情報交換が相互に行われ、最適な運用が需給双方からなされる。ただし、スマートシティの実施例とその効果はまだ情報も少なく、社会実験プロジェクトの報告書から効果を探ることになる。

3. 家庭部門におけるエネルギー需要変化の推計

3.1 自動車エネルギー消費量の推計と統計比較

日本の最終エネルギー消費量の約 16%を家庭部門が占めている。家庭部門の低炭素化オプションとしては、暖房、冷房、給湯、照明機器等の高効率化、建物の断熱化を中心とする EH, ZEH-M 化など家庭内への導入のほか、EV 導入によるガソリンの置換と V2H, V2G による余剰電力活用、電気事業者との連携、制御のスマート化等にも期待がある。ここでは、家庭部門における図-2 のフレームの O-C 段階に着目する。O 段階の現状の地域別エネルギー消費量に始まり、A 段階の機器の電力化と HP 導入、B 段階の ZEH/ZEH-M Oriented 化による断熱性能の向上、C 段階の PV 導入による ZEH/ZEH-M 化の各段階のエネルギー消費量変化および CO2 排出量変化を逐次評価する。

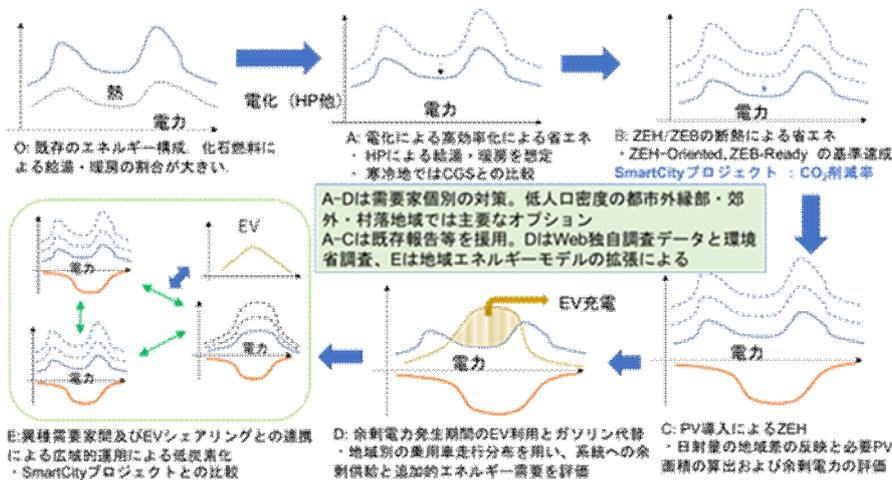


図-2 民生部門低炭素化評価のフロー

家庭部門へのEV導入効果については、単なる年間走行距離ではなく、日間の走行距離や走行時間帯などのデータが必要である。日間の十分な駐車時間とその範囲での走行距離に収まるならガソリン消費を全面的に置換可能となりうる。平日と休日での利用パターンの差や、複数保有世帯などの地域差も考慮が必要である。このような利用を地域エネルギー需給に結び付けるには、自動車利用の詳細な調査が必要となる。

環境省による家庭部門のCO₂排出実態統計調査も家庭の自動車保有台数、年間走行距離(保有台数合計)、年間エネルギー消費を含む。

筆者らは、2011-2012年にかけて自動車利用に関するWebアンケート調査を行い、全国計10,800件の回答を得ている⁶⁾。一例として東京都と群馬県の平日走行距離(1台目)と使用時間帯(1台目)の比較を図3に示す。

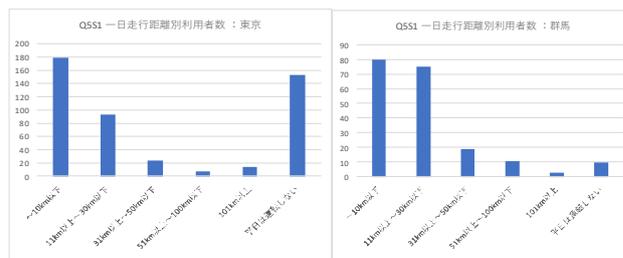
EV化の影響評価には、利用パターンの把握が不可欠であるが、各車両の走行パターンと燃料消費調査とマクロレベルの消費の突合せはこれまで十分にされていない。既存の統計調査では、①自動車検査協会の世帯当たり自動車保有台数、②総合エネルギー統計の地域別輸送用燃料消費、③家計調査の世帯当たりガソリン消費を利用できる。ただし、これらの統計の「世帯数」に自動車非保有世帯も含むため、環境省CO₂排出実態調査や森研究室のWeb調査とそのままでは比較ができない。そこで、いったん相互比較を行っておく。

家計調査では、世帯当たりガソリン消費額と消費量が時系列で得られる。2016-2018年平均では、世帯当たりガソリン代支出は全国59,342円(464.97L)とされる。自動車燃費を12km/Lで与えると、5580km、14km/Lでは6510kmとなる。ただし全世帯は自動車非保有世帯を含む。

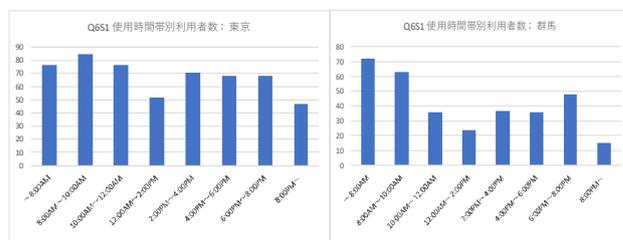
総合エネルギー統計2016年度詳細版では、運輸-旅客-乗用車-家計利用寄与としてガソリン消費24303.9ML、軽油926MLの記載がある。2016年の国勢調査に基づく世帯数

53,523(千世帯)で除すと473L/世帯となり、家計調査の数値とほぼ一致する。

森研究室Web調査は自動車保有世帯のみを対象とする。県別平均走行距離分布に対数関数をあてはめることで、累積80%の走行距離を算出すると平均8110kmとなる。これと自動車検査協会による世帯当たり保有台数を比較し補正すると、世帯当たり平均走行距離は5690kmとなって、これもほぼ家計調査データに一致する。



(a) 平日走行距離回答者数 左 東京都 右 群馬県



(b) 平日使用時間帯回答者数 左 東京都 右 群馬県

図-3 アンケート調査による平日走行距離(上段)と使用時間帯(下段)の東京都と群馬県の比較

これに対し、環境省家計部門CO₂排出調査では、世帯ごとの3台合計の年間走行距離や月ごとのガソリン(軽油)消費ほか、使用状況や保有状況について詳細な情報を提供する。回答の年間走行距離分布では10,000-15,000kmの回答がやや突出していること、回答カテゴリがやや広いことから、年間平均走行距離を求めるにあたり累積分布にロジット分布をあてはめた。結果、平均走行距離は9416km、自動車非保有世帯数で調整すると6459kmとなる。この調査には、走行距離と消費ガソリン(および軽油)の項目もあるので、この平均値を自動車非保有世帯を含む全世帯でもとめると、525.1Lとなる。このように環境省調査サンプルは、全体的にやや高めめの走行距離を示す傾向がある。

3.2 ZEH・ZEH-Mにおけるエネルギー消費量の推計

ZEHとは「外皮の断熱性能等を大幅に向上させるとともに、高効率な設備システムの導入により、室内環境の質を維持し

つつ大幅な省エネルギーを実現した上で、再生可能エネルギー等を導入することにより、年間の一次エネルギー消費量の収支がゼロとすることを旨とした住宅「[9]」であり、集合住宅においてはZEH-Mと呼ばれる。ここでは、HPの導入による暖房/給湯用エネルギー効率改善と、住宅の断熱性能向上による暖房/冷房用エネルギー消費削減を行い、年間エネルギー需要量をすべてPV発電で賄うものとする。

まず、図-20 段階の現状世帯あたりエネ

ルギー消費量を地域別に把握する。環境省平成29年度家庭部門CO2排出実態統計調査⁴⁾から、地域別建て方別世帯人数別の年間エネルギー消費量[GJ/(年・世帯)]を求めた。この時、「2人以上世帯」の世帯人数合計が国立社会保障・人口問題研究所の世帯の推移¹⁰⁾の世帯人数と一致するように、数値の補正を行う。

図-2A 段階の評価のために、(株)住環境計画研究所の家庭用エネルギー統計年報¹¹⁾を使用してエネルギー使用量を用途別に分け、空調にHP導入時のエネルギー消費量[GJ/(年・世帯)]およびCO2排出量[kg-CO2/(年・世帯)]を求めた。HPのCOP値はメーカー各社の技術報告を参考に、10地域ごとに設定した。さらに、図-2Bの住宅の断熱性能向上を実施した場合のエネルギー消費量[GJ/(年・世帯)]およびCO2排出量[kg-CO2/(年・世帯)]を推計した。最後に、環境省家庭部門CO2排出実態統計調査から10地域別のPV発電効率[GJ/(年・kW)]を算出し、図-2C 段階の世帯あたりのエネルギー消費量を賄うために必要なPV容量を求めた。これらの結果を、戸建住宅と集合住宅について取りまとめたものが、表-1および表-2である。ここから、ZEH達成に必要なPV容量は戸建住宅で2.4kW~8.8kWとなる。住宅メーカーのカタログには10kWのPVを持つモデルもあるため、各地域ともZEHの実現可能性はある。集合住宅においては、全世帯が敷地内にZEH-Mを達成するだけのPV容量を設置することは困難が予想され、敷地外の設置なども認められる必要が生じる。

この結果を、将来の世帯数推計と合わせることで、将来の家庭部門からのCO2排出変化の予測を行う。ここでは、国立社会保障・人口問題研究所の世帯数の推移¹⁰⁾と平成30年住宅・土地統計調査の住宅及び世帯に関する基本集計¹²⁾を用いて、将来の世帯人数別建て方別の世帯数を推計した。将来の世帯人数別建て方別の世帯数の想定を表-3に示す。以上をもとに、将来のZEH化とCO2排出係数変化のシナリオを次

表-1 戸建住宅におけるエネルギー消費量とCO2排出量変化の推計結果

推計の仮定		戸建住宅															
		単身世帯						2人以上世帯						補正後 2015年) 2人以上 世帯の 平均人 数			
		従来住宅		HP付住宅		HP付断熱住宅		従来住宅		HP付住宅		HP付断熱住宅					
系統電力 CO2排出 係数[kg- CO2/kWh]	COP	空調 削減率 [%]	太陽光 発電効 率 [GJ/(kW ・年)]	年間エネ ルギー消 費量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間CO2 排出量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間エネ ルギー消 費量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間CO2 排出量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間エネ ルギー使 用量 [GJ/(世 帯・年)]	ZEH時 必要PV容 量[kW]	年間エネ ルギー消 費量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間CO2 排出量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間エネ ルギー消 費量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間CO2 排出量 [kg- CO2/(世 帯・年)]		年間エネ ルギー使 用量 [GJ/(世 帯・年)]	ZEH時 必要PV容 量[kW]	
0.666	3.0	20%	3.74	53.20	5,045	26.71	4,941	24.88	6.7	北海道	70.55	7,055	35.42	6,552	32.99	8.8	2.80
0.521	3.5	20%	3.48	34.48	3,280	17.63	2,552	16.85	4.8	東北	57.93	5,646	29.63	4,287	28.30	8.1	3.21
0.475	4.0	20%	4.06	24.03	2,265	13.59	1,794	13.27	3.3	関東甲信	40.42	3,670	22.87	3,017	22.33	5.5	2.99
0.593	3.5	20%	3.63	28.90	3,095	16.80	2,768	16.23	4.5	北陸	54.94	6,087	31.94	5,262	30.85	8.5	3.26
0.476	4.0	20%	3.96	20.79	2,094	12.26	1,621	11.98	3.0	東海	39.77	3,833	23.46	3,102	22.91	5.8	3.14
0.435	4.0	20%	3.94	21.88	2,004	12.58	1,520	12.27	3.1	近畿	40.09	3,516	23.04	2,784	22.48	5.7	3.00
0.669	4.0	20%	3.96	25.30	3,471	15.66	2,910	15.27	3.9	中国	38.23	5,394	23.66	4,397	23.07	5.8	3.03
0.514	4.0	20%	3.84	20.85	2,396	13.34	1,905	12.98	3.4	四国	38.36	4,352	24.55	3,505	23.88	6.2	2.97
0.438	4.0	20%	3.89	21.94	2,295	14.04	1,708	13.70	3.5	九州	36.17	3,610	23.15	2,816	22.59	5.8	3.01
0.786	4.0	20%	4.00	12.56	2,369	10.04	2,191	9.71	2.4	沖縄	28.24	5,020	22.56	4,926	21.83	5.5	3.22

表-2 集合住宅におけるエネルギー消費量とCO2排出量変化の推計結果

推計の仮定		集合住宅															
		単身世帯						2人以上世帯						補正後 2015年) 2人以上 世帯の 平均人 数			
		従来住宅		HP付住宅		HP付断熱住宅		従来住宅		HP付住宅		HP付断熱住宅					
系統電力 CO2排出 係数[kg- CO2/kWh]	COP	空調 削減率 [%]	太陽光 発電効 率 [GJ/(kW ・年)]	年間エネ ルギー消 費量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間CO2 排出量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間エネ ルギー消 費量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間CO2 排出量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間エネ ルギー使 用量 [GJ/(世 帯・年)]	ZEH時 必要PV容 量[kW]	年間エネ ルギー消 費量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間CO2 排出量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間エネ ルギー消 費量 [kg- CO2/(世 帯・年)]	年間CO2 排出量 [kg- CO2/(世 帯・年)]		年間エネ ルギー使 用量 [GJ/(世 帯・年)]	ZEH時 必要PV容 量[kW]	
0.666	3.0	20%	3.74	23.35	2,377	11.72	2,169	10.92	2.9	北海道	45.72	4,178	22.95	4,246	21.38	5.7	2.80
0.521	3.5	20%	3.48	19.23	1,733	9.83	1,423	9.40	2.7	東北	41.52	3,679	21.24	3,073	20.29	5.8	3.21
0.475	4.0	20%	4.06	14.99	1,414	8.48	1,119	8.28	2.0	関東甲信	33.44	2,853	18.92	2,497	18.47	4.5	2.99
0.593	3.5	20%	3.63	17.50	1,856	10.18	1,676	9.83	2.7	北陸	40.02	3,779	23.27	3,832	22.47	6.2	3.26
0.476	4.0	20%	3.96	15.65	1,520	9.23	1,220	9.01	2.3	東海	35.85	3,086	21.14	2,795	20.65	5.2	3.14
0.435	4.0	20%	3.94	15.80	1,438	9.08	1,097	8.86	2.2	近畿	33.39	2,701	19.19	2,319	18.73	4.7	3.00
0.669	4.0	20%	3.96	15.21	1,910	9.41	1,079	9.18	2.3	中国	30.73	3,491	19.02	3,534	18.55	4.7	3.03
0.514	4.0	20%	3.84	12.16	1,351	7.78	1,111	7.57	2.0	四国	30.48	3,030	19.51	2,858	18.97	4.9	2.97
0.438	4.0	20%	3.89	13.83	1,300	8.85	1,077	8.64	2.2	九州	30.22	2,674	19.34	2,353	18.87	4.9	3.01
0.786	4.0	20%	4.00	10.23	1,770	8.17	1,785	7.91	2.0	沖縄	21.72	3,266	17.35	3,789	16.79	4.2	3.22

のように与えた。

SR1: 人口、世帯の増減のみに従う場合

SR2: SR1に加え、全新築戸建住宅がZEHに代わる場合

SR3: SR1に加え、CO2排出係数が2030年に0.37kg-CO2/kWh、2050年に0.11kg-CO2/kWhまで低下する。

SR4: SR3に加え、全新築戸建住宅がZEH化すると想定

表-3 将来の世帯人数別建て方別の世帯数の想定

戸建	集合	世帯数					
		2015年	2020年	2025年	2030年	2035年	2040年
単独	単独	5,245,596	5,566,793	5,770,174	5,865,079	5,829,040	5,565,537
2人以上	2人以上	23,183,801	23,177,651	22,802,124	22,212,572	21,416,222	20,276,547
単独	単独	13,172,326	13,775,643	14,189,610	14,388,636	14,404,454	14,378,507
2人以上	2人以上	11,730,074	11,586,488	11,354,175	11,017,446	10,665,268	10,536,475

結果を図-4に示す。SR4のように人口増減に従い全新築戸建住宅がZEHになり、かつ、電力のCO2排出量も80%削減を達成する場合は2050年に家庭部門のCO2排出量を80%削減できる可能性がある。

しかし住宅の耐用年数は約40年であり、近年さらに延びる傾向があること¹³⁾から、新築住宅が100%ZEH化されても、SR1シナリオからの全体的な追加的削減効果は30%程度にとどまる。現状でのZEH導入率は新築住宅の約11%であることから見れば、図-4のSR2シナリオの達成も困難と言わざるを得ず、実現には強力な導入推進策が不可欠となる。

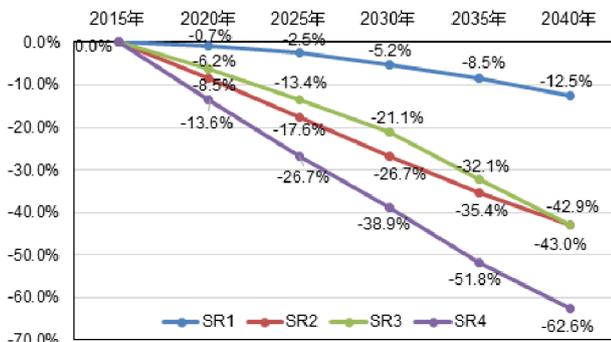


図-4 家庭部門のCO2排出量変化率。

3.3 家庭用エネルギーとEVの連携によるCO2排出削減の地域別評価

ここでは、第2章図-2D「EVと家庭との連携」について述べる。電気自動車の走行エネルギー効率にはしばしば7km/kWh（ガソリン燃費に換算すると約64km/L）が用いられ極めて低燃費である。再生可能エネルギー発電と組み合わせれば、大きな炭素排出削減が見込める。ただし、配送やタクシーのように昼間に自動車を使用し続ける場合はもちろん、雨天や曇天では充電は系統電力に頼らざるを得ないため、電源系統がゼロエミッション化されていない以上、どうしても電力系統からの排出は残る。その大きさは、電源系統のCO2排出係数とEVの電力需要による。これらを考慮した上で、家庭へのEVとPVの導入の効果を定量的に評価するには、時刻別の家庭用エネルギー需要、PV発電供給量、EVのエネルギー消費と最適な充電パターンを地域別さらに日本全体に積み上げる必要がある。

ここでは、その第一段階として、前節までに述べた家庭部門の地域・月別エネルギー消費推計値と東京理科大学で2011-2012年にかけて実施された自動車利用に関するWebアンケート調査（有効回答数 全国計 10,800件）を組み合わせることで、EV導入によるCO2排出削減効果を定量的に分析することを試みる。時刻別の需要データ、PV発電出力、走行パターンの統合的なモデリングは、筆者による報告¹¹⁾がある。

従来型自動車の平均燃費を12km/L、EVの電費を7km/kWh、電気事業者のCO2排出係数を0.496kg/kWhと仮定すると、家庭用と自動車用を含む在来型（PVなし）、全電化（PVなし）、ZEH化時（PVあり）の世帯当たりCO2排出削減量を県別に推計できる。ここでは、在来型住宅（PVなし）とエンジン車（ICE）を基準として、EVさらにPV導入と断熱化によるZEH化を導入した場合のCO2排出削減率推計を行った。結果を表-4に示す。なお県別自動車保有台数に合わせた補正を行っている。

表-4の在来型戸建て住宅を見ると、EV起源CO2排出最小の東京都（129.8kg-CO2/年）から最大の山形県（726.1kg-CO2/年）まで約5.6倍の地域差がある。全電化の効果は、戸建住宅で14.5%～34.9%、集合住宅で7.8%～33.1%であり、地域差はあるものの概ね約30%となる。これがEVの連携効果となる。

さらに、もし家庭に年間一次エネルギー消費と等しいだけのPVが設置され、かつ余剰電力がすべて系統電力にゼロ排出電源として供給されるというZEH/ZEH-M化が果たされ、その供給分がすべて既存電源を置き換えた上で、EVがガソリン自動車を置き換えるとするなら、CO2排出削減の効果は戸建て住宅で87.3%～96.7%、集合住宅では71.5%～94.8%と広がる。ただし、前述のとおり、ZEH-Mの実現は現状では制約が大きい点に留意が必要である。

4. 結論

現時点での知見は、以下の5点にまとめられる。

第一に、家屋の全電化とZEH-Ready化の効果は低炭素化に大きく寄与するが、PVなど創エネ機器が建物の敷地内に設置されることが要件となるためZEH-M化は制約が大きい。そのため敷地外にPVが設置されていてもZEH-Mと認定される方向性が望ましいことになる。また現状では新築住宅のZEH化率は11%程度であり、ZEH+EVの潜在性を実現するには強力な推進策が不可欠である。

第二に、モビリティの観点からは、EV化がエネルギー消費の削減とCO2排出の削減に大きく寄与することは疑いない。他方、現状を見ると、日本ではHEV化は進んだがEV化は遅れており普及推進のインフラ整備が必要である。次に大都市圏以外では、公共交通インフラの不足と移動手段の個人所有化が同時並行的に進み、自動車移動需要が拡大してきた。現状では、シェアリングエコノミーへの転換による低炭素化には大きな過去からの方向転換が必要であるとともに、乗用車のEV化のみでは将来的な高齢化社会への対応策としては不十分であり、代替手段が必要なこともまた示唆されている。

第三に、ZEH化後の家庭部門からのCO2排出は、もっぱら電気事業者の排出係数で決まることになる。したがって、電気事業者の排出係数が大幅に低下すれば、当然家庭部門の排出も、EVからの排出も移動需要に比例して低下することになる。

第四に年間合計発電電力量と年間電力需要合計のみからは家庭部門のZEH化に必要なPV設置面積は10kW以下であり、戸建て住宅では現実的な範囲に収まるものの、積雪のある日本海側では年間の変動も大きく冬季はほとんど期待ができない。もしこの変動をすべて蓄電池のみで吸収しようとする蓄電池容量は莫大なものとなると予想される。

第五に、家庭部門に大量にPVが搭載された場合、時間帯によっては電気事業者による余剰電力の全量買い取りができず出力抑制がなされる可能性がある。この場合、住宅にPVを追加導入しても、この時間帯で、それ以上のCO2排出削減は進まない。本章の評価は、電源構成を考慮しない潜在性評価であるため、この問題を明らかにするには家庭部門の評価は電源構成と統合化させる必要がある。これは次の段階の課題

である。

第六に、冬季、寒冷地では、HPの成績係数(COP)も低下する。この場合、電力化の限界が顕在化し、バイオマス燃料等で補うシステムが必要となろう。暖房が必要な場合、EVの電費が急激に低下することも知られており、地域性を考慮したエネルギーシステムの検討はさらに詳細な検討が必要とされる。

なお、本研究は、エネルギー・資源学会による「環境省 家庭部門のCO2排出実態統計調査及び家庭からの二酸化炭素排出量の推計に係る実態調査 全国試験調査の調査票情報を用いて行う研究」の一環であることを付記する。

参考文献

[1] SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5°C “Summary for policymakers”.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf (アクセス日 2019年12月19日)

[2] LED IIASA.
https://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/TransitionstoNewTechnologies/Low_Energy_Demand.html (アクセス日 2019年12月19日)

[3] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書、技術開発編、“低炭素電源システムの安定化と技術・経済性評価 (Vol.3) - 2050年の低炭素電源システムの技術開発課題 -”，国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター，平成31年3月。

[4] 環境省，“家庭部門のCO2排出実態統計調査(家庭CO2統計)”。
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html> (アクセス日 2019年12月19日)

[5] (一社)環境共創イニシアチブ，“エネルギー管理システム導入促進事業(BEMS)専用サイト”，<https://www.ems-opendata.jp/> (アクセス日 2019年12月19日)

[6] Webアンケート調査，東京理科大学 Green & Safety 研究センター(S1001018, 2011-2015 および科研費基盤研究(C)(22560407, 2011-2013)による

[7] 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター政策提案書，“建物と輸送エネルギーシステムのスマート統合がもたらす地域民生部門炭素排出削減の定量評価”(LCS-FY2019-PP-19)，2020年3月

[8] 森，“地域の建物再構成とEV化を含む低炭素街区のモデル化—宇都宮市を例として”，第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，2020年1月

[9] 資源エネルギー庁，“ZEHの定義(改定版)”，https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/assets/pdf/general/housing/zeh_definition_shugou.pdf

表-4 自動車からの排出を含む県別世帯あたり年間CO2排出量と電化、ZEH化による削減量

	乗用車CO2排出量		在来型からのCO2排出削減量(kg-CO2/年) 家庭用+移動用					
	ICE車排出量kg-CO2	EV排出量kg-CO2	在来型・ICE・戸建排出量	在来型・ICE・集合排出量	全電化・EV・戸建削減率	全電化・EV・集合削減率	ZEH・EV・戸建削減率	ZEH-M・EV・集合削減率
北海道	1057.5	387.2	8112.4	5235.2	14.5%	11.5%	95.2%	90.9%
青森県	1328.9	486.6	6974.7	5008.4	31.6%	28.9%	93.0%	84.2%
岩手県	1538.8	563.5	7184.5	5218.3	32.5%	30.3%	92.2%	81.7%
宮城県	1488.4	545.0	7134.2	5167.9	32.3%	30.0%	92.4%	82.3%
秋田県	1603.6	587.2	7249.3	5283.0	32.8%	30.7%	91.9%	80.9%
山形県	1983.0	726.1	7628.7	5662.4	34.3%	32.9%	90.5%	76.4%
福島県	1691.5	619.4	7337.3	5371.0	33.1%	31.2%	91.6%	79.8%
茨城県	1940.6	710.6	5611.0	4793.3	33.6%	33.1%	87.3%	71.5%
栃木県	1908.5	698.9	5578.9	4761.2	33.4%	32.9%	87.5%	72.0%
群馬県	1856.6	679.8	5526.9	4709.2	33.1%	32.5%	87.7%	72.8%
埼玉県	900.7	329.8	4571.0	3753.3	26.8%	24.7%	92.8%	86.8%
千葉県	977.0	357.8	4647.4	3829.7	27.4%	25.5%	92.3%	85.7%
東京都	354.5	129.8	4024.8	3207.1	21.8%	18.1%	96.8%	94.8%
神奈川県	629.3	230.4	4299.6	3481.9	24.5%	21.7%	94.6%	90.8%
新潟県	1649.7	604.1	7736.6	5428.3	24.2%	18.3%	92.2%	84.2%
富山県	1852.8	678.5	7939.7	5631.4	25.2%	19.9%	91.5%	82.3%
石川県	1816.9	665.3	7903.8	5595.5	25.0%	19.6%	91.6%	82.6%
福井県	1898.3	695.1	7985.2	5676.9	25.4%	20.2%	91.3%	81.9%
山梨県	1653.8	605.6	5324.1	4506.5	32.0%	31.2%	88.6%	75.7%
長野県	1642.0	601.3	5312.3	4494.6	31.9%	31.1%	88.7%	75.9%
岐阜県	1902.8	696.8	5735.6	4988.6	33.8%	30.0%	87.9%	75.1%
静岡県	1504.5	550.9	5020.4	4205.3	33.6%	31.7%	89.0%	76.2%
愛知県	1316.5	482.1	6710.9	4807.3	27.3%	16.5%	92.8%	86.4%
三重県	1721.0	630.2	6073.3	4750.6	31.9%	28.1%	89.6%	77.4%
滋賀県	1535.3	562.2	5887.5	4564.9	30.9%	26.7%	90.5%	79.8%
京都府	723.2	264.8	5075.5	3752.8	25.7%	18.7%	94.8%	90.5%
大阪府	631.3	231.2	4983.5	3660.9	25.0%	17.6%	95.4%	91.7%
兵庫県	1037.7	380.0	5390.0	4067.3	27.9%	22.2%	92.9%	86.4%
奈良県	1178.6	431.6	5530.8	4208.1	28.8%	23.6%	92.2%	84.5%
和歌山県	1436.1	525.9	5788.4	4465.7	30.4%	25.9%	90.9%	81.1%
鳥取県	1743.9	638.6	7138.3	5234.8	29.5%	20.3%	91.1%	81.9%
島根県	1724.7	631.6	7119.1	5215.6	29.4%	20.1%	91.1%	82.1%
岡山県	1668.2	610.9	7062.6	5159.1	29.1%	19.7%	91.4%	82.7%
広島県	1176.3	430.7	6570.7	4667.2	26.5%	15.0%	93.4%	87.8%
山口県	1357.2	497.0	6751.6	4848.1	27.5%	16.8%	92.6%	85.9%
徳島県	1462.7	535.6	5814.9	4492.3	30.5%	26.1%	90.8%	80.8%
香川県	1432.0	524.4	5784.2	4461.6	30.3%	25.8%	90.9%	81.2%
愛媛県	1080.5	395.7	5432.7	4110.1	28.2%	22.6%	92.7%	85.8%
高知県	1457.0	533.5	5809.2	4486.5	30.5%	26.0%	90.8%	80.8%
福岡県	1138.0	416.7	4747.8	3812.4	31.9%	27.4%	91.2%	82.3%
佐賀県	1634.9	598.7	5244.7	4309.4	34.9%	31.5%	88.6%	74.6%
長崎県	1161.9	425.5	4771.7	3836.3	32.1%	27.6%	91.1%	81.9%
熊本県	1424.7	521.7	5034.5	4099.2	33.7%	29.9%	89.6%	77.8%
大分県	1463.9	536.1	5073.7	4138.4	33.9%	30.2%	89.4%	77.2%
宮崎県	1469.7	538.2	5079.5	4144.1	34.0%	30.2%	89.4%	77.1%
鹿児島県	1244.8	455.8	4854.5	3919.2	32.6%	28.3%	90.6%	80.6%
沖縄県	1395.9	511.2	6415.5	4662.4	15.2%	7.8%	92.0%	86.5%

(アクセス日 2020年3月2日)

[10] 国立社会保障・人口問題研究所，“日本の世帯数の将来推計(都道府県別推計)(2019年推計)”。
<http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Mainmenu.asp> (アクセス日 2019年12月19日)

[11] (株)住環境計画研究所，“家庭用エネルギー統計年報2017年版(CD-R)”

[12] 総務省，“平成30年住宅・土地統計調査”。
<https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2018/tyousake.html> (アクセス日 2019年12月19日)

[13] 鎌谷、小松“建築寿命に関する研究”，2011年度建築生産系建築生産演習報告、<http://www.waseda.jp/sem-ykom/kamatani.pdf>,2011 (アクセス日 2019年12月19日)

社会統計に基づく住宅のエネルギー消費原単位の推計

Estimation of Energy Consumption Intensity of Residential Houses based on Social Statistics

鷲津 明由 *・中野 諭 **

Ayu Washizu Satoshi Nakano

Abstract

The purpose of this research is to prepare energy consumption data of houses as an evaluation standard for the analysis of the effect of introduction of regional home energy management technologies. For that purpose, we used the micro data of household CO₂ statistics to create a energy consumption intensity for housing, and aggregated the primary energy consumption status of households in Tokyo by region. Although the intensity estimated for each region in Tokyo is higher than the national average, it seems to be appropriate as a value based on the social attributes of the local residents. It was estimated that the total housing in Tokyo consumes 605,565 TJ. This is 19.9% of the national total energy consumption and 31% of the central region consumption in the comprehensive energy statistics, which is larger than the population ratio. By region, the consumption composition ratio was high in Setagaya Ward (6.8%), Nerima Ward (5.3%), and Hachioji City (5.0%).

Key words : energy consumption intensity for housing, household CO₂ statistics, evaluation standard, Tokyo

1. はじめに

長期エネルギー需給の見通し¹⁾によれば、全省エネルギー目標のうち23%を家庭部門が担うものとされている。しかし個々のエネルギー機器の目覚ましいエネルギー効率の上昇にもかかわらず、マクロ的なエネルギー消費の減少がそれに伴っていないというリバウンド効果の存在が指摘される¹⁾中で、その目標を確実に達成していくには様々な工夫が必要である。このような背景の下で近年では、特定の機器の省エネ性能に依存するばかりではなく、それらを組み合わせることで効果的に「マネジメント」することにより家庭のエネルギー消費を総合的に減らそうとする研究がある^{2,3)}。さらにマネジメントの地理的範囲を広げて、住宅地域全体のエネルギーマネジメントを効果的に行うというスマートシティについての研究もある⁴⁾。エネルギーマネジメントとは、個々の要素技術の組み合わせによって光熱費や環境負荷を減少させ、住宅全体または地域全体の最適化を図る技術と解される。その際、「最適化」は対象となる「住まい手(人)」にとってのものであるから、住まい手の属性に依存して最適化の手段(個々の機器の組み合わせ方や運用の仕方)は異なったものとなるだろう。つまり、住宅のエネルギーマネジメント技術の導入効果は、住まい手の性質との関連において評価する必要がある。

ところで、2013年(平成25年)に、住宅の省エネルギー基準が改正されたが、その改正のポイントは、それまでの外皮(外壁や窓等)の熱性能のみの基準に加え、建物全体の

総エネルギー性能を評価する「1次エネルギー消費量」の基準が加わったことであるⁱⁱ⁾。これは住まい手のライフスタイルや住宅の設備機器の多様化を背景に、住宅の省エネルギー化を総合的に捉えていくが必要になったからである。住宅の省エネ性能をわかりやすく示すために、住宅の面積当たり年間の1次エネルギー消費原量(MJ/(m²・年))を計算するweb計算支援プログラムなども公開されているⁱⁱⁱ⁾。住宅のエネルギーマネジメント技術の導入効果も年間の1次エネルギー消費原量の指標で効果的に捉えられると期待される。

本研究の目的は、平成29年度環境省家庭部門のCO₂排出実態統計調査(家庭CO₂統計)のマイクロデータを用いて、住宅のエネルギーマネジメント技術の導入効果を評価する際に、基準となる家庭のエネルギー消費原単位の「現状値」を、家庭の代表的な世帯属性との関係で把握することである。

2. 先行研究

地域別に見た家計によるエネルギー消費量/CO₂排出量の推計についての主な研究を見ると、環境省⁵⁾は、都道府県別エネルギー使用量を世帯数のみで案分する方法を示している。伊香賀ら⁶⁾は、建築学的な技術変数を用いて、住戸における暖冷房、給湯、その他別に47都道府県別エネルギー源別年間エネルギー消費量を精緻に推定しており、後に続く文献で引用されている^{4,7)}。ただし推計の年次がすでに古いことと、暖冷房と給湯が別々に推定されているという点で、あらゆる用途のエネルギー消費量を総合的に最適化するという近年のエネルギーマネジメント研究との差異

*早稲田大学社会科学総合学術院教授

〒169-8050 新宿区西早稲田 1-6-1

E-mail: washizu@waseda.jp

**日本福祉大学経済学部教授

〒477-0031 愛知県東海市大田町川南新田 229 番地

がある。田中⁸⁾は、総務省家計調査の光熱費総支出額をもとに、都道府県庁所在地と政令指定都市計 52 都市の世帯属性別エネルギー原単位の時系列データを作成している。ただし、家庭用エネルギー技術との関連性を定量的にとらえることを目的とはしていない。また金森⁹⁾は、住環境計画研究所による家庭用エネルギーハンドブックにおける世帯当たりデータをもとに、10 大地域×3 都市階級別、用途別の世帯当たりエネルギー消費原単位を想定し、それに世帯数を乗ずることで、地域別の家庭用エネルギー消費量を推定している。松岡ら¹⁰⁾はボトムアップシミュレーションモデルを用いて都道府県単位の家庭部門のエネルギー消費量を算出しているが、世帯別のエネルギー消費原単位は、シミュレーションで算出された 912 種類のモデル世帯の原単位のうちのいずれかが当てはめられている。なお、伊香賀ら⁶⁾、金森⁹⁾、松岡ら¹⁰⁾の地域別エネルギー消費量推算の基礎として用いられているのは世帯別のエネルギー消費原単位である。それらは、いずれも想定に基づいて生成された値であり、(生活時間の使い方などに関する想定の一部に統計調査結果がパラメータとして用いられていることはあるが)統計データを用いて推定されたものではない。

家庭のエネルギー消費原単位を統計的に推定した研究事例としては、社会生活基本調査のマイクロデータに基づいて、人々の 1 日 15 分ごとの行動に伴う電力消費を積み上げることで、世帯属性別に時間帯別電力消費の推算を行った試みがある¹¹⁾。また魏ら^{12,13)}は、社会生活基本調査および、国勢調査、全国消費実態調査、家庭 CO₂ 調査を整理して、家庭のエネルギー消費をその他の消費とともに分析するフレームワークを構築するとしている。石河ら¹⁴⁾は、家庭 CO₂ 統計全国試験調査結果を用いて、マイクロデータの 1 世帯当たり CO₂ 排出原単位を世帯要因等の説明変数に回帰させた結果に、各市町村の世帯要因の統計値(平均値等)を与えて、市町村別 CO₂ 排出原単位を推計した。家庭 CO₂ 統計は、世帯別のエネルギー消費量/CO₂ 排出量を、その世帯要因とともに把握できる貴重なデータベースであるといえる。

本研究ではそのような家庭 CO₂ 統計の利点を生かし、平成 29 年度調査結果のマイクロデータを用いて、地域別の住宅面積当たり 1 次エネルギー消費原単位を、石河ら(2018)が試験調査結果を用いて世帯当たり原単位を推計したのと類似的な方法で推計した。web 計算支援プログラムなどで示される面積当たり原単位と世帯要因との関係を明らかにすることにより、エネルギーマネジメント技術の導入効果が分析しやすくなると期待できるからである。また推計した結果を用いて、東京都(区部、多摩地域)の住宅による 1 次エネルギー消費状況を市町村別に集計したので、その結果を報告する。

3. 方法

分析手順を図 1 に示す。(1)まず、平成 29 年度家庭 CO₂ 調査のマイクロデータを用いて、各世帯の住宅面積当たり 1 次エネルギー消費原単位に影響する世帯要因について回帰係数を推定し、これに(2)東京都の市区町村別各世帯要因の統計値(平均値)を与えて、東京都の市区町村別住宅面積当たり 1 次エネルギー消費原単位を推算する。この原単位に(3)東京都土地利用現況調査に基づく市町村別の住宅の延べ床面積の集計値を乗じて、東京都市区町村別に家庭の 1 次エネルギー消費総量を推算した。

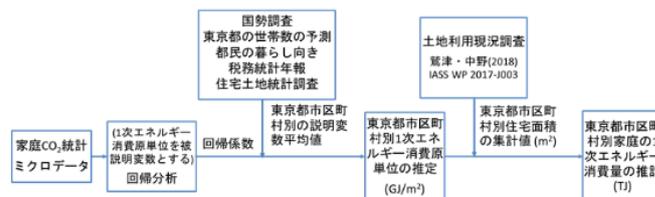


図 1 分析手順

3.1 回帰係数の推定

家庭 CO₂ 調査結果の全データを住宅の建て方(戸建て・集合)別、住宅床面積 6 区分別の 12 個のデータセットに分割し、各データセットに対して(1)式の重回帰式の係数を推定した。戸建て・集合の住宅床面積 6 区分は、松岡ら(2019)の区分に従っている。

$$\ln y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{36} \beta_i x_i \quad (1)$$

表 1 に(1)式における変数の定義を示す。被説明変数の床面積当たり 1 次エネルギー消費量(GJ/(月・m²))は、電力を発電時のエネルギー消費量で評価した 1 次エネルギー換算値であり、その対数値を使用する。電力の熱量換算係数には、日本サステナブル建築協会 DECC (Data-base for Energy Consumption of Commercial buildings)で用いられている 9.97 MJ/kWh を用いた。その他のエネルギーの熱量換算係数は、環境省¹⁵⁾に従っている。

説明変数としては、世帯人員、世帯主年齢、老人や子供の有無、世帯収入の一般的な世帯属性に加え、住宅や設備の性能、住まい手の省エネ意識に関する変数を選択した。建築時期の区分は家庭 CO₂ 統計調査票の分類を 10 年刻みにしたものであるが、建築時期が 1980 年以前であれば省エネ法施行以前、1981 年から 1990 年であれば旧省エネ基準(1980 年基準)、1991 年から 2000 年であれば新省エネ基準(1992 年基準)、2001 年から 2010 年であれば次世代省エネ基準(1999 年基準)、2011 年以降であれば現行基準(2013 年基準)というように、住宅の建築時期と省エネ基準を大まか

に対応させられるだろう。平日の在宅時間、冷蔵庫やエアコンの状況、LED電球の導入状況については、Nakano and Washizu¹¹⁾において、全電力消費に占める当該機器による節電量が、時間帯別の電力消費の積み上げ計算に比較的大きな影響を与えていたことから説明変数として採用した。地域ダミーの区分は、建築物省エネルギー基準の8地域区分である。

表1 変数の定義

変数	定義
y	床面積当たり1次エネルギー消費量 GJ/(月・㎡)
x_1	世帯人員 人
x_2	世帯主年齢 4.5, 14.5, 24.5, 34.5, 44.5, 54.5, 62, 69.5, 80歳
x_3	未成年(20歳未満)の世帯員ダミー あり=1, なし=0
x_4	65歳以上の世帯員ダミー あり=1, なし=0
x_5	世帯年収 125万円, 375万円, 625万円, 875万円, 1250万円, 1750万円
x_{6-9}	建築時期(基準: 1980年以前) 1980年以前=1, 1981年から1990年=2, 1991年から2000年=3, 2001年から2010年=4, 2011年以降=5
x_{10-12}	平日の在宅時間(基準: ほぼ毎日) ほぼ毎日=3, 週3-4日=2, 週1-2日=1, ほとんどいない=0
x_{13}	冷蔵庫の購入時期 2011以降=1, 2011以前=0
x_{14}	エアコンの購入時期 2011以降=1, 2011以前=0
x_{15}	居間の照明にLEDがある/ない あり=1, なし=0
x_{16}	エアコンの設定温度 ℃
x_{17}	エアコンの平日のおおよその使用時間(8月頃) 24時間=100%, 20~24時間=91.67%, ~, 2~4時間=12.5%, 0~2時間=4.17%
x_{18}	省エネ行動実施率(実施数/12項目*) %
x_{19-25}	地域ダミー(基準: 6地域) 建築物省エネルギー基準の地域(1~8)
x_{26-36}	月次ダミー(基準: 6月)

*家庭CO₂統計夏季調査票の家電の使い方に関する12の質問のうち「実施している」項目数の比率

3.2 東京都の市区町村別各世帯要因の統計値の推計

東京都の市区町村別の床面積当たり1次エネルギー消費量を推計するために、(1)式で推定された回帰係数に乗じる説明変数の統計値は、国勢調査、東京都世帯数の予測、住宅土地・統計調査から得た。市区町村別の世帯年収額は、東京都生計分析調査報告「都民のくらしむき」における勤労者世帯2018年実収入額を、東京都税務統計年報「都民の個人住民税1人当たり税額及び1世帯当り税額」の市区町村別の値に比例させて推計した。また $x_{10} \sim x_{18}$ の住宅や設備の性能、住まい手の省エネ意識に関する変数については、家庭CO₂統計の住宅の建て方(戸建て・集合)別、住宅床面

積6区分別の12個のデータセットをさらに建築物省エネルギー基準における8つの地域別に分割した96の分析区分の平均値のうち、東京都の各市町村に対応する分析区分の値を当てはめた。東京都の各市町村に対応する分析区分(戸建て/集合住宅別住宅面積区分(各地域の平均住宅面積が該当する区分)と建築物省エネルギー基準における地域区分の組み合わせによるもの)を表2に示す。例えば、港区には96区分別の平均値のうち、戸建てについてはD5の、集合住宅についてはC4の分析区分について計算された平均値を割り当てた。

表2 東京都の各市町村に対応する建築物省エネルギー基準の地域区分および、戸建て/集合住宅別住宅面積区分

	住宅面積区分*	地域区分	分析区分	
戸建て	80~100㎡	6	D1	中央区, 荒川区
	100~120㎡	4	D2	奥多摩町
		5	D3	Aの多摩地域の市町村
		6	D4	その他の地域
120~150㎡	6	D5	千代田区, 港区	
集合	40~60㎡	4	C1	奥多摩町
		5	C2	Aの多摩地域の市町村
	6	C3	その他の地域	
	60~80㎡	6	C4	港区, 稲城市

A: 八王子市, 立川市, 青梅市, 昭島市, 小平市, 日野市, 東村山市, 福生市, 東大和市, 清瀬市, 武蔵村山市, 羽村市, あきる野市, 瑞穂町, 日の出町, 檜原村

*平成30年住宅・土地統計調査より東京都の各市区町村の平均住宅面積を戸建て/集合住宅別に算出し、対応する住宅面積区分に当てはめた。

3.3 東京都市区町村別家庭の1次エネルギー消費総量推算

東京都のr番目の市区町村における家庭の1カ月・床面積当たり1次エネルギー消費原単位 \hat{y}_r (GJ/(月・㎡))を(2)式によって推算する。

$$\ln \hat{y}_r = \beta_{0,r} + \sum_{i=1}^{18} \beta_{i,r} \bar{x}_{i,r} + \sum_{j=19}^{25} \beta_{j,r} \bar{x}_{j,r} + \frac{1}{12} \sum_{k=26}^{36} \beta_{k,r} \quad (2)$$

$\beta_{*,r}$ は(1)式を、家庭CO₂統計の住宅の建て方(戸建て・集合)別、住宅床面積6区分別の12個のデータセットのうち、r番目の市区町村が含まれる(表2を参照)データセットで推定したときの $\beta_{*,r}$ の推定値である。 $\bar{x}_{i,r}$ は、前項で説明した、説明変数のr番目の市区町村についての平均値、 $\bar{x}_{j,r}$ は第j-18番目の建築物省エネルギー基準の地域区分がr番目の市区町村を含むときに1、そうでないときに0となる値である。(2)式の最終項は、月別効果を平均して1月あたり1次エネルギー消費原単位の年平均値としている。

(2)式の1カ月当たり1次エネルギー消費原単位の年平均値を用いて、東京都市区町村別家庭の年間1次エネルギー

一消費量 T_r (GJ/(年・m²))を(3)式で推算する。

$$T_r = 12 \cdot \hat{y}_r \cdot S_r \quad (3)$$

ただし、 S_r は東京都の r 番目の市区町村における住宅の延べ床面積の合計値で、東京都から貸与された土地利用現況調査を用いて、鷲津・中野¹⁶⁾が集計したものである^{iv)}。

表3 東京都市区町村別住宅面積当たり1次エネルギー消費原単位推算に用いる回帰係数

	戸建て				集合住宅			
	80~100 m ²	100~120 m ²	120~150 m ²	40~60 m ²	60~80 m ²			
世帯人員数	0.171 (0.006) ***	0.132 (0.005) ***	0.143 (0.004) ***	0.158 (0.007) ***	0.144 (0.007) ***			
世帯主年齢	0.006 (0.001) ***	0.004 (0.001) ***	0.005 (0.001) ***	0.007 (0.001) ***	0.006 (0.001) ***			
未成年(20歳未満)の世帯員ダミー	-0.005 (0.016)	-0.014 (0.013)	-0.068 (0.012) ***	0.030 (0.015) **	0.003 (0.015)			
65歳以上の世帯員ダミー	0.092 (0.014) ***	0.036 (0.015) **	-0.051 (0.011) ***	-0.065 (0.017) ***	-0.037 (0.015) **			
世帯収入(対数値)	0.101 (0.009) ***	0.108 (0.008) ***	0.100 (0.006) ***	0.048 (0.008) ***	0.074 (0.008) ***			
建築時期 (基準：1980年以前)	1981年から1990年	-0.047 (0.015) ***	-0.023 (0.015)	-0.038 (0.013) ***	0.015 (0.015)			
	1991年から2000年	-0.063 (0.017) ***	0.023 (0.015)	-0.069 (0.012) ***	0.073 (0.015) ***			
	2001年から2010年	0.026 (0.017) ***	0.094 (0.016) ***	0.037 (0.013) ***	0.066 (0.016) ***	0.027 (0.015) **		
	2011年以降	-0.135 (0.019) ***	-0.084 (0.018) ***	-0.159 (0.016) ***	0.131 (0.018) ***	-0.023 (0.019) ***		
平日昼間の在宅 (基準：ほぼ毎日)	ほとんどいない	0.051 (0.014) ***	-0.058 (0.012) ***	-0.020 (0.011) *	0.036 (0.012) ***			
	週1~2日	-0.046 (0.014) ***	-0.023 (0.013) *	0.005 (0.011)	0.028 (0.015) *			
	週3~4日	-0.029 (0.016) *	0.016 (0.013)	-0.031 (0.013) **	0.019 (0.015)	0.006 (0.013)		
地域ダミー (基準：6)	冷蔵庫2011年以降購入時期ダミー	-0.052 (0.010) ***	-0.039 (0.009) ***	-0.016 (0.008) **	-0.059 (0.010) ***			
	エアコン2011年以降購入時期ダミー	-0.014 (0.010)	0.011 (0.009)	-0.043 (0.008) ***	-0.016 (0.010)	0.004 (0.009)		
	居間のLED照明ダミー	0.016 (0.027)	0.005 (0.046)	0.052 (0.024) **	-0.169 (0.084) **	-0.172 (0.032) ***		
	夏期のエアコン設定温度	-0.007 (0.003) **	-0.021 (0.003) ***	-0.012 (0.003) ***	-0.008 (0.003) **	-0.009 (0.003) ***		
	夏期のエアコン使用時間(24時間を100%)	0.003 (0.000) ***	0.002 (0.000) ***	0.003 (0.000) ***	0.003 (0.000) ***	0.004 (0.000) ***		
	省エネ行動達成率	-0.004 (0.000) ***	-0.004 (0.000) ***	-0.003 (0.000) ***	-0.004 (0.000) ***	-0.005 (0.000) ***		
	1	0.576 (0.051) ***	0.379 (0.089) ***	0.328 (0.068) ***	0.312 (0.047) ***	0.499 (0.140) ***		
2	0.321 (0.052) ***	0.351 (0.036) ***	0.394 (0.029) ***	0.515 (0.073) ***	0.291 (0.052) ***			
3	0.085 (0.043) **	0.129 (0.031) ***	0.202 (0.024) ***	0.287 (0.034) ***	0.631 (0.042) ***			
4	0.132 (0.025) ***	0.135 (0.018) ***	0.177 (0.014) ***	0.125 (0.021) ***	0.095 (0.022) ***			
5	0.001 (0.012)	0.024 (0.011) **	0.032 (0.009) ***	0.075 (0.013) ***	-0.005 (0.012)			
7	0.000 (0.022)	0.063 (0.019) ***	-0.056 (0.014) ***	-0.117 (0.020) ***	-0.073 (0.020) ***			
8	-0.144 (0.025) ***	-0.109 (0.032) ***	-0.230 (0.031) ***	-0.231 (0.019) ***	-0.197 (0.020) ***			
月次ダミー (基準：6月)	1月	0.313 (0.023) ***	0.371 (0.020) ***	0.396 (0.018) ***	0.194 (0.022) ***	0.205 (0.021) ***		
	2月	0.035 (0.022)	0.055 (0.020) ***	0.075 (0.017) ***	-0.045 (0.021) **	-0.011 (0.020)		
	3月	-0.163 (0.022) ***	-0.149 (0.020) ***	-0.141 (0.017) ***	-0.195 (0.021) ***	-0.179 (0.020) ***		
	4月	-0.025 (0.022)	-0.036 (0.020) *	-0.044 (0.017) **	-0.044 (0.022) **	-0.058 (0.020) ***		
	5月	0.088 (0.023) ***	0.076 (0.020) ***	0.071 (0.017) ***	0.088 (0.022) ***	0.070 (0.020) ***		
	7月	-0.054 (0.022) **	-0.033 (0.020) *	-0.023 (0.017)	-0.116 (0.022) ***	-0.123 (0.020) ***		
	8月	0.182 (0.023) ***	0.243 (0.020) ***	0.246 (0.018) ***	0.045 (0.022) **	0.001 (0.020)		
	9月	0.454 (0.023) ***	0.541 (0.020) ***	0.574 (0.018) ***	0.278 (0.023) ***	0.225 (0.021) ***		
	10月	0.727 (0.023) ***	0.812 (0.020) ***	0.830 (0.018) ***	0.516 (0.023) ***	0.478 (0.021) ***		
	11月	0.664 (0.023) ***	0.756 (0.020) ***	0.782 (0.018) ***	0.491 (0.023) ***	0.454 (0.021) ***		
	12月	0.437 (0.024) ***	0.513 (0.021) ***	0.543 (0.018) ***	0.283 (0.023) ***	0.288 (0.022) ***		
	定数項	-4.252 (0.109) ***	-3.839 (0.101) ***	-4.220 (0.088) ***	-3.548 (0.099) ***	-3.634 (0.098) ***		
観測数	7872	10056	13596	7104	7932			
自由度調整済み決定係数	0.478	0.475	0.482	0.450	0.446			

括弧内は標準誤差, *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

4. 結果

4.1 回帰分析の結果

家庭 CO₂ 調査結果の全データを住宅の建て方(戸建て・集合)別、住宅床面積 6 区分別の 12 個のデータセットに分割し、各データセットに対して(1)式の重回帰式の係数を推定した結果のうち、東京都の各市区町村の住宅面積当たり 1 次エネルギー消費原単位の推算に用いる 5 本の回帰式の係数を表 3 に示す。なお詳細な推定結果は鷺津・中野¹⁾を参照されたい。

表 3 によれば、ほとんどの回帰係数は信頼水準 1% で有意に推定されている。回帰係数の符号も常識的な予測に一致するケースが多い。例えば、1 次エネルギー消費原単位に対して、世帯人員数や世帯主年齢は正の効果があり、冷蔵庫の購入時期が新しいことや夏季のエアコンの設定温度が高いこと、省エネ行動達成率が高いことは負の効果を持つ。エアコンの使用時間が長いこと、建築物省エネルギー基準における地域区分が 6 地域よりも寒冷な地域であることは正の効果を持つ。ただし、建物の建築時期について 1980 年以前に対して新しいことは、負の効果を持つと予想されたが、必ずしもそうでないケースがある。40~60m²の集合住宅あるいは 2001 年から 2010 年に建てられた 100~150m²の戸建て住宅を示すダミーの係数は有意な正の値を示しており、1980 年以前建設の住宅に対してエネルギー消費原単位が増えてしまうという結果である。月別ダミーにかかる回帰係数をみると、6 月と比較した場合、3、4、7 月にエネルギー消費原単位が低くなり、それ以外の月では高くなるという結果である。

表 4 東京都にかかわる分析区分における回帰式の再現性

	分析区分*	ln(床面積当たりエネルギー消費量)		95%信頼区間	
		実測値	予測値		
戸建て	D1	-2.979	-2.938	-2.949	-2.927
	D2	-3.039	-2.979	-3.012	-2.946
	D3	-3.062	-3.022	-3.041	-3.003
	D4	-3.077	-3.051	-3.061	-3.042
	D5	-3.175	-3.136	-3.144	-3.127
集合	C1	-2.660	-2.567	-2.605	-2.528
	C2	-2.708	-2.642	-2.665	-2.620
	C3	-2.738	-2.701	-2.712	-2.690
	C4	-2.854	-2.806	-2.816	-2.797

*表 2 を参照。

推定された回帰式の再現性を表 4 で検討する。表 4 では、表 2 に示した分析区分ごとに、家庭 CO₂ 調査で実測されたそれぞれの説明変数の平均値に表 3 の回帰係数を当てはめて推算した被説明変数(エネルギー消費原単位の対数値)の「予測値」を、それぞれの分析区分で実測された被説明変

数の平均値と比較し、さらに予測値の 95%信頼区間を示した。すると被説明変数の予測値は平均値の 95%信頼区間を上側に外れる(過大推定の)傾向がある。

4.2 東京都の市区町村別家庭の 1 次エネルギー消費原単位の推算結果

(2)式の説明変数に 3.2 節で算出した東京都各市町村の平均値を当てはめて推算した、各市区町村における家庭の 1 カ月当たり 1 次エネルギー消費原単位 (GJ/(月・m²))の推算結果をみると、東京都各地域の原単位は、同じ地域や住宅面積区分の全国平均と比較すると、総じて高めであった。表 5 に東京都の主な地域の原単位の推算結果を、家庭 CO₂ 統計で観測される地域別住宅面積区分の原単位平均値と比較した。すると推算値は、平均値の戸建てでは 1.6~1.7 倍、集合住宅では 1.2~1.3 倍の大きさと計算された。

表 5 主な地域の 1 カ月・床面積当たり 1 次エネルギー消費原単位 (GJ/(月・m²))

	戸建て		集合	
	推算値	平均値	推算値	平均値
世田谷区	0.0885	0.0537* ¹	0.0901	0.0746* ³
練馬区	0.0862		0.0918	
江戸川区	0.0907		0.0919	
町田市	0.0900		0.0944	
八王子市	0.0906	0.0565* ²	0.0981	0.0782* ⁴

*¹ 分析区分 D4 の平均,*² D3 の平均,*³ C3 の平均,*⁴ C2 の平均

図 2 と 3 は、東京都についての(2)式の推算結果のうち、左辺の原単位の推算値 \hat{y} と、右辺の項のうち世帯収入(対数値)、世帯人員の項との相関図を、23 区の集合住宅の推算結果について示した。すると、原単位と世帯人員の項に比較的確かな正の相関関係がプロットされた。ほかに原単位と世帯主年齢の項にも明確な正の相関がプロットされた。図 3 では、港区を示すプロットが上方にずれているが、これは図 2 で同区の世帯年収要因が著しく大きいことで説明される。表 3 で世帯年収にかかる回帰係数が正であるにもかかわらず、図 3 では明確な相関図とならなかったのは、(港区を除けば)23 区内の世帯年収の違いはそれほど小さくなく、原単位の違いは年収以外の要因で説明されるためと考えられる。したがって、世帯年収の差は東京都内の地域間の原単位の違いよりも、東京都と他都道府県との違いを説明する要因ではないかと推察された。また推定された原単位は、地域の住まい手の世帯人員や世帯主年齢という社会的属性を踏まえた値として、妥当な相対関係を有しているものと思われる。前節で、回帰結果を用いた 1 次エネルギー消費原単位の予測値は過大推定の傾向があることを確認

したが、本節で東京都各市町村について推算した原単位が平均値に比して大きくなるのが、推定誤差によるものか、東京都または大都市特有の世帯属性の影響によるものかについて引き続き精査が必要である。

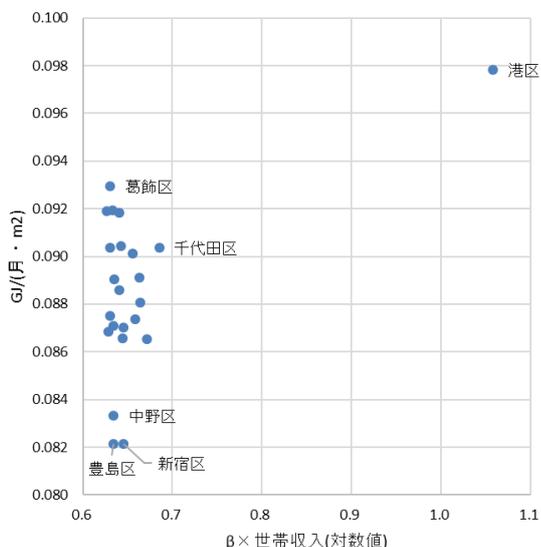


図2 1次エネルギー消費原単位と世帯収入の相関図
(23区・集合住宅のケース)

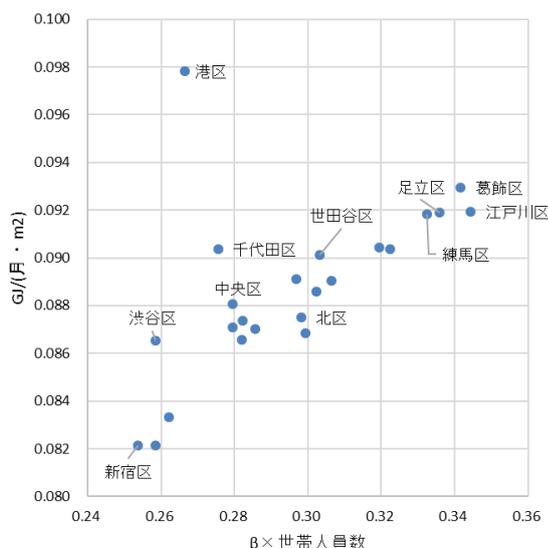


図3 1次エネルギー消費原単位と世帯人員数の相関図
(23区・集合住宅のケース)

4.3 東京都市区町村別家庭の1次エネルギー消費総量推算結果

前節で平成29年度について推算した東京都各地域における家庭の1カ月の床面積当たり1次エネルギー消費原単位(GJ/(月・m²))と鷺津・中野¹⁶⁾の平成23年度東京都土地利用現況調査の集計結果を用いて、(3)式から各地域における家庭の1年間の1次エネルギー消費量(TJ/年)を推算した結果を表6に示す。

それによれば、東京都の家庭による1年間の1次エネルギー消費量は60.6万TJであり、うち57.8%は集合住宅に

よる。23区に限ると集合住宅の比率は65%である。2018年度総合エネルギー統計によると、家庭部門のエネルギー需要量(電力寄与分を含む値)は、全国で304.4万TJ、中央地域(関東・東海・関西)で195.1万TJとされているので、60.6万TJはそれらの19.9%と31.0%に当たる。平成29年の東京都の人口は、1372.4万人で、全国の10.8%、中央地域(関東・東海・関西)の16.8%であるので¹⁷⁾、60.6万TJという推算結果は、人口比に比して大きいことになる。前節で推算した東京都各地域の1次エネルギー消費原単位が、家庭CO₂統計で観測される地域別住宅面積区分の原単位平均値に比べて高かったことを反映している。また、推算に用いた鷺津・中野¹⁶⁾の東京都土地利用現況調査による独立住宅および集合住宅の延床面積の集計値には、店舗兼住宅などが含まれない一方、集合住宅は共用部を含む面積となっている。この点は今後精査が必要であるが、限られた地域の分析を行う際には、店舗兼住宅や、マンションの共用部の広さなどについて詳しい調査が行いやすくなるので、推算の精度を高めることができる。

表6 東京都住宅による1年間の1次エネルギー消費量の推算結果(TJ/年)

	独立住宅	集合住宅	合計
23区	140,419 35.0%	260,799 65.0%	401,217
多摩地区	115,211 56.4%	89,136 43.6%	204,347
合計	255,630 42.2%	349,935 57.8%	605,565

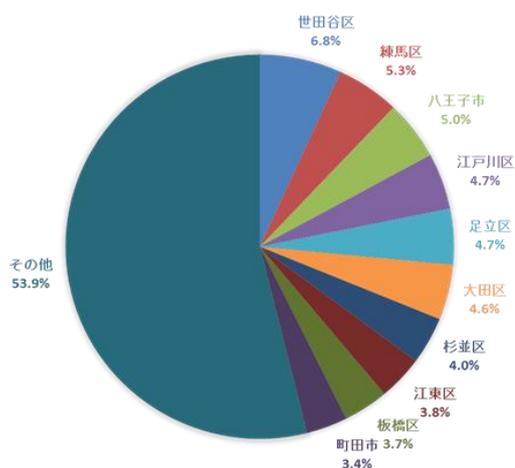


図4 東京都住宅による1年間の1次エネルギー消費量の地域別内訳

図4は東京都の家庭による1年間の1次エネルギー消費量60.6万TJの地域別内訳を示す。東京都全体の家庭のエネルギー消費のうち、世田谷区(6.8%)、練馬区(5.3%)、八王子市(5.0%)等の上位10市区の消費が約半分を占める。

5. まとめ

地域的な住宅用エネルギーマネジメント技術の普及促進の効果分析のために、対象地域の評価基準となる住宅におけるエネルギー消費データを作成するために、家庭 CO₂ 統計のマイクロデータを用いて、評価基準用住宅用エネルギー消費原単位を作成し、東京都を例に、住宅による 1 次エネルギー消費状況を市区町村別に集計した。

本研究ではまず、家庭 CO₂ 統計の、戸建て・集合別、住宅床面積 6 区分別のデータセットに対して、住宅による床面積当たり 1 次エネルギー消費原単位の対数値を被説明変数とする回帰分析を実施した。推定された回帰係数の統計的有意性はおおむね良好であったが、集合住宅の場合、建築時期の新しさがエネルギー消費原単位に負の影響をもたらすケースが確認された。

次に、対象地域に関する各説明変数の平均値と回帰係数を用いて、分析対象となる地域の住まい手の社会的属性を踏まえた 1 次エネルギー消費原単位を作成した。東京都各市区町村について推算された原単位は、同じ地域や住宅面積区分の全国平均と比較すると、総じて高めであった。そして各区町村間の原単位の違いはおもに、各地域の世帯人員数、世帯主年齢の平均値の違いを反映している。世帯人員数、世帯主年齢の平均値が高いほど原単位が大きい。世帯年収の平均値は各区町村間の原単位の違いよりも、東京都と他地域との違いを説明する要因と思われた。推定された原単位は、地域の住まい手の社会的属性を踏まえた値として妥当な相対関係を有しているものと思われた。

鷲津・中野¹⁰⁾で整理した「土地利用現況調査」からの東京都各市区町村別独立住宅および集合住宅の床面積の集計値に上記の原単位を乗じて、東京都各市区町村住宅による 1 次エネルギー消費量を推計した。その結果、東京都の住宅全体では 605,565 TJ のエネルギー消費があると推算された。これは総合エネルギー統計(2018 年度)における家庭の総エネルギー消費量全国値の 19.9%、中央地域における消費量の 31%に当たり、人口比に比べてやや過大であると思われる。東京都内の地域別では世田谷区(6.8%)、練馬区(5.3%)、八王子市(5.0%)などの消費構成比が高いことが示された。

家庭 CO₂ 統計のマイクロデータは、世帯別のエネルギー消費量/CO₂ 排出量を、その世帯要因とともに把握できる貴重なデータベースであり、住宅用エネルギーマネジメント技術の普及促進の効果分析等のために必要な評価基準用原単位を、統計的に推定できるということが可能になった。スマート社会技術を活用して快適さ水準をできるだけ落とすことなく高い省エネ目標を達成するための技術開発が近年目覚ましく進んでいるが、このデータベースによる知見を活用して、そのように開発された技術の普及政策に資する

研究を展開することが望まれる。本研究における推算結果に精度向上の余地は残されているものの、課題を克服してそのような研究展開を今後していきたい。本研究に残された課題としては、原単位の推算結果についての妥当性の検証、面積データとの接合方法の精緻化があげられる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(課題番号 19KT0037)、早稲田大学特定課題研究助成費(2020C-344)、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(2-2008)の下で実施した。本研究では、エネルギー・資源学会 家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査利用研究会 において利用が認められた平成 29 年度家庭 CO₂ 統計マイクロデータを用いた研究成果である。マイクロデータ利用にあたりご尽力くださった関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 篠崎 美貴, 中野 諭, 鷲津 明由 (2005)「持続可能な消費社会の検討: 1985-90-95 接続環境分析用産業連関表を用いた環境家計簿の要因分解」 産業連関 13(3), 40-51
- 2) 片山慎也, 永井俊行, 吉田彬, 天野嘉春 (2018)「2030 年を目指した標準住戸の需要規模が CO₂ 排出量最少となる住設機器構成に与える影響の分析」 エネルギー・資源学会論文誌 39(6), 19-28
- 3) 片山慎也, 吉田彬, 天野嘉春 (2020)「2030 年に向けた電力融通可能な集合住宅における最適機器構成の分析」 エネルギー・資源学会論文誌 41(1), 11-20
- 4) 森俊介 (2020)「地域の建物再構成と EV 化を含む低炭素街区のモデル化 一宇都宮市を例として」第 36 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 379-384
- 5) 環境省 (2017)「地方公共団体実行計画 (区域施策編) 策定・実施 マニュアル 算定手法編 Ver. 1.0」
- 6) 伊香賀俊治, 三浦秀一, 外岡 豊, 下田吉之, 小池万里, 深澤大樹, 水石 仁(2005)「住宅のエネルギー消費量と CO₂ 排出量の都道府県別マクロシミュレーション手法の開発」日本建築学会技術報告集 22, 253-268
- 7) 磐田 朋子, 桑沢 保夫, 村上 周三, 伊香賀 俊治 (2011)「民生家庭部門の低炭素化シナリオに関する研究」日本建築学会環境系論文集 76(667), 839-846
- 8) 田中昭雄 (2019)「住宅エネルギー消費構造の時系列変化」 エネルギー・資源学会論文誌 40(2), 21-27
- 9) 金森有子 (2017)「家庭部門における地域別エネルギー消費特性を考慮した二酸化炭素排出削減目標の達成可能性」土木学会論文集 G (環境) 73 (5), I_121-I_130
- 10) 松岡 綾子, 杉山 みなみ, 桃木 貴志, 山口 容平,

- 下田 吉之 (2019)「長期エネルギー需給見通しにおける家庭部門 CO₂ 排出削減見込み量の検証」日本建築学会環境系論文集 84(757), 323-333
- 11) Nakano, S., Washizu, A (2019) “In Which Time Slots Can People Save Power? An Analysis Using a Japanese Survey on Time Use,” Sustainability, 11(16), 4444, 1-19
- 12) 魏啓為, 秋元圭吾, 佐野史典, 本間隆嗣, 小田潤一郎 (2018)「生活時間消費の観点からみた□サービス需要の発生に対する一考察」第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 719-724
- 13) 魏啓為, 秋元圭吾 (2020)「日本における家庭の財・サービス需要: 公的統計マイクロデータを用いた現況の分析と生活行動の長期的な変化の検討」第 36 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 427-432
- 14) 石河 正寛, 松橋 啓介, 金森 有子, 有賀 敏典 (2018)「家庭 CO₂ 統計に基づく全国 10 地方別の排出要因分析と市町村別世帯あたり排出量の推計: 全国試験調査結果を用いて」土木学会論文集 G(環境)74 (6), II_193-II_201
- 15) 環境省 (2019)「平成 29 年度 家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査の概要 (確報値)」
- 16) 鷺津明由, 中野諭 (2018)「東京都の建築物による一次エネルギー消費データベースの作成」, 早稲田大学 先端社会科学研究所ワーキングペーパー, IASS WP 2017-J003,1-10
- 17) 鷺津明由, 中野諭 (2020)「環境省・平成 29 年度家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査による評価基準用住宅用エネルギー消費原単位の作成」, 早稲田大学 先端社会科学研究所ワーキングペーパー, 近刊
- (注)
- i) 資源エネルギー庁ウェブページ https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf. (アクセス日 2020.05.01)
- ii) 国土交通省「住宅・建築物の省エネルギー基準」<https://www.mlit.go.jp/common/000996591.pdf>. (アクセス日 2020.05.01)
- iii) 日本サステナブル建築協会「幸せなエコライフ」<http://www.jsbc.or.jp/document/files/ecolife.pdf>. (アクセス日 2020.05.01)
- iv) 土地利用現況調査では、独立住宅、集合住宅という用途区分で建物面積が把握できるが、加えて提供されている地上と地下の階数情報等を用いて、延べ床面積を推算することができる。鷺津、中野¹⁶⁾では東京都各市町村における建物の延べ床面積が用途別に集計されている。
- v) 総務省「人口推計」

単身・高齢者世帯地域別 CO₂ 排出原単位の経験ベイズ推定

Empirical Bayesian Estimates of CO₂ Emissions Intensity for Single and Elderly Households by Region

田中昭雄*
Akio Tanaka

Using data from the Survey of Actual CO₂ Emissions in the Household Sector conducted by the Ministry of the Environment, we estimated the CO₂ emission structure of single-person households and married couple households. The data for analysis were resampled using the bootstrap method. The statistical model used allowed for the hierarchy of the model to be taken into account. This study also analyzed the level and lifestyle effects in the hierarchy. Here, hierarchies are defined as age, city size, housing type, and housing electrification status. The results also reveal the rate of energy-saving behavior and the impact of the introduction of air-conditioning for pets, insulated openings, and Eco-Cute systems on CO₂ emissions. In this study also showed that the empirical Bayesian estimation is valid even in areas where the number of collected samples is small.

Keywords: Empirical Bayes, Low Birthrate and Longevity, Small Area Estimation

1. はじめに

環境省は、「家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査」（以下「家庭 CO₂ 調査」）を 2015 年度までに試験調査が 2 回実施され、2017 年度から本格調査を開始した。この調査は、現時点で我が国の家庭部門 CO₂ 排出実態を知る上で最も貴重なデータの 1 つとなっているが、回収率に地域性や世帯属性などによる粗密があり、標本数が少ない地域（小地域）での利用は、統計値の信頼性が低いなどが指摘されている。この問題は、古くから多くの統計調査で「小地域問題」¹⁾と知られている問題である。

筆者は本調査以前から、家庭部門の地域別世帯属性別 CO₂ 排出量やエネルギー消費量を分析する目的で、総務省「家計調査」²⁾や、東京都「とみんな暮らしむき」³⁾を分析している。最近の研究⁴⁾では、戦後一貫して増加を続けてきたエネルギー消費原単位や CO₂ 排出原単位が、1996 年をピークに減少傾向にあること（**図 1**）を示した。

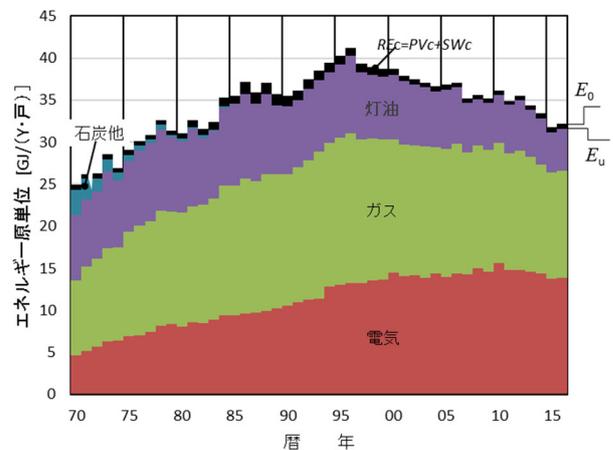


図 1 総エネルギー原単位 E_0^{FB} と熱源構成（総務省「家計調査」から）

しかし減少していない属性として、単身世帯があること、高齢化が近年では原単位を高める一因になっていることを示した（**図 2**）。

しかし「家計調査」では、単身者や高齢者のライフスタイル等の情報が得られない事、地域情報が不足していることから、その原因について明らかにすることはできなかった。

* 熊本県立大学環境共生学部居住環境学専攻教授
〒862-8502 熊本県熊本市東区月出 3-1-100
e-mail: a-tanaka@pu-kumamoto.ac.jp

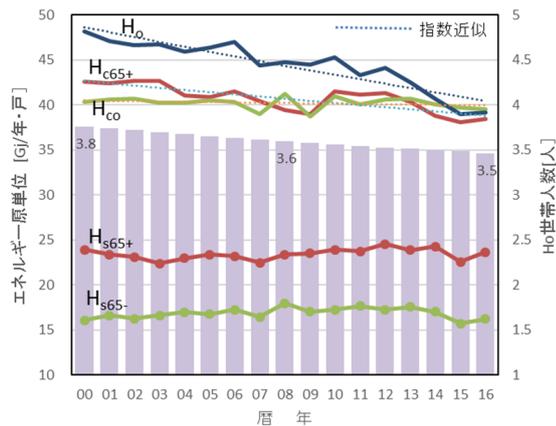


図2 世帯類型別エネルギー原単位 E_0 の変化 (総務省「家計調査」より推計)
 H_{s65+} : 単身_高齢, H_{s65-} : 単身_若中年
 H_{c65+} : 夫婦_高齢, H_{c0} : 夫婦_若中年



図3 世帯類型別住宅内 CO_2 排出エネルギー原単位 (総務省「家計調査」より推計)

図3は、家計調査からみた世帯類型別 CO_2 原単位であるが、個表データが開示されていないため、この結果の要因分析の内容は限定される。

2015年現在、単身世帯は全世帯の34.5%、65才以上の人口は27%を占める。今後益々単身世帯の増加や高齢化が進めば、約25年間減少してきた家庭の CO_2 原単位も再び増加傾向に転じさせることが予想される。

一方「家庭 CO_2 調査」はライフスタイルも含めた詳細な情報が得られるが、速報性がないこと、小地域問題を抱えているなどの問題がある。今後は両調査を補間的に用いて、家庭部門の CO_2 削減のためのPDCAサイクルを効率的に実現していく必要がある。

そこで、今回は「家庭 CO_2 調査」における小地域問題を解決する手法として、リサンプリングした標本データから、 CO_2 排出量原単位の階層性のある線形混合統計モデル (Hierarchical Linear Mixed Statistical Models ; HLMS) を構築し、ライフスタイルとの関係を明らかにするとともに経験ベイズ法により、小地域問題を解消する統計データ処理法について検討を行う。

2. 研究手法

「家庭 CO_2 調査」は毎回全国約1万件の被験者データを収集するが、地域性や世帯属性、住宅特性、気象特性など様々な階層性を考慮できる網羅的なデータにするためには、この数でも不十分である。

そこで本研究では、回収データをリサンプリングし増幅して用いる統計的手法と、階層性を考慮した統計モデルを提案するとともに、そのモデルと経験ベイズ法を用いた小地域の統計データを高精度に再推定する手法を検討する。

2.1 CO_2 排出原単位の階層性のある線形混合モデル

住宅の温室効果ガス排出量 G を、次式 (1) の階層性のある線形混合モデル (Hierarchical Linear Mixed Models ; HLMM) で考える。

$$G = \bar{G} \prod k_{i,l} + \sum k_j x_j + \varepsilon \quad (1)$$

ここで \bar{G} : 温室効果ガス排出原単位の平均, $k_{i,l}$ は階層構造を持つ CO_2 排出量の係数である。ここで i は階層, l はその水準である (分散分析における因子と水準の関係に相当)。この階層は G の最も影響力の大きな要因であるが、社会基盤的な要素も多く、個人が短期間で変更することは困難な要素である。また階層構造を持つことで各階層間の交互作用効果がこの式中に包含することができる。各水準の係数は (2) 式で求める。

$$k_{i,l} = \overline{G_{i,l}} / \bar{G} \quad (2)$$

次の k_j も、 G の説明変数であるが、行動変容などが容易で相対的に影響が小さい要素で、ライフスタイル係数 (影響量は小さいがライフスタイルに依存する要素) と記す。

x_j は平均値からの差分量を用いることが多いが、絶対量や、1,0を用いる変数とする。εは地域特性やそのサンプル特性を反映した値である。

統計モデル作成は、(1)式の右式第一項は、交互作用の無い多元配置分散分析法⁵⁾により求めたのち、同第2項の残渣部分を線形回帰分析により求める。

2.2 リサンプリング法による分析データの作成

今回分析に用いるデータは、試験調査（対象期間：2014年10月～2015年9月対象、n=11,633）と、H29年調査（対象期間：2017年4月～2018年3月、n=9,506）の2調査である。このうち単身世帯3932世帯、夫婦のみ世帯4116世帯を抽出した混合データである。

これら標本は、階層毎、水準毎に標本数に、粗密があるため、単純な統計解析では、標本数の粗密が悪影響を及ぼす。そこで各階層のサンプル数、水準のサンプル数が同一になる様に、標本群から繰り返しを許す無作為抽出を行うことで、単身世帯、夫婦世帯ともに9000件のデータ標本群を作成した。この抽出法はブートストラップ法に準じている⁵⁾。

2.3 経験ベイズ法による小地域データの推定法

小地域データの推定には、(1)式の統計モデルによる推定値とその誤差分布を用いて、経験ベイズ法⁶⁾により行う。

2.4 CO2換算値等

CO2排出量のエネルギー需要からの換算において、電気については電力会社別では無く、電気1kWh = 0.3765kg-CO₂で統一する。またここでは「中核都市」とは、都道府県庁所在都市および政令指定都市のことである。

3. CO2排出原単位の統計解析

3.1 統計モデルの作成

表1に階層とその水準の標本数を均一にしたリサンプルデータのエネルギー用途別CO₂原単位を示す。

ここで階層とは、家族構成、構成員の年代、居住住宅の種類、地域の都市規模、使用エネルギー源である。リサンプリングデータでは、住宅内からのCO₂排出量は単身世帯では約1.8T、夫婦世帯からはその1.6倍の約2.9T-CO₂/年である。自動車からは、単身世帯が約1.2T-CO₂/年、夫婦世帯がその1.4倍の1.7T-CO₂/年である。

表2は、単身世帯と夫婦のみ世帯について、エネルギー用途別に階層構造とその水準別の係数を示す。年齢階層では、ほとんどのエネルギー用途で、高齢者が高い係数を示すが、単身世帯では、冷房と自動車で、夫婦のみ世帯では、給湯と自動車で若中年世帯が大きな値を示す。住宅種

表1 リサンプルデータの用途別CO₂原単位

[単位:T-CO₂/年・世帯]

世帯	住宅内						自動車
	合計	給湯	暖房	冷房	厨房	照明・他	
単身	1.783	0.365	0.403	0.050	0.052	0.913	1.245
夫婦のみ	2.910	0.735	0.699	0.076	0.082	1.319	1.696

表2 階層構造基盤係数

[単身世帯]		係数(水準平均/リサンプルデータ平均)						
要因	水準	住宅合計	給湯	暖房	冷房	厨房	照明・他	自動車**
年齢	1. 高齢	1.11	1.00	1.12	0.98	1.02	1.09	0.74
	2. 若中年	0.91	1.00	0.90	1.01	0.98	0.93	1.16
住宅	1. 戸建住宅	1.28	1.19	1.44	1.04	0.96	1.27	—
	2. 集合住宅	0.74	0.83	0.60	0.96	1.04	0.76	—
都市規模	1. 中核都市*	0.93	0.85	0.78	0.99	1.01	0.91	0.84
	2. 5万人以上	0.98	1.03	1.00	1.11	0.98	0.98	0.99
	3. その他都市	1.09	1.12	1.22	0.90	1.01	1.11	1.10
電化	1. 全電化	0.90	0.66	0.87	0.99	1.18	0.85	—
	2. 非全電化	1.10	1.39	1.15	1.01	0.79	1.17	—

[夫婦のみ世帯]		係数(水準平均/リサンプルデータ平均)						
要因	水準	住宅合計	給湯	暖房	冷房	厨房	照明・他	自動車**
年齢	1. 高齢	1.11	0.95	1.04	1.19	1.04	1.07	0.85
	2. 若中年	0.92	1.04	0.97	0.84	0.97	0.95	1.12
住宅	1. 戸建住宅	1.14	0.97	1.25	1.07	1.00	1.07	—
	2. 集合住宅	0.82	1.05	0.58	0.88	1.00	0.88	—
都市規模	1. 中核都市*	0.97	0.90	0.94	1.14	0.98	0.91	0.93
	2. 5万人以上	1.00	0.89	0.91	0.91	1.02	0.98	0.97
	3. その他都市	1.03	1.26	1.19	0.94	1.01	1.14	1.09
電化	1. 全電化	0.95	0.69	0.88	0.83	1.10	0.85	—
	2. 非全電化	1.05	1.34	1.13	1.19	0.89	1.17	—

*中核都市：都道府県所在都市及び政令指定都市

** 車所有者のみ

階層では戸建住宅が集合住宅より大きな係数を持つ。都市規模階層では、都市規模が小さいほど係数が大きくなる。電化階層では、全電化住宅のCO₂排出量が非全電化住宅よりも約10%小さくなるが、この関係は電気のCO₂排出係数によって簡単に逆転するので絶対的なものではない。

自動車の同係数は、年齢階層では若中年世帯が、都市規模階層では小規模住宅の係数が大きい値を示した。

図3、図4に階層構造から予測される単身世帯と夫婦世帯のCO₂原単位が最大となる水準組み合わせを示す。

住宅内のCO₂排出量では、夫婦のみ世帯の場合、高齢、戸建住宅、その他都市、非全電化住宅に住む場合のCO₂排出量は3.94T-CO₂/年が排出量最大となる組み合わせで、最小組み合わせの若中年夫婦のみ世帯（集合住宅、中核都市、全電化住宅）2.01T-CO₂/年の約2倍の開きがある。

単身世帯の場合は、最大と最小では3.04T-CO₂/年と1.0T-CO₂/年と3倍の開きとなる。またこの図は、単身世帯でも、夫婦世帯よりもCO₂排出量が大きくなる生活スタイルがあることを示している。

自動車利用は、夫婦のみ世帯では、若中年、その他都市に住む世帯がCO₂排出量2.06T-CO₂/年と最大で、最少は高齢な、中核都市生活者である。単身世帯では、最大が若中年、その他都市の1.59T-CO₂/年、最小が高齢、中核都市の0.77T-CO₂/年である。

表3にエネルギー用途別にCO₂排出量への影響が特徴的な変数のライフスタイル係数と各用途平均排出量との比較を示す。社会基盤係数で、CO₂排出量の平均像を求めているので、同係数では平均像からの差異等を変数値は再定義した値に対する効果である。**表4**はそのなかでも特徴的なライフスタイルや省エネ設備の効果が確認された要因について、効果を示したものである。省エネ行動実施率とCO₂排出量との効果は、同行動が10%上昇すると、夫婦世帯では、照明・他のCO₂排出量が年間-11kg減少し、冷房も-2kg、自動車では-20kg減少するが、平均的な需要を-1%~-3%と減少させる程度である。しかしペット冷房実施世帯は、単身世帯で冷房需要が+40%、夫婦世帯で+59%となっていた。二重サッシ・複層窓を全面に設けた受託では、単層窓の住宅より暖房や冷房用CO₂が-2~-7%であるが有意に減少していた。またエコキュート利用世帯では、給湯用CO₂が通常の給湯装置の世帯に比べ-50%以上削減されていた。

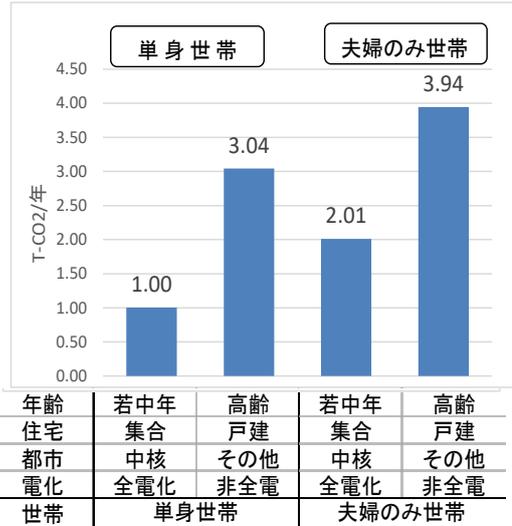


図3 住宅CO₂原単位の4階層と水準効果

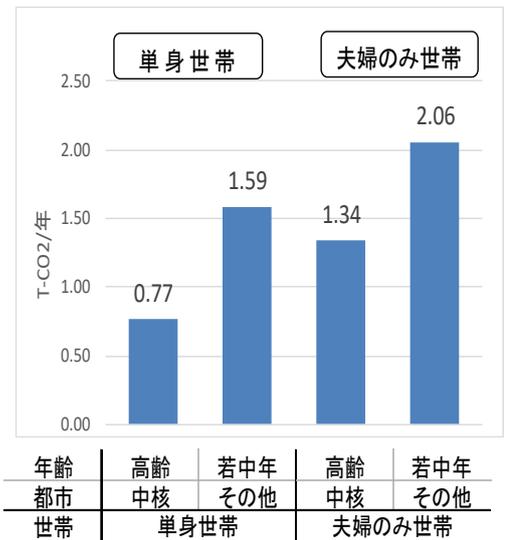


図4 自家用車CO₂原単位の2階層と水準効果

表3 ライフスタイル係数

◎ 単身, 夫婦世帯共に有効 ○ 夫婦世帯のみ ☆ 単身世帯のみ

	平均気温	冷房度日	暖房度日	年収	屋在宅状況	住宅建築時期	住宅延床面積	居室数	断熱窓	PV自家消費	太陽熱温水器	中央暖房	主暖房使用H	主冷房使用H	ペット用冷房	エコキュート	エネファーム	冬風呂湯張	夏風呂湯張	主TV時間	省エネ実施率
	*1	*1	*1	*2	*5	*5	*2	*2	*5	*3	*4	*4	*1	*1	*4	*4	*4	*1	*1	*1	*1
住宅内エネルギー	○	-	◎	◎	☆	-	◎	-	○	◎	◎	◎	-	-	-	-	☆	○	◎	◎	-
給湯	◎	-	-	○	◎	-	-	-	-	-	◎	-	-	-	-	◎	-	◎	◎	-	-
暖房	☆	-	○	◎	◎	○	○	-	○	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	○	○
冷房	-	◎	-	◎	○	☆	◎	○	◎	-	-	-	◎	◎	-	-	-	-	-	○	○
照明・その他	☆	-	-	◎	☆	☆	○	◎	-	◎	-	-	◎	-	-	-	-	-	-	◎	○
自動車	○	-	-	◎	◎	-	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○

*1 平均からの差分量 *2 平均からの差分量(単身, 夫婦世帯別) *3 絶対量 *4 該当1, 非該当0 *5 カテゴリーの順位付値

表4 ライフスタイル変数の効果

[上段:kg-CO ₂ /年, 下段:平均値からの変化率]								
	省エネ行動		ペット用冷房		二重サッシ・複層窓効果		エコキュート	
	単身	夫婦	単身	夫婦	単身	夫婦	単身	夫婦
照明・他	-	△ 11 -1%	-	-	-	-	-	-
給湯	-	-	-	-	-	-	△ 240 -66%	△ 400 -54%
暖房	-	-	-	-	-	△ 47 -7%	-	-
冷房	-	△ 2 -3%	20 40%	45 59%	△ 16 -4%	△ 15 -2%	-	-
自動車	-	△ 20 -1%	-	-	-	-	-	-
備考	省エネ行動実施率50%より10%UPLした場合				全面二重サッシ・複層窓の効果			

4. 小地域原単位の経験ベイズ推定

図5に単身世帯と、夫婦世帯の都道府県別CO₂排出原単位を示す。県によってはサンプル数が10以下の地域も多数あり平均値が安定していない。しかしこの結果と(1)式の線形混合統計モデルの推計値とその誤差分布から推定した経験ベイズ推定値を図6に示す。推計値はこの手法により安定した推定値が得られる様になる事が確認できる。

5 まとめ

環境省「家庭部門のCO₂排出実態統計調査」(平成24年度,平成29年度)結果を活用し,小地域単身世帯,夫婦のみ世帯のCO₂排出量を推定するため階層性のある線形混合モデル(Hierarchical Linear Mixed Models; HLMM)による分析を行った。

HLMMによる統計モデル作成に当たっては,回収データをそのまま使用するのではなくブートストラップ法に準じたりサンプリング法を用いることで,分析精度を高めるとともに,CO₂原単位の発生原因を4階層とその水準別効果を明らかにした。またライフスタイルに関わる様々な要因についても分析を行った。これにより,年齢や都市規模,住宅種類や全電化の有無などの階層と水準の相違によるCO₂排出量が明らかになっただけでなく,省エネ行動実施率やペット冷房実施や,開口部の二重サッシ化複層窓化,エコキュートなどの導入効果が明らかにした。また,本統計データも抱える「小地域問題」に,階層性のある線形混合統計モデルと経験ベイズ推定が有益である事を示した。

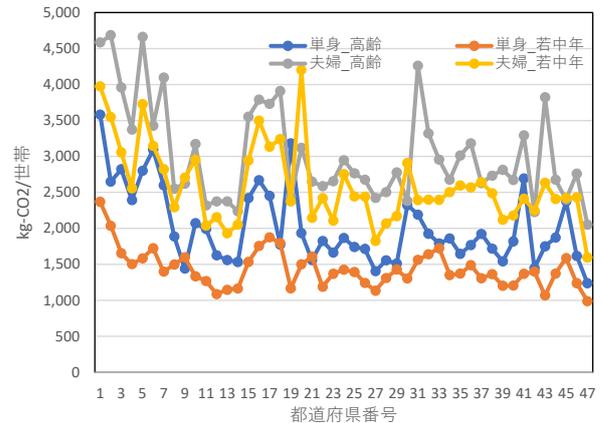


図5 地域別住宅CO₂原単位(単純集計値)

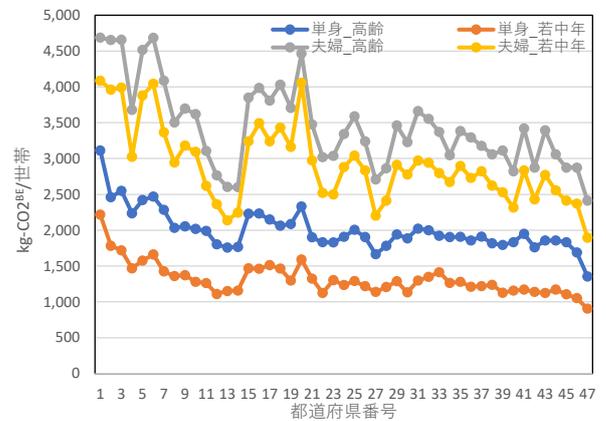


図6 地域別住宅CO₂原単位(経験ベイズ推定値)

謝辞

本研究実施に当たり,貴重な情報を提供いただいた環境省地球環境局総務課低炭素社会推進室様,家庭部門のCO₂排出実態統計調査利用研究会事務局の運営にご尽力いただいた一般社団法人 エネルギー・資源学会様に,謝意を申し上げます。

参考文献

- 久保川達也;線形混合モデルと小地域の推定,応用統計学, Voi. 35, No. 3, pp. 1-24, 2006
- 総務省統計局:家計調査月報, 1970-2020. 48
- 東京都:都民のくらしむき;2000-2018,
<http://www.toukei.metro.tokyo.jp/seikei/sb-index.htm>, (アクセス日 2020. 6. 1)
- 田中昭雄:住宅エネルギー消費構造の時系列変化, エネルギー・資源学会論文誌, Vo140, No2, No. 234, pp. 21-27, 2019. 3

- 5) 汪金芳 他：ブートストラップ法—最近までの発展と今後の展望—, 行動計量学, Vol.19, No.2, pp.50-81, 1992
- 6) 鷺尾泰俊：実験の計画と解析, 岩波書店(1988), pp.253
- 7) 田中昭雄, 外岡豊, 市町村別住宅エネルギー消費原単位の推定—住宅の環境負荷とその地域性に関する研究その1—, 日本建築学会環境系論文集, 79-3, 2014, pp. 305-312.

家庭エネルギー需要と CO₂ 排出実態の基礎分析

Fundamental Analysis on Domestic Energy Consumptions and CO₂ Emissions in Japan

山崎 政人*・外岡 豊**

Tonooka Yutaka Masato Yamazaki

We conducted a fundamental analysis on domestic energy consumptions and CO₂ emissions in Japan (Survey data). As a result of the comparison with the estimated data by The Institute of Energy Economics, Japan / The Energy Data and Modelling Center (EDMC), the Survey data is a little smaller though the difference is only a little, though regarding City Gas and Hot Water use, the Survey data is a little larger. The categories of house and family unit with large energy consumption per household are cold district, detached house, rural area, large family, home with aged person, home of old building year, and so on. The factors are associated with each other, and we are planning to study the structure of energy consumption.

Keywords : Household-sector, Energy consumption, CO₂ emission, Global warming

1. はじめに

日本では気候変動対策を自治体（市区町村）行政施策で推進することになっているが、自治体行政で削減可能な対策対象として家庭部門が最たるものである。そこで効果的な削減対策を検討するにあたり、環境省では家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査（家庭 CO₂ 統計）を用いて家庭部門における温室効果ガス排出実態を的確に分析することがその出発点になる。まずは基礎分析として排出構造について多要因から定量的に解析した。

2. 方法

データには、環境省の家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査（平成 29 年度）を用いた。調査は、調査員調査と IM 調査（インターネット・モニター調査）の 2 つの方法が用いられ、それらを合わせた結果が示されている。ここでは年間二次エネルギー消費量原単位（GJ/世帯・年）をベースとする。

3. 結果

3.1 有効回収数

本調査の有効回収数を表 1 に示す。

表 1 有効回収数

	調査員調査	IM調査	計
北海道	422	416	838
東北	461	440	901
関東甲信	794	816	1,610
北陸	448	405	853
東海	500	469	969
近畿	582	539	1,121
中国	421	425	846
四国	393	396	789
九州	467	479	946
沖縄	381	251	632
	4,869	4,636	9,505

3.2 EDMC データとの比較

本調査結果と EDMC（日本エネルギー経済研究所）¹⁾の比較について、エネルギー種別原単位を図 1 に、用途別原単位を図 2 に示す。エネルギー種別原単位について、EDMC は石炭等（石炭、練豆炭、薪、木炭、熱、その他の合計）や太陽熱も対象としているが、図では除いている。また、用途別原単位については、推計値とされている。以降では、エネルギー種別を対象とする。いずれも、EDMC の方がやや大きい。エネルギー種別では都市ガスが、用途別では給湯が環境省調査の方が大きい。

3.3 属性別データの分析

原単位の大小は多くの要因が関連しているが、ここでは属性別の単純集計結果より基本的な傾向を分析した。

*関西ビジネスインフォメーション研究員
〒530-0005 大阪市北区中之島 3-2-18 住友中之島ビル
E-mail: masato-yamazaki@kbinfo.co.jp

**埼玉大学名誉教授（元大学院人文社会科学研究所 教授）
〒251-0027 神奈川県藤沢市鶴沼桜が岡 1-6-11

(1) 地域別

地域別集計結果を図3に示す。寒冷地ほど、原単位が大きい。特に、灯油の大きさが寄与している。

(2) 建て方別

建て方別集計結果を図4に示す。戸建は41GJ/世帯・年と、集合の24GJ/世帯・年に対して約1.7倍となっている。

(3) 都市階級別

次の都市階級別集計結果を図5に示す。都市階級が①②③の順に大きく、都市部よりも地方部ほど原単位は大きくなっている。

- ①都道府県庁所在市（東京都は区部）及び政令指定都市
- ②人口5万人以上の市
- ③人口5万人未満の市及び町村

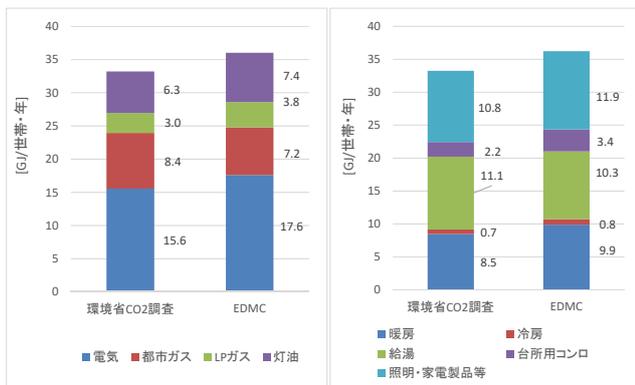


図1 エネルギー種類の比較 図2 用途別原単位の比較

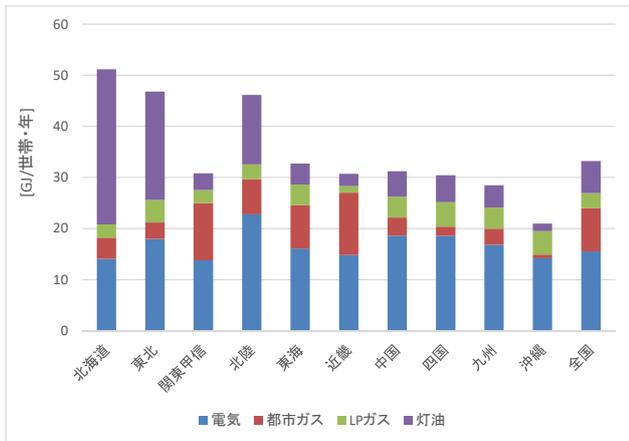


図3 地域エネルギー種別エネルギー消費原単位

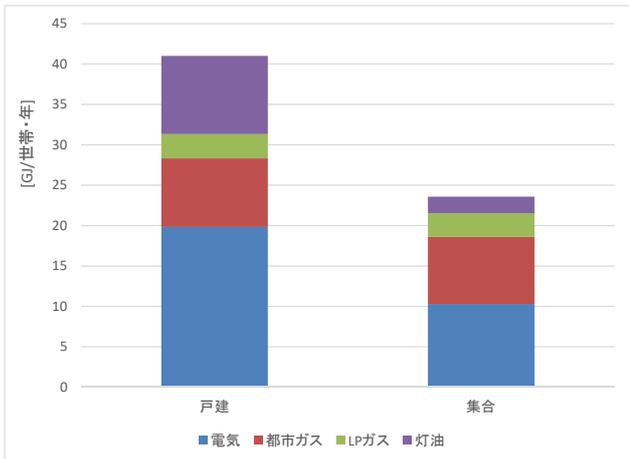


図4 建て方別エネルギー消費原単位

ここで、都市階級別・建て方別の構成比を図6に示す。都市部よりも地方部での原単位の大きさの要因の一つとしては、地方部の方が戸建が多いことも考えられる。

(4) 省エネ基準地域区分別

省エネ基準地域区分別集計結果を図7に示す。地域別と同様、寒冷地ほど原単位が大きい。

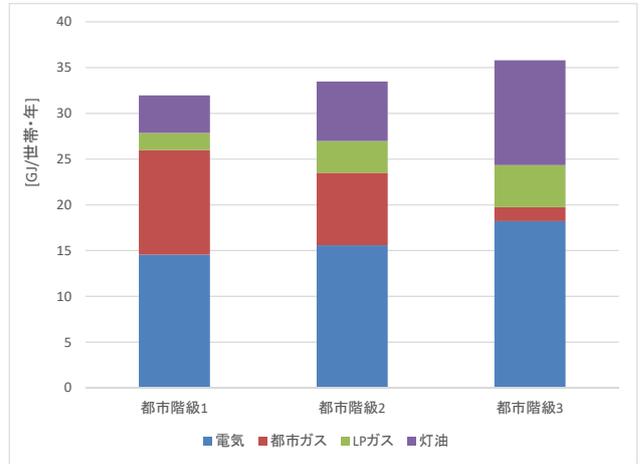


図5 都市階級別エネルギー消費原単位

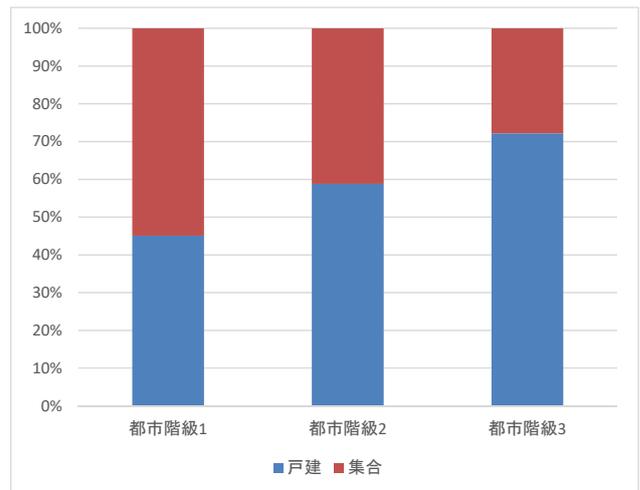


図6 都市階級別・建て方別構成比

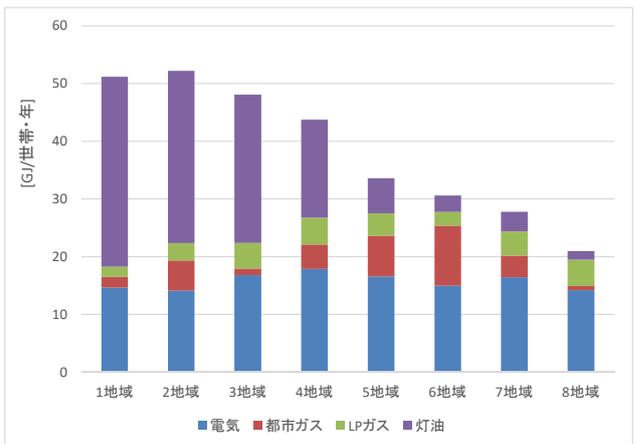


図7 省エネ基準地域区分別エネルギー消費原単位

(5) 世帯類型別・世帯人数別・高齢者の有無別

世帯類型別（8区分）集計結果を図8に、世帯人数別（6区分）集計結果を図9に、高齢者（65歳以上）の有無別集計結果を図10に示す。家族構成員が大きいほど、原単位は大きい。同一の構成人員でも高齢者がいると、原単位が大きい傾向がある。

(6) 就業者の有無別

就業者の有無別集計結果を図11に示す。就業者がいる方が原単位が大きい。

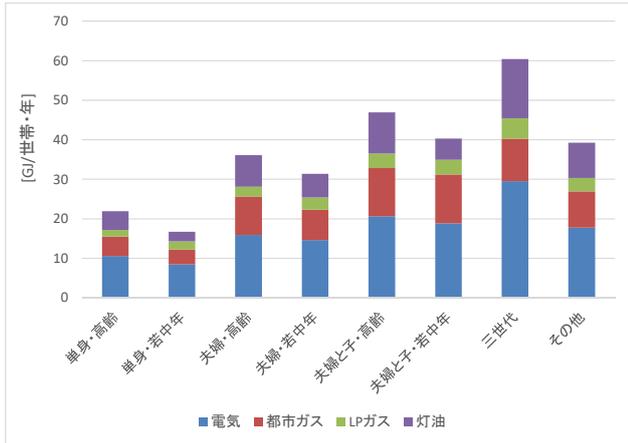


図8 世帯類型別（8区分）エネルギー消費原単位

(7) 世帯主年齢別

世帯主年齢別集計結果を図12に示す。世帯主の年齢が高いほど、原単位が大きい。

(8) 平日昼間の在宅者の有無別

平日昼間の在宅者の有無別集計結果を図13に示す。平日昼間の在宅者がいる方が原単位が大きい。専業主婦、未就学乳幼児、在宅高齢者の在宅によるエネルギー消費が考えられる。

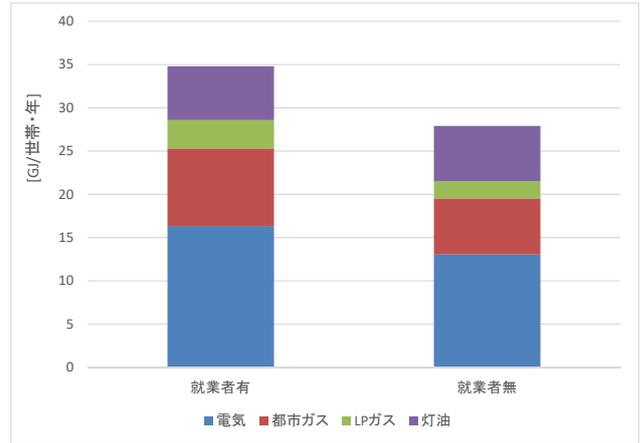


図11 就業者の有無別エネルギー消費原単位

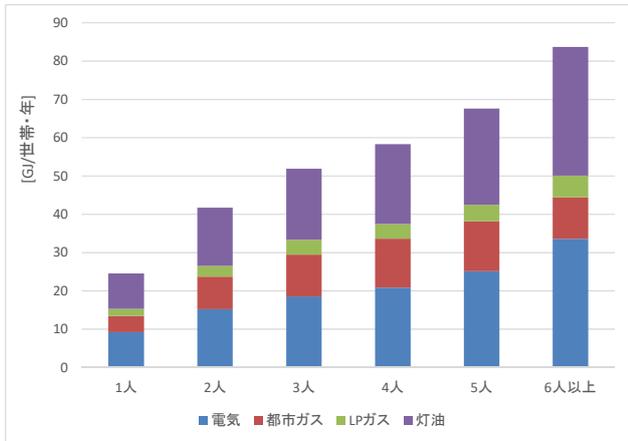


図9 世帯人数別（6区分）エネルギー消費原単位

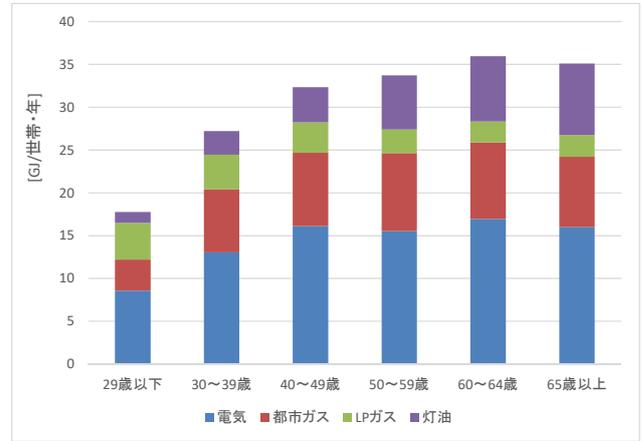


図12 世帯主年齢別エネルギー消費原単位

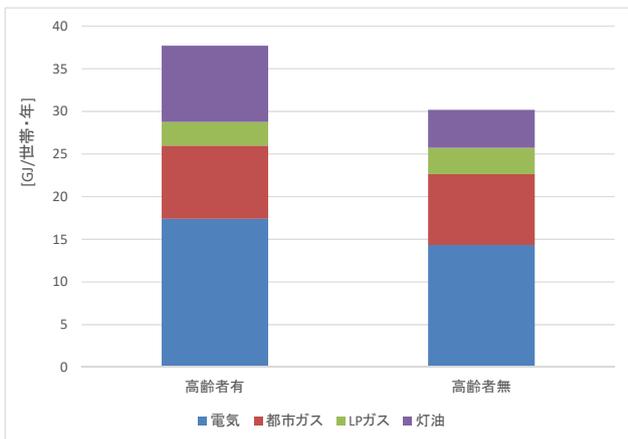


図10 高齢者（65歳以上）の有無別エネルギー消費原単位

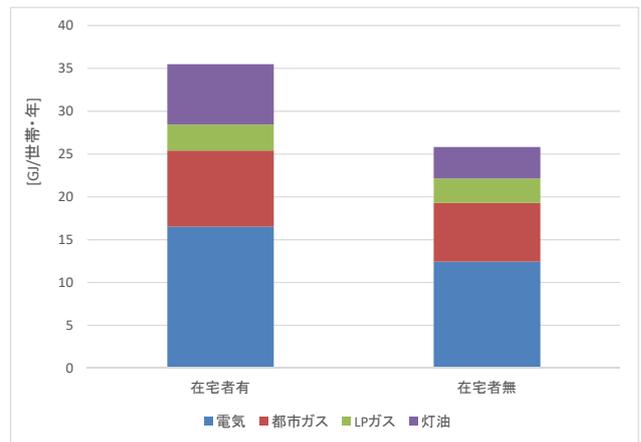


図13 平日昼間の在宅者の有無別エネルギー消費原単位

(9) 年間世帯収入別(7区分)

年間世帯収入別(7区分)集計結果を図14に示す。年間世帯収入が多いほど、原単位が大きい。世帯主年齢が高いほど、原単位が多かったが、世帯主年齢が高いほど世帯収入が高いことも考えられる。

(10) 建築時期別

建築時期別集計結果を図15に示す。建築時期が2000年以前はさほど差はないが、2000年以降は新しい建築ほど、原単位が小さい。この間の新築への省エネルギー規制強化が有効であったと考えられる。

(11) 住宅の所有関係別

以下の住宅の所有関係別集計結果を図16に示す。

- ①持ち家・分譲：持ち家・分譲（住宅、マンション）
- ②民営の賃貸住宅
- ③公営・公社等：公営、公社または都市再生機構の賃貸住宅
- ④給与住宅：社宅、公務員住宅など

持ち家・分譲がもっとも大きい。賃貸住宅間では、給与住宅の原単位が大きい。家族構成の傾向や建物仕様による影響などが関連しているとい考えられる。

(12) 住宅の延床面積別・居室数別（全体の部屋）

住宅の延床面積別集計結果を図17に、居室数別（全体の部屋）別集計結果を図18に示す。延床面積が大きいほど、居室数が多いほど、原単位が大きい。また、居室数が多いほど、居室数が多いほど、原単位が大きい。

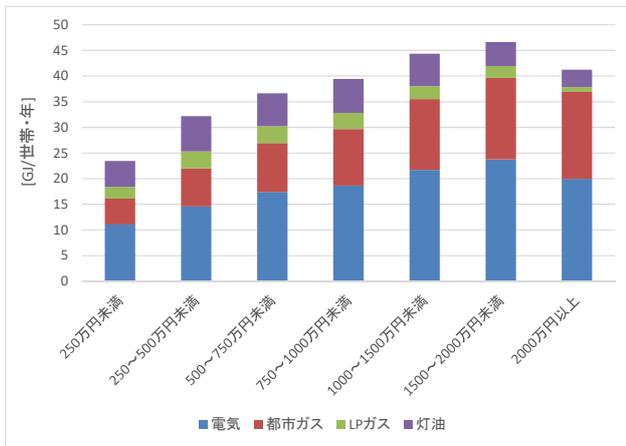


図14 年間世帯収入別(7区分)エネルギー消費原単位

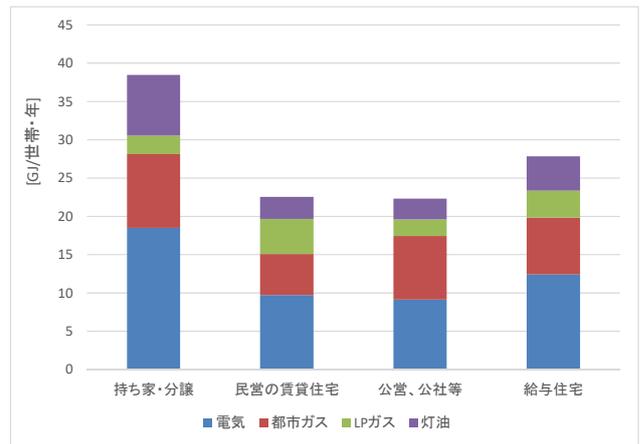


図16 住宅の所有関係別エネルギー消費原単位

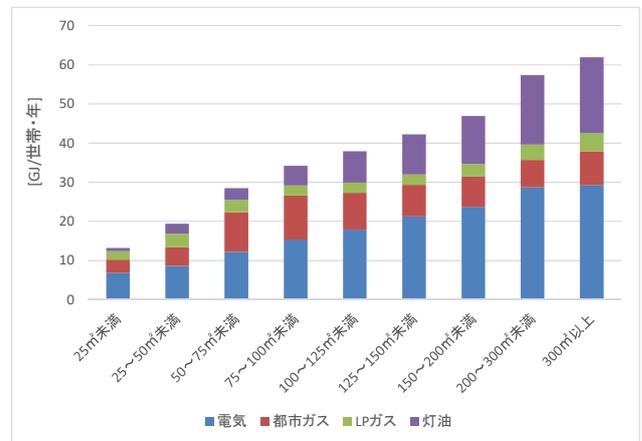


図17 住宅の延床面積別エネルギー消費原単位

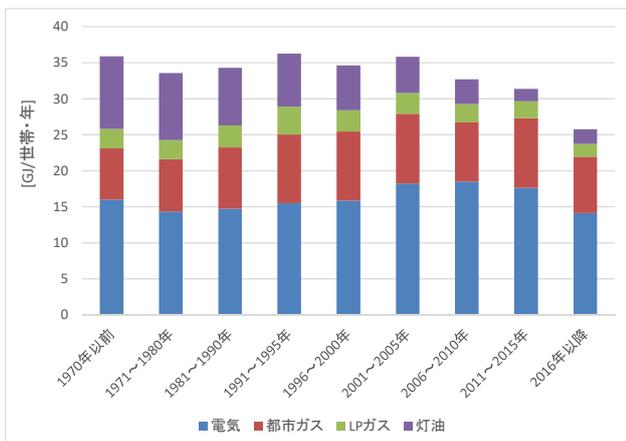


図15 建築時期別エネルギー消費原単位

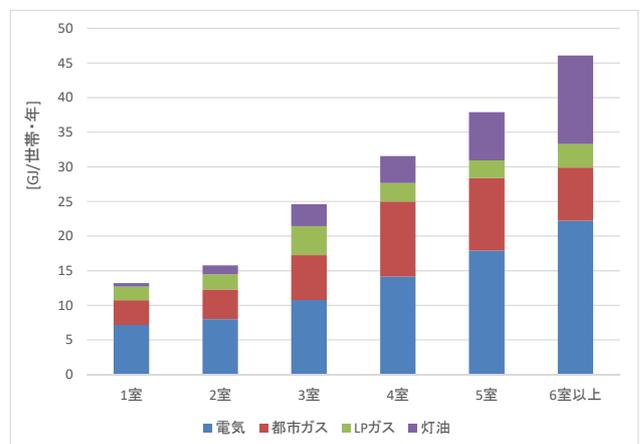


図18 居室数別エネルギー消費原単位

(13) 二重サッシまたは複層ガラスの有無別

二重サッシまたは複層ガラスの有無別集計結果を図 19 に示す。二重サッシまたは複層ガラスの有無による差は小さいが、地域によって効果が異なると考えられる。

(14) 太陽光発電の使用有無別

太陽光発電の使用有無別集計結果を図 20 に示す。太陽光発電の有無による差は見られないが、太陽光発電がある方が電気の比率が大きく、全電化または電気使用機器の割合が大きい可能性がある。

(15) 家庭用エネルギー管理システム導入の有無別

家庭用エネルギー管理システム（HEMS）導入の有無別集計結果を図 21 に示す。HEMS を導入している住宅の方が原単位が大きい。一般に、HEMS を導入している方が省エネ意識が高いと考えられるが、他の要因も含めて分析する必要がある。

(16) 電気自動車の使用有無別

電気自動車の使用有無別集計結果を図 22 に示す。電気自動車を使用している方が原単位が大きい。

(17) 家庭で使用しているエネルギー種別

家庭で使用しているエネルギー種別集計結果を図 23 に示す。灯油を使用している方が原単位が大きい。寒冷地ではと灯油を使用している住宅が多いことが考えられる。

4. まとめ

環境省の家庭用の CO2 排出実態統計調査（平成 29 年度）より、属性別の世帯あたりエネルギー消費量原単位を分析した。今回は、単純集計結果より、一次的な分析を行い、おおまかな傾向を把握した。今回の結果を踏まえ、多変数要因による家庭用のエネルギー消費構造について分析していく。

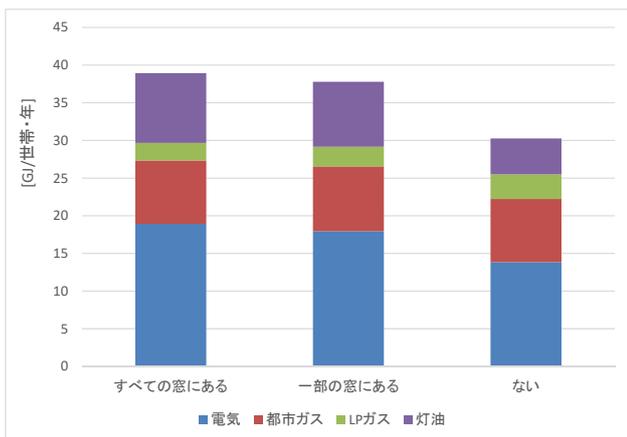


図 19 二重サッシまたは複層ガラスの有無別エネルギー消費原単位

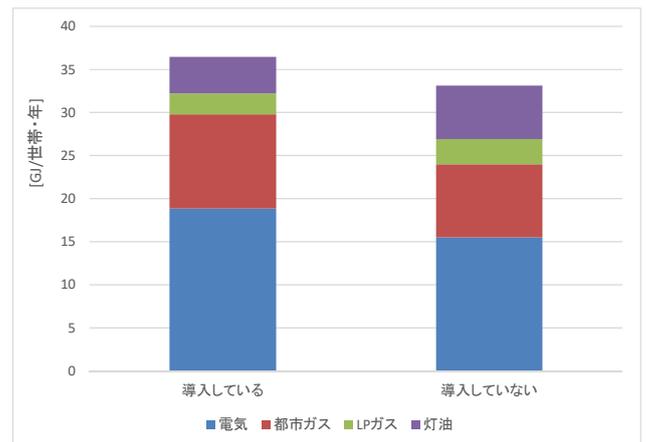


図 21 HEMS 導入の有無別エネルギー消費原単位

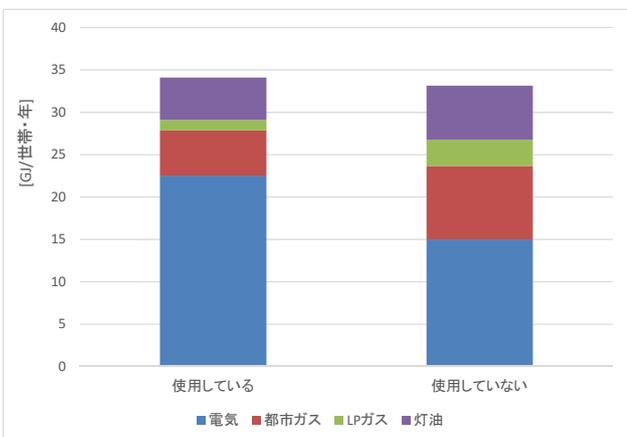


図 20 太陽光発電の使用有無別エネルギー消費原単位

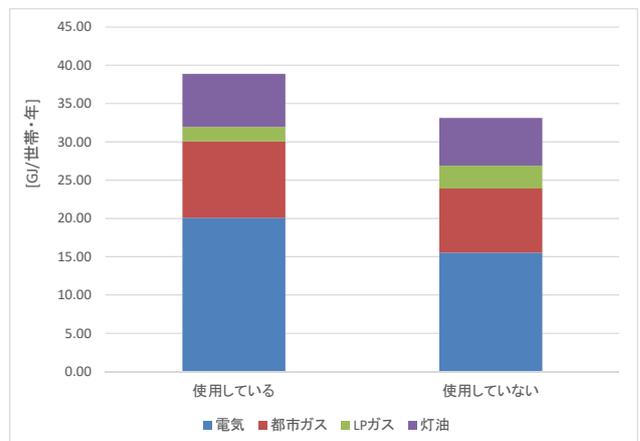


図 22 電気自動車の使用有無別エネルギー消費原単位

参考文献

- 1) 一般社団法人日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット; エネルギー・経済統計要覧 2019年版, (2019).
- 2) 環境省; 家庭部門のCO₂排出実態統計調査, <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html> (アクセス日 2020.6.1)

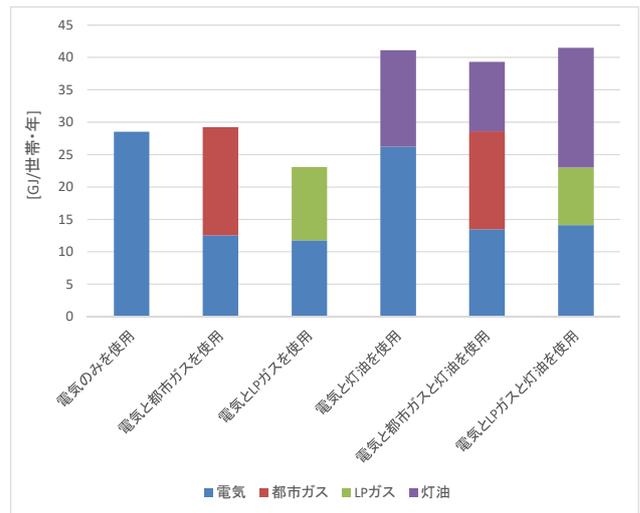


図 23 家庭で使用しているエネルギー種別エネルギー消費原単位

家庭 CO2 統計に基づく CO2 排出要因による世帯類型化

Classification of Household by CO₂ Emission Factors

新 富 凌 汰 *・大 竹 宏 明 *・井 上 裕 史 **
Ryota Shintomi Hiroaki Otake Yushi Inoue

This paper presents the results of clustering households by factors that have a large impact on CO₂ emissions. We clustered the household information that can be grasped from the household CO₂ statistics into nine by the k-means++ method, which is a non-hierarchical classification method. As a result of clustering, we obtained clusters with different features such as how to build, where to live and how to install equipment. Comparing the annual CO₂ emissions per household in each cluster, the CO₂ emissions of the multiple dwelling house were the smallest. On the other hand, those in cold districts were the largest, and those in all-electric homes were also the next largest. Especially for the three clusters (cold district households, all-electric homes, large-scale detached houses) that emit large amounts of CO₂, we also considered measures to reduce emissions for each cluster.

Keywords :CO₂ emissions, Residential sector, Non-hierarchical classification, k-means++

1. はじめに

「地球温暖化対策計画」(平成 28 年 5 月 13 日閣議決定)において、温室効果ガス排出量を 2030 年度に 2013 年度比 26%削減する目標が掲げられており、家庭部門では約 4 割削減することが目安とされている。家庭部門における 2018 年度の CO₂ 排出量は 2013 年度比で 20.3%減少¹⁾となっており、削減は着実に進んでいるものの、目標達成に向けて一層の削減が必要な状況である。

効果的な対策を打ち出すためには、対象となる世帯像を類型化等によって具体的に想定することが重要と考えられる。しかし、家庭部門における CO₂ 排出量の増減に影響する要因(以下、CO₂ 排出要因)は、地域、築年数、世帯人数、生活スタイルなど多様であり、それらの組合せによるパターン数は膨大である。このため、世帯を類型化する場合は、通常、要因を 2~3 種類に限定してパターン数を減らすことが一般的であるが、要因の種類を限定して得られた類型は必ずしも実態を反映したものではない。他方、寒冷地では住宅の断熱性能が平均的に高い、集合住宅に住む世帯は平均的に世帯人数が少ないというように、実在する世帯において各要因は完全に独立しているわけではなく、一定の相関を有している。つまり、各要因の組合せのパターン数は無数にあるが、実態として想定されるパターン数はある程度少ない数に絞り込むことができると考えられる。

そこで、本研究では、実態として多く存在している世帯のパターンを見つけ、それらの特徴を比較、分析することで、CO₂ 排出量削減に向けて有効と考えられる対策につい

てパターンごとに考察する。

2. 既往調査・研究

家庭部門の CO₂ 排出量やエネルギー消費量の実態を把握するための統計調査として、環境省では、平成 29 年度より「家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査」²⁾(以下、家庭 CO₂ 統計)を実施している。家庭 CO₂ 統計では CO₂ 排出要因について網羅的な調査を行っており、延床面積や地域等の主要な CO₂ 排出要因と世帯当たり CO₂ 排出量をクロス集計した結果も公表されているが、前述の通り、クロス集計のような変数が少ない分析では必ずしも実態を捉えきれていない可能性がある。家庭部門における CO₂ 排出量やエネルギー消費量を推計する試みはこれまでに多く行われており³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾、その中で世帯の類型化も行われている。しかし、いずれの研究も、いくつかの排出要因とその効果量を設定し、その条件下における将来推計を目的としたものであり、実在する世帯の類型化については掘り下げられていない。石河ら⁷⁾は、家庭 CO₂ 統計の試験調査である「家庭からの二酸化炭素排出量の推計に係る実態調査 全国試験調査」を用い、重回帰分析によって世帯当たりの CO₂ 排出量に対する各 CO₂ 排出要因の影響度合いを推計しているが、実在する世帯の類型化は行っていない。

本研究では、前述した家庭 CO₂ 統計の統計データを用い、複数の CO₂ 排出要因を説明変数としたクラスタリングによって実在する世帯を類型化し、各類型(以下、クラスター)の特徴を比較、分析することで、CO₂ 排出量が大きいクラスターに対して有効な対策について検討する。

*株式会社三菱総合研究所 環境・エネルギー事業本部 研究員

**株式会社三菱総合研究所 環境・エネルギー事業本部 主席研究員
〒100-8141 東京都千代田区永田町二丁目 10 番 3 号

3. クラスタリング手法

クラスタリング手法は、階層型クラスタリングと非階層型クラスタリングの2種類に大別される。階層型クラスタリングは、クラスターの結合過程をデンドログラムと呼ばれる樹形図によって把握することが可能であり、既往研究⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾でもよく使われている手法である。しかし、階層型クラスタリングは計算コストが大きく、高次元でサンプル数が多いデータを扱うには不向きなため、本研究では、非階層型クラスタリング手法である k-means++法を用いた。クラスタリングに用いる説明変数は、石河ら⁷⁾を参考に、平日の在宅日数や冷暖房時間といった生活スタイルに関する

指標を加え、表1に示す23の指標を用いた。一部の調査値はコード化された値で入力されているため、ダミー変数や表2に示す代表値に変換して分析を行った。暖房デグリーデーについては、家庭CO2統計では直接的に把握できないため、石河ら⁷⁾を参考に推計式(1)によって算出した。

$$HDD = 251.18\phi + 1.57h - 6906, \quad HDD \geq 0 \quad (1)$$

HDD : 暖房デグリーデー[度日]

ϕ : 緯度(10進法)[度]

h : 標高[m]

表1 クラスタ分析に用いた説明変数

指標 No.	変数	単位	備考
1	CO2 排出量	t-CO2	電気, 都市ガス, LP ガス, 灯油の年間二酸化炭素排出量
2	世帯人数	人	調査値をそのまま使用
3	延床面積	m ²	
4	世帯主年齢	十歳	コード化された調査値を階級値に変換して使用
5	世帯年収	百万円	(表2参照)
6	築年数	十年	
7	建て方ダミー		戸建 = 1
8	所有関係ダミー		持家 = 1
9	窓断熱ダミー		窓断熱あり(全ての窓が二重サッシまたは複層ガラス) = 1
10	太陽熱利用ダミー		設置あり(太陽熱利用暖房システムまたは太陽熱を利用した給湯器) = 1
11	太陽光発電ダミー	-	設置あり = 1
12	オール電化ダミー		該当(電気以外の年間エネルギー消費量がゼロ) = 1
13	ガス種別ダミー		都市ガス = 1
14	大都市ダミー		政令市, 県庁所在市 = 1
15	中都市ダミー		上記以外の5万人以上 = 1
16	電力排出係数	kg-CO2/kWh	各社の平成29年度実績値
17	暖房デグリーデー	度日	石河ら ⁷⁾ を参考に, 役場の緯度と標高から推計
18	平日昼間の在宅日数	日	コード化された調査値を階級値に変換して使用
19	平日の照明時間	時間	(表2参照)
20	1-2月平日の暖房機器使用时间	時間	コード化された調査値を階級値に変換して使用
21	夏季平日の冷房機器使用时间	時間	(表2参照)
22	一週間の入浴日数	日	
23	一週間のシャワー日数	日	調査値をそのまま使用

表2 調査値の階級値変換

指標 No.	指標	上段: 階級区分 / 下段: 階級値								
4	世帯主年齢	0~9歳	10~19歳	20~29歳	30~39歳	40~49歳	50~59歳	60~64歳	65~74歳	75歳以上
		0.45	1.45	2.45	3.45	4.45	5.45	6.2	6.95	8.25
5	世帯年収	250万円未満	250~500万円未満	500~750万円未満	750~1000万円未満	1000~1500万円未満	1500~2000万円未満	2000万円以上		
		1.25	3.75	6.25	8.75	12.5	17.5	22.5		
6	築年数	1970年以前	1971~1980年	1981~1990年	1991~1995年	1996~2000年	2001~2005年	2006~2010年	2011~2015年	2016年以降
		5.75	4.25	3.25	2.5	2	1.5	1	0.5	0.1
18	平日昼間在宅日数	ほぼ毎日いる	週1~2日いる	週3~4日いる	ほとんどいない					
		5	1.5	3.5	0					
19	平日昼間照明時間	2時間未満	2時間~4時間未満	4時間~6時間未満	6時間~8時間未満	8時間~12時間未満	12時間以上			
		1	3	5	7	10	15			
20	1-2月平日の暖房機器使用时间	2時間未満	2時間~4時間未満	4時間~8時間未満	8時間~12時間未満	12時間~16時間未満	16時間~24時間未満	24時間		
		1	3	6	10	13	20	24		
21	夏季平日の1台目エアコン使用时间	0時間	2時間未満	2時間~4時間未満	4時間~8時間未満	8時間~12時間未満	12時間~16時間未満	16時間~24時間未満	24時間	
		0	1	3	6	10	13	20	24	

4. クラスタリング結果

いずれかの指標が無回答の回答を分析対象から除外した結果、総サンプル数は7,769件となった。なお、各指標は標準化した上でクラスタリングを実行した。

非階層型クラスタリングは階層型クラスタリングと異なり、分割するクラスター数を分析者の判断で予め決めておく必要がある。本研究では、クラスタリングの性能評価手法の一つであるシルエット分析法を用い、クラスタリングの性能を確認しつつ、得られた結果の解釈のしやすさも考慮しながら、クラスター数を9と設定した。

クラスタリングによって得られた9つのクラスターについて、世帯当たりCO2排出量の平均値が小さい順にCL1～CL9とし、それぞれの特徴に基づきクラスター名を設定した。主な特徴を表3、クラスタリングに用いた各変数のクラスターごとの平均値を図1に示す。

なお、本研究では9つの類型をクラスターと呼び、クラスター内の個々の世帯をサンプルと呼ぶが、クラスター名は各クラスターの大まかな特徴を踏まえて名付けた名称であり、クラスター内の全てのサンプルがクラスター名と同じ特徴を備えているわけではない点に注意が必要である。

表3 各クラスターの特徴比較

クラスター名	サンプル数	クラスターの主な特徴				平均年間CO2排出量 (t-CO2/年)	
		住宅・地域特性	設備特性	世帯特性	生活スタイル	世帯当たり	一人当たり
CL1 集合_小	1066	集合住宅	-	世帯人数少 若年層多	シャワー習慣	2.27	1.12
CL2 集合_大	742	集合住宅	-	若年層多	入浴習慣	2.80	1.06
CL3 大都市	1382	大都市	都市ガス	-	-	3.40	1.26
CL4 戸建_小	1211	戸建住宅	-	-	シャワー習慣	3.67	1.49
CL5 太陽熱利用	136	戸建住宅	太陽熱利用	-	-	4.01	1.28
CL6 太陽光発電利用	630	戸建住宅	太陽光発電	若年層多	-	4.13	1.12
CL7 戸建_大	1331	戸建住宅	-	-	入浴習慣	5.09	1.57
CL8 オール電化	556	戸建住宅	オール電化	若年層多	-	5.36	1.62
CL9 寒冷地	715	寒冷地	窓断熱	-	-	6.50	2.45

※表中の「-」となっている項目は、特徴的な要素が見られなかった項目。

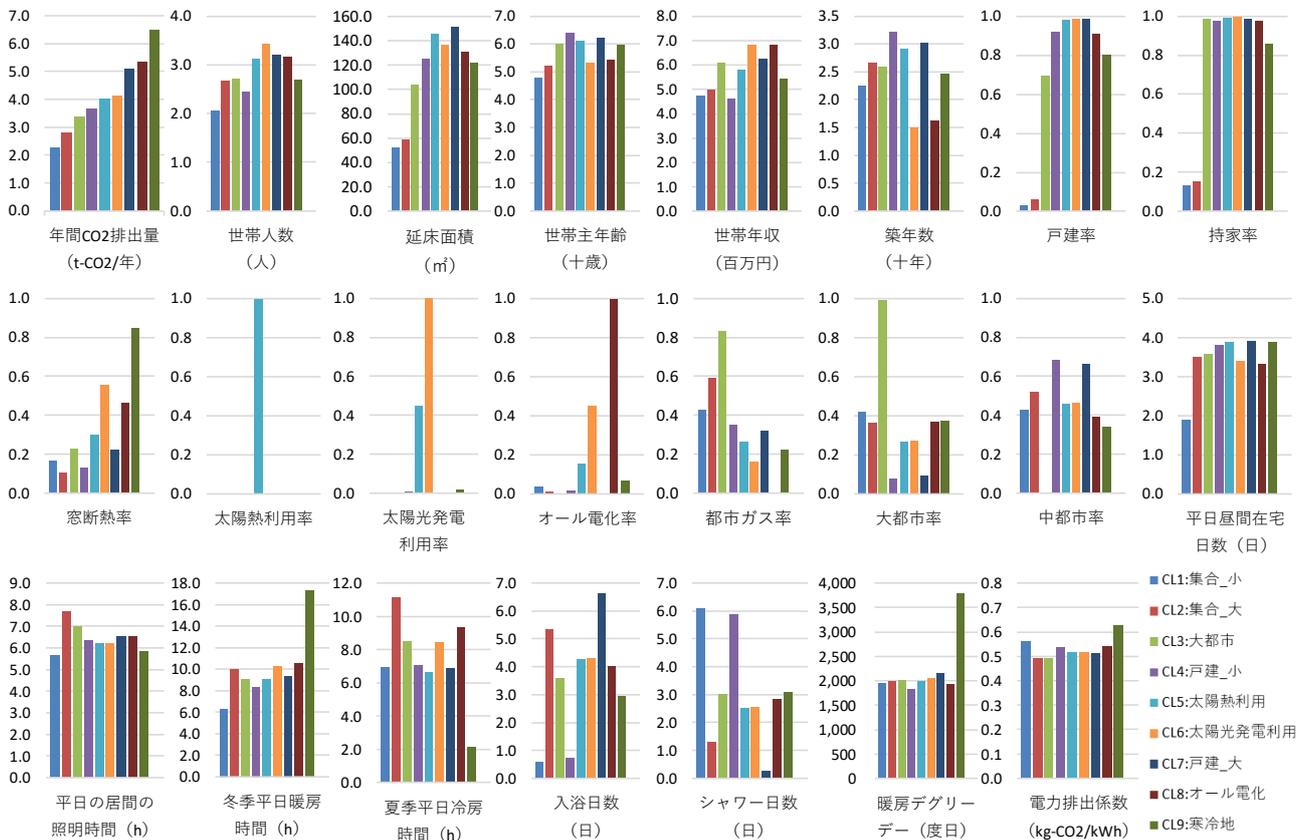


図1 クラスタリングに用いた各変数のクラスターごとの平均値

本節では、各クラスターの概要について簡単に述べる。

4.1 CL1, CL2 (集合住宅)

CL1 (集合_小), CL2 (集合_大) は、サンプルのほとんどが賃貸集合住宅に住んでいるクラスターである。40歳未満の若年層の割合について、他クラスターが概ね10%前後であるのに対し、CL1, CL2は20%以上と他クラスターと比較して若年層の割合が多いクラスターである。延床面積の平均値も他クラスターと比較して小さい。世帯当たり年間CO₂排出量(以下、特に記載がない限りはクラスターごとの平均年間CO₂排出量のことを排出量と呼ぶ。)はそれぞれ2.27 t-CO₂, 2.80 t-CO₂と全クラスターの中でも小さく、一人当たり排出量も1.12 t-CO₂, 1.06 t-CO₂と小さい。

CL1とCL2の違いとしては、主に以下の点が挙げられる。

- ・ 世帯人数について、CL1は単身世帯が約40%を占めるのに対し、CL2は単身世帯が約20%と少なく、CL2はCL1よりも世帯規模がやや大きい。
- ・ 照明時間や暖房時間について、CL2はCL1よりも平日の居間の照明時間や、平日の暖房機器・冷房機器使用時間が長い。
- ・ 在宅時間について、平日昼間に「ほぼ毎日いる」と回答したサンプルの割合が、CL1では26%だが、CL2では58%であり、CL2はCL1よりも平日昼間の在宅時間が長い。

4.2 CL3 (大都市)

CL3 (大都市) は、居住地が大都市(政令市または県庁所在市)のサンプルが100%近くを占めるクラスターである。世帯当たり排出量が3.40 t-CO₂とCL1, CL2に次いで小さいが、これは集合住宅に住んでいるサンプルが30%程度含まれているためであり、建て方別の排出量を見ると、集合住宅は2.84 t-CO₂であるのに対し、戸建住宅は3.64 t-CO₂であり、CL4と同程度の排出量となる。

4.3 CL4, CL7 (戸建住宅)

CL4 (戸建_小), CL7 (戸建_大) は、サンプルのほとんどが戸建住宅に住んでおり、創エネ設備や電化率、居住地等に関して特筆すべき特徴を持たないクラスターである。

CL4とCL7の違いとしては、主に以下の点が挙げられる。

- ・ 世帯当たり排出量について、CL4が3.64 t-CO₂と全クラスターの中でも比較的低い水準であるのに対し、CL7は5.09 t-CO₂と全クラスターの中でも比較的高い水準となっている。
- ・ 世帯人数について、CL4は2人以下世帯が約60%を占めるのに対し、CL7は約35%と小さく、CL7は

CL4と比較して世帯規模が大きい。

- ・ 延床面積について、CL4の平均値が約125 m²であるのに対し、CL7は約151 m²であり、CL7はCL4よりも住宅規模が大きい。
- ・ 入浴習慣について、CL4は1週間のうちのシャワー日数が平均6日であるのに対し、CL7は1週間のうちの入浴日数が平均6日以上であり、入浴習慣に大きな違いがある。

4.4 CL5, CL6, CL8 (創エネ設備, オール電化)

CL5 (太陽熱利用), CL6 (太陽光発電利用), CL8 (オール電化) は、それぞれ太陽熱利用率, 太陽光発電利用率, オール電化率が約100%のクラスターである。

CL5, CL6, CL8の設備導入状況以外の特徴の違いとしては、主に以下の点が挙げられる。

- ・ 排出量について、3つのクラスターのうち、世帯当たり排出量はCL5が最も小さいが、一人当たり排出量はCL6が最も小さい。CL8は世帯当たり排出量、一人当たり排出量ともに3クラスターの中で最も大きく、全クラスターの中で見てもCL9(寒冷地)に次いで大きい。
- ・ 世帯主の年齢について、CL6, CL8は40歳未満の若年層の割合が15%程度とCL1, CL2に次いで大きい。CL5は6%程度と若年層の割合が小さい。
- ・ 築年数について、世帯主の年齢と同様に、CL6, CL8は平均値が15年程度と比較的新しい住宅が多いが、CL5は29年とやや古い住宅が多い。
- ・ 窓断熱率について、CL5は30%とCL3やCL7に近い水準であるが、CL6は56%, CL8は46%と高い水準となっている。

4.5 CL9 (寒冷地)

CL9 (寒冷地) は暖房デGREEデーの平均値が3794(度日)と高く、居住地が寒冷地のサンプルが大部分を占めるクラスターである。世帯当たり排出量は6.50 t-CO₂、一人当たり排出量は2.45 t-CO₂と、いずれも全クラスターの中で最も大きい。他方、窓断熱率が84%と全クラスターの中で最も高いことから、排出量は大きいものの、住宅設備の省エネ化は他クラスターよりも進んでいると推察される。

5. 排出量削減に向けた対策の考察

9つのクラスターの中でも、特に世帯当たり排出量が高いCL7, CL8, CL9の3クラスターについて、排出量削減に向けて有効と考えられる対策を考察する。

5.1 CL7（戸建_大）に対する対策の考察

図3に示す各クラスターで使用している給湯器の種類を見ると、CL7は他クラスターと比較して灯油給湯器の使用率が高いことが分かる。家庭CO2統計の調査結果からは、使用している給湯器が高効率機器かどうかは確認できないが、仮に従来型の灯油給湯器の使用率が高い場合、潜熱回収型石油給湯器や電気ヒートポンプ式給湯器等の高効率給湯器への買替えを促すことで、排出量を削減できる可能性がある。

5.2 CL8（オール電化）に対する対策の考察

CL8（オール電化）は、暖房機器として機器効率が良いエアコンの使用率が高いことから、他クラスターと比較して排出量が小さいことが期待されるが、本研究においては寒冷地を除く8クラスターの中で最も世帯当たり排出量が多い結果となっている。その原因としては、給湯器として機器効率が低い電気温水器を利用しているサンプルが33%存在することや、24時間暖冷房を行っているサンプルが一定数存在すること等が考えられる。機器に関しては高効率機器への更新を促進すべきだが、暖冷房時間等については居住者の価値観や生活スタイルに関わるものであり、一概に変容を促すべきものではないと考える。

他方、CL8と生活スタイルが類似しているクラスターとして、CL6（太陽光発電利用）が挙げられるが、CL6は世帯当たり排出量が4.13t-CO₂と小さく、一人当たり排出量も1.12t-CO₂と全クラスターの中でも低い水準である。これは、太陽光発電による排出量削減効果によるものと考えられる。CL6は築年数の新しさ、世帯年収の高さ、窓断熱率の高さ、暖冷房時間の長さ等においてCL8と類似した特徴を有しており、属性・価値観等の観点からもCL6とCL8は類似していると考えられるため、CL8は太陽光発電設備の導入が進みやすい可能性がある。したがって、CL8に対しては、太陽光発電設備の導入が最も有効な対策と考える。

5.3 CL9（寒冷地）に対する対策の考察

図2を見ると、CL9（寒冷地）は暖房による排出量が42%と大きい割合を占めることが確認できる。図4にクラスター別の最もよく使う暖房器の種類を示す。CL9は灯油ストーブ類が50%、セントラル暖房システムが23%と、エアコンの割合が大きい他クラスターとは異なる傾向を示している。寒冷地でエアコンの普及が進んでいない理由としては、低外気温時に暖房能力が低下する、除霜運転時に暖房運転が止まる等のヒートポンプ特有の課題が挙げられる。しかし、近年は技術開発により寒冷地用エアコンのラインナップ

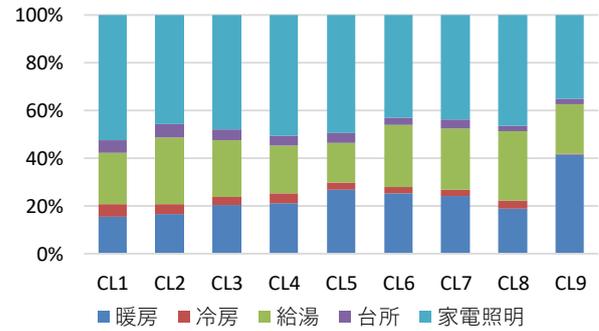


図2 世帯当たり年間CO2排出量 (t-CO₂/年) の用途別内訳

※各用途は環境省²⁾による推定結果。

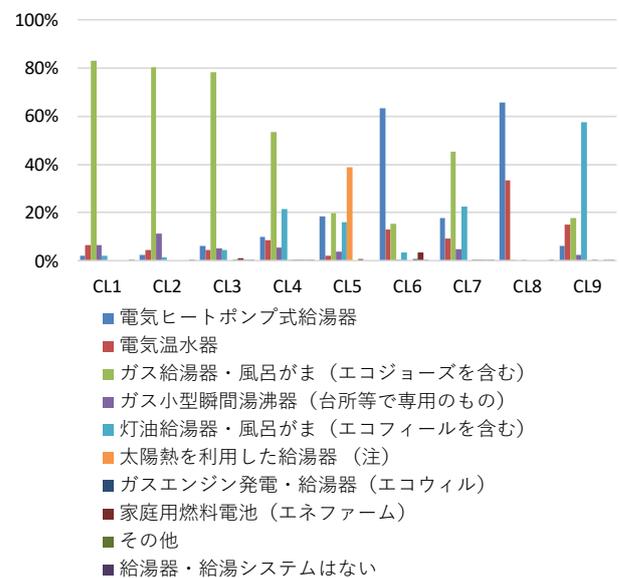


図3 各クラスターで使用している給湯器種類

※使用している給湯器の種類は複数回答可。

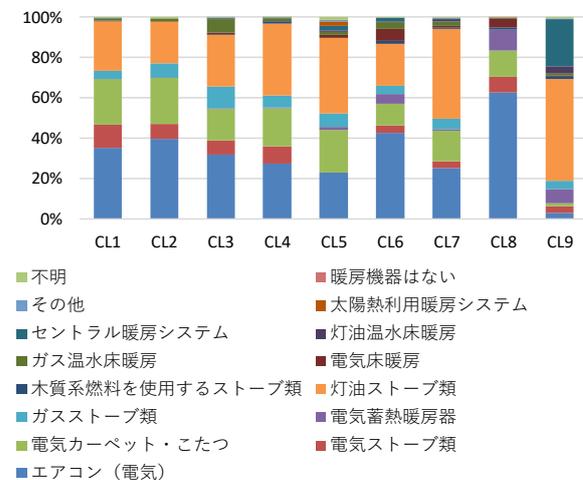


図4 クラスター別最もよく使う暖房器の種類

プも増えてきているため、CL9 に対しては、エアコンへの置き換えを進めることが有効な対策と考えられる。

6. おわりに

本研究では、家庭 CO2 統計の統計データを用い、CO2 排出量の増減に対して影響が大きいと考えられる 23 の指標を説明変数とした非階層型クラスタリングを行った。世帯を 9 つに類型化した結果、建て方や居住地、設備の導入状況等の特徴に違いを持ったクラスターが得られた。また、排出量が多い 3 つのクラスターについては、排出削減に向けた対策の検討も行った。

今後は、今回得られた類型を参考に、給湯器や暖房機器等を高効率機器に更新した場合の排出量削減効果の推計や、テレワーク普及に伴う在宅日数変化が排出量に与える影響等について分析を行う予定である。

謝辞：本研究は、エネルギー・資源学会主催の「家庭部門の CO2 排出実態統計調査利用研究会」における取組の一環として行ったものであり、分析に使用した「家庭部門の CO2 排出実態統計調査」の統計データも同研究会を通じて提供いただいたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 温室効果ガスインベントリオフィス, 日本の温室効果ガス排出量データ 2020 年公開版(確報値: 1990~2018 年度), <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>, 2020 年 6 月 20 日アクセス.
- 2) 環境省, 家庭部門の CO2 排出実態統計調査(家庭 CO2 統計), <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html>, 2020 年 6 月 20 日アクセス.
- 3) 田中昭雄, 久保隆太郎, 中上英俊, 石原修, 世帯属性を考慮した住宅用エネルギー消費原単位の推定と将来予測, 日本建築学会環境系論文集, Vol.73, No.628, (2008), pp.823-830
- 4) 金森有子, 家庭部門における地域別エネルギー消費特性を考慮した二酸化炭素排出削減目標の達成可能性, 土木学会論文集 G (環境), Vol.73, No.5, (2017), I_121-I_130
- 5) 石河正寛, 松橋啓介, 金森有子, 世帯規模別建て方別世帯数の都道府県別将来推計とエネルギー消費量に及ぼす影響, 公益社団法人日本都市計画学会 都市計画論文集, Vol.50, No.3, (2015), p.838-843
- 6) 山下隆久, 金森有子, 松岡譲, 人口・世帯構成と環境負荷発生量の係わりについて, 環境システム研究論文集, Vol.35, (2007), p.315-325
- 7) 石河正寛, 松橋啓介, 金森有子, 有賀敏典, 家庭 CO2 統計に基づく全国 10 地方別の排出要因分析と市町村別世帯あたり排出量の推計—全国試験調査結果を用いて—, 土木学会論文集 G (環境), Vol.74, No.6 (環境システム研究論文集第 46 巻) (2018), p.193-201
- 8) 花田信介, 樋口秀, 地方都市部周辺部の住宅ストックと世帯の多様性に関する研究—長岡市をケーススタディとして—, 都市計画論文集, No.38-3, (2003), p.55-60
- 9) 八杉克志, 西名大作, 村上三郎, 金田一清香, 佐々木元気, 石田正樹, 原康輔, 広島市の全電化住宅におけるエネルギー消費実態に関する研究(第 10 報) 家庭用厨房機器の稼働状況, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第 8 巻, (2014), p.153-156
- 10) 濱田和紀, 山田容平, 下田吉之, 住宅における居住者の在室状況を考慮した住宅用エアコンの使用実態把握, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第 6 巻, (2015), p.169-172

Patterns in Japan household data associated with energy consumption profiles

Delage Remi*, Nakata Toshihiko*

Abstract

The complexity of energy systems have so far been ignored in their analysis and design with unrealistic assumptions. The analysis of real data is necessary to deepen our understanding of these systems and provide more accurate models as well as realistic solutions toward sustainability. As complex systems, energy systems are composed of many actors self-organized in subsystems or patterns arising from the bottom-up. This study uses households' data provided by the Japanese Ministry of the Environment with the objective of finding patterns associated with residential energy consumption profiles. Using a clustering method, we first search for groups of households with similar energy consumption of electricity, city gas, LP gas, kerosene, gasoline, and diesel fuel. For each group, we then identify statistically significant specificities in the corresponding households' data including the geographical location, number and age of residents, annual income, heating equipment and vehicles.

Keywords : Residential sector, clustering, pattern recognition.

1. Introduction

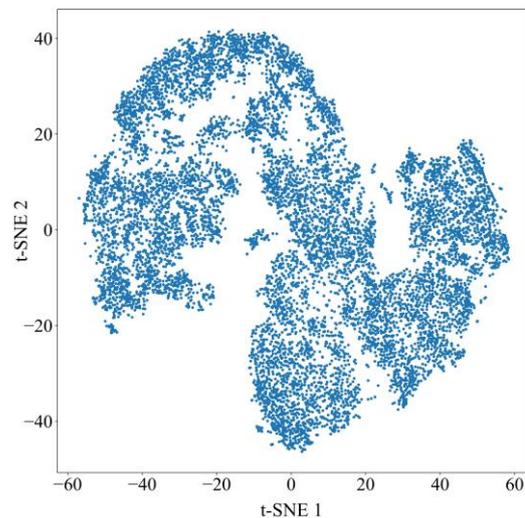
The analysis of energy systems have so far mostly relied on models built from assumptions, often linear, which do not transcribe their complexity. The diversity in actors' behaviors and preferences is obscured by agglomerated parameters thus not representing the imperfect reality. The increasing amount of data now offers us an insight on this reality, allowing us to fill our lack of knowledge while verifying the accuracy of our models.

This study focuses on the analysis of Japanese residential sector with the objective of identifying patterns associated with energy consumption profiles. For this purpose, we use the data provided by the Japanese Ministry of the Environment (1) consisting of 9505 households with information on the energy consumption, geographical location, residents, and equipment. After clustering the households based on their annual consumption of electricity, city gas, LP gas, kerosene, gasoline, and diesel fuel in 2017, we search for statistically significant specificities in corresponding households data.

2. Energy consumption clustering

As the original 6-dimensional search space corresponding to six energy resources is difficult to visualize, we first map it to a 2-dimensional space to check for the existence of clusters. t-Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE) (2) is currently considered as the best algorithm for this purpose. It is a nonlinear machine learning technique that consists in constructing a low-

a) t-SNE of raw consumption data



b) t-SNE of transformed consumption data

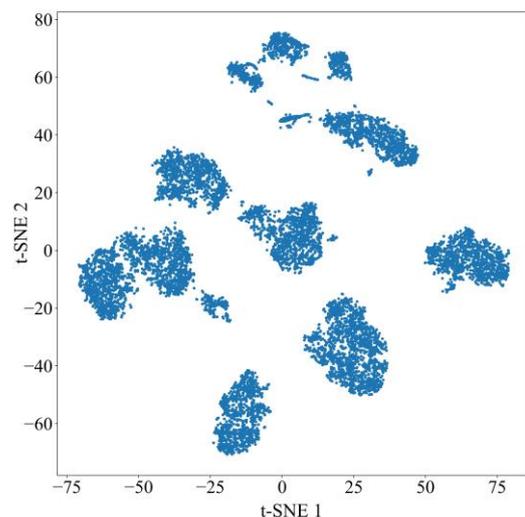


Fig. 1 t-SNE visualization of households' energy consumption.

Corresponding author; Delage Remi, E-mail: delage@tohoku.ac.jp
* Department of Management Science and Technology,
Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-11-816, Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8579, Japan

dimensional map such that the data pairwise probability distribution is similar to that in the original high-dimensional space by minimizing the Kullback-Leibler divergence. Data points pairs are attributed a higher probability the more similar they are using any similarity metrics (here we use the Euclidean distance). **Figure 1 a)** shows the result of t-SNE on the 9505 households' consumption data using a perplexity parameter of 100 which is almost equal to 1% of the sample size (3). No clusters are clearly distinct here. In order to reveal the clusters, we apply a nonlinear transformation on the data using the inverse hyperbolic sine function (3) defined by:

$$\operatorname{arsinh}(x) = \log(x + \sqrt{x^2 + 1}) \quad (1)$$

Such transformation have for effect to make high values more comparable to lower ones while keeping zero values as zero. Other transformations such as $\log_2(x + 1)$ can also be used for this purpose but we found that clusters were qualitatively more distinct with arsinh function.

For the clustering of households' energy consumption, we opted for HDBSCAN algorithm (4). This algorithm takes as input a minimum cluster size instead of a number of clusters to find as in most other clustering algorithms. This allows to identify the actual number of clusters as well as outliers. The clustering result with a minimum cluster size of 20 points is shown in **Fig. 2 a)** using the t-SNE map in which 23 clusters are identified (the clustering is applied on the original space after applying arsinh transformation rather than the t-SNE map). Black dots correspond to outliers. As a comparison, **Fig. 2 b)** shows the clustering result on a map build from the two first components of principal component analysis (PCA) which a standard tool for exploratory data analysis. One can see that such linear approach offers qualitatively poor results in comparison with t-SNE which is nonlinear. The size and energy consumption of each clusters is summarized in **Table 1**.

3. Clusters specificities

After identifying households with common energy consumption profiles, we search for significant differences between these clusters in their geographical location, residents' data and equipment using either the conditional probability (probability given data \in cluster) or average value depending on the nature of the data. We estimate the corresponding p-values based on the null-hypothesis that clusters' households' data are not different from the other households' data using a bootstrapping method as follows: for each cluster, 100.000 test sample sets with the same size as the considered cluster are generated by randomly drawing

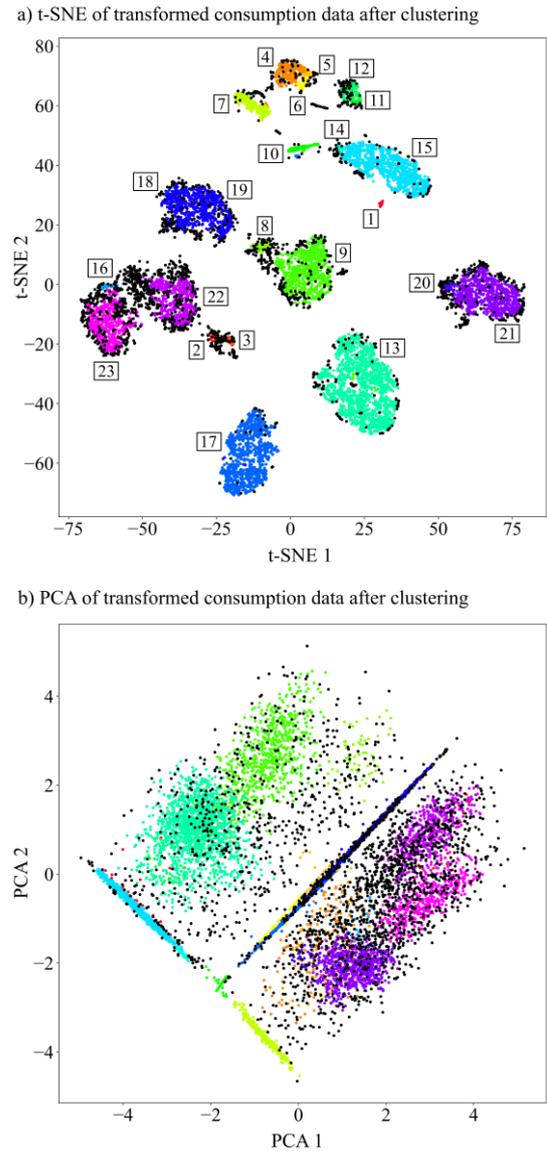


Figure 2 Clustering result visualized using a) t-SNE and b) PCA for comparison. Black dots correspond to outliers.

households from the whole set with replacement excluding households from the cluster. The conditional probabilities or average values probability distributions are computed using the test sets. Based on the actual cluster data, the p-value is then estimated from these probability distributions using a right-tailed test for conditional probabilities and two-tailed test for average values. **Figure 3** shows an example of such calculation result for the prefecture data from cluster 13. Although the conditional probability for Fukuoka prefecture is higher than for Shiga prefecture, its p-value is relatively high so the null-hypothesis cannot be invalidated. Meanwhile, the p-value for Shiga prefecture is low meaning that the percentage of households from this prefecture is abnormally high compared with that of the set

of other households.

Table 2 shows significant (i.e. with low p-value) conditional probabilities and average values from the identified clusters. For practical reasons, only the results for clusters representing more than 1% of the whole set (73.1% in total or 95.2% of the whole set excluding outliers) and p-values lower than 0.01 are shown. Heating equipment and vehicles fuel data are omitted here because of their triviality (households using kerosene have kerosene based heating equipment etc). It appears that households from clusters 17, 19 and 22 tend to have a more than average

number of residents, income and floor area while households from clusters 4, 7, 10, 12 and 15 tend to be small and have few residents with low income. Clusters 4, 22 and 7, 21 seem concentrated in northern and southern Japan respectively while clusters 13, 15 seem to mostly be constituted of households from prefectures with high population density.

To avoid misleading the reader interpretation, we do not advance hypothesis on these results but rather plain observations. However, we emphasize the fact that conditional probabilities and average values should not be used to demonstrate causality. We employ

Table 1 Summary of clusters energy consumption.

Cluster	Nb points	% points	(GJ/hous.year)							(GJ/resid.year)	
			Electricity	City gas	LP gas	Kerosene	Gasoline	Diesel	Total	Total	
1	22	0.23	18.6	21.8	0	0	1.3	24.4	66.1	23.1	
2	23	0.24	20.2	0	4.4	44.1	43.8	8.2	120.7	41.3	
3	26	0.27	34.3	0	0	13.0	40.2	19.3	106.8	32.8	
4	210	2.21	10.3	0	5.8	16.9	0	0	33.0	21.9	
5	23	0.24	11.3	0.1	0	50.2	0	0	61.7	40	
6	44	0.46	19.1	0	0	9.3	0	0	28.4	17.7	
7	242	2.55	10.4	0	9.4	0	0	0	19.8	12	
8	59	0.62	14.0	2.7	0	49.5	28.0	0	94.2	38.7	
9	726	7.64	13.7	18.6	0	10.3	25.0	0	67.6	26.1	
10	143	1.50	24.7	0	0	0	0	0	24.7	12.4	
11	34	0.36	10.8	14.4	0	2.2	0	0	27.4	13.7	
12	106	1.12	11.7	15.1	0	9.4	0	0	36.2	18.7	
13	1346	14.16	14.5	21.5	0	0	20.3	0	56.4	21.5	
14	31	0.33	4.3	1.9	0	0	0	0	6.2	6	
15	821	8.64	12.0	16.0	0	0	0	0	28.0	14.4	
16	25	0.26	6.6	0	5.1	3.1	10.8	0	25.6	20.9	
17	927	9.75	32.5	0	0	0	30.6	0	63.1	22.4	
18	20	0.21	32.5	0	0	1.0	31.1	0	64.6	20.9	
19	732	7.70	28.1	0	0	17.9	31.8	0	77.8	29.3	
20	41	0.43	5.3	0	2.2	0	10.0	0	17.5	16.3	
21	721	7.59	13.1	0	13.1	0	28.7	0	54.9	23.1	
22	489	5.14	15.4	0	3.1	39.0	33.4	0	90.9	34.8	
23	480	5.05	12.7	0	16.3	10.5	32.0	0	71.4	28.3	
Outliers	2214	23.29									
Total	9505	100									

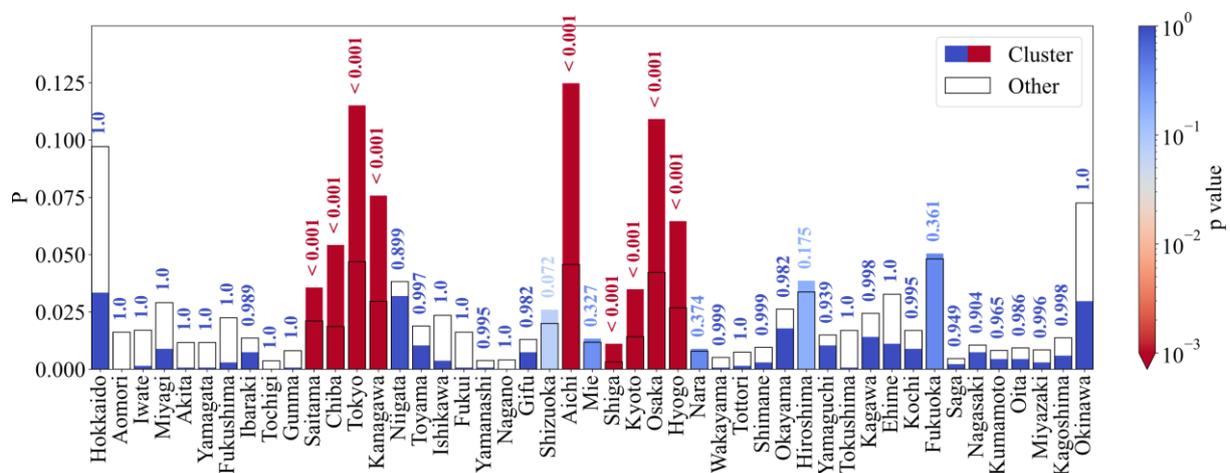


Figure 3 Example of prefectures conditional probability distribution for cluster 13 with the corresponding p-values.

such approach here for the mere purpose of revealing relationships, not their nature. Although the total energy consumption might be directly related with the number of residents, floor area or income, the relationships between these variables and individual resources consumption might not be so trivial. Especially, geographical location and construction year should be related to the complex evolution history of Japan with environmental, economic and political factors.

4. Conclusion

Because of the complexity of energy systems, there is a limit to their analysis through modeling and one ultimately have to explore their reality from data. With the increasing amount of data and the development of advanced algorithms for analysis, we are now able to fill our lack of knowledge on these systems and provide better solutions toward sustainability. The present study focuses on the analysis of residential energy consumption in Japan. With the use of clustering and standard statistical tools, we were able to identify clusters in energy consumption profiles divided in electricity, city gas, LP gas, kerosene, gasoline and diesel fuel as well as specificities in households data associated with each clusters. The method presented here however do not allow to draw conclusions on the nature of the relationships between each energy resources and these households' specificities. For this purpose, one could use other machine learning techniques such as association rules learning (5), although current algorithms require

great computer resources. Lastly, one cannot exclude the risk of biases in the sampling so an increase in data amount and diversity would be beneficial, particularly some prefectures are represented by very few households.

References

- 1) 環境省. 家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査平成 29 年度 ; <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html> (Accessed on June 12, 2020).
- 2) L. V. D. Maaten, and G. Hinton; Visualizing Data using t-SNE, *Journal of Machine Learning Research*, 9(2008) 2579.
- 3) D. Kobak, and P. Berens; The art of using t-SNE for single-cell transcriptomics, *Nature Communications*, 10(2019) 5416.
- 4) R. J. G. B. Campello, D. Moulavi, A. Zimek, and J. Sander; Hierarchical Density Estimates for Data Clustering, Visualization, and Outlier Detection, *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, 10(2015).
- 5) G. I. Webb; Discovering Significant Patterns, *Machine Learning*, 68(2007) 1-33.

Table 2 Specificities in clusters representing more than 1% of the whole data set. Only p-values less than 0.01 are shown here.

Cluster	4		7		9		10		12		13															
Prefecture	Hokkaido 22.4%	Aomori 7.1%	Iwate 5.2%	Toyama 4.8%	Okinawa 22.3%	Fukuoka 11.6%	Niigata 15.2%	Aichi 9.5%	Osaka 7.3%	Hiroshima 6.3%	Miyagi 5.5%	Chiba 3.9%	Nara 1.9%	Osaka 11%	Kanagawa 10.4%	Miyagi 7.5%	Kyoto 6.6%	Aichi 12.5%	Tokyo 11.5%	Osaka 10.9%	Kanagawa 7.6%	Hyogo 6.5%	Chiba 5.4%	Saitama 3.6%	Kyoto 3.5%	Shiga 1.1%
Av. Residents Nb. (diff. other)	1.7 (-1.0)		1.8 (-0.9)		2.8 (+0.1)		2.2 (-0.5)		2.2 (-0.5)		2.9 (+0.2)															
Income (10k yens)	< 250 59.5%		< 250 46.7%		250-500 43.3%		< 250 37.1%		< 250 39.6%		> 500 58.5%															
Av. Floor Area m ² (diff. other)	84.3 (-18.3)		55.9 (-47.5)				87.2 (-15.2)				93.7 (-9.9)															
Constr. Year	< 1981 45.7%				1971-1995 51.2%		2011-2015 19.6%		< 1981 37.7%		1996-2000 17.3%		2011-2015 13.7%													
Av. Cars Nb. (diff. other)	0.3 (-1.0)		0.3 (-1.0)				0.5 (-0.8)		0.3 (-1.0)		1.2 (-0.1)															

Cluster	15		17		19		21		22		23																														
Prefecture	Tokyo 26.6%	Osaka 19.6%	Kanagawa 11.4%	Hyogo 6.6%	Saitama 4.4%	Kyoto 3.2%	Ehime 7.2%	Kagawa 5.2%	Okayama 4.2%	Ishikawa 3.7%	Tokushima 3.1%	Fukui 2.6%	Hokkaido 13.5%	Ishikawa 4.2%	Yamaguchi 3.7%	Fukui 3.4%	Toyama 3.3%	Akita 2.6%	Shimane 2.2%	Wakayama 1.2%	Okinawa 30.5%	Ehime 5.5%	Okayama 3.9%	Kagoshima 3.2%	Shimane 2.1%	Kumamoto 1.8%	Wakayama 1.1%	Hokkaido 30.5%	Aomori 5.3%	Iwate 4.9%	Toyama 3.7%	Yamagata 3.5%	Akita 2.7%	Yamanashi 1.2%	Miyagi 5%	Fukushima 4.4%	Okayama 4.4%	Iwate 3.5%	Nagasaki 2.5%	Nagano 2.1%	Saga 1.5%
Av. Residents Nb. (diff. other)	2.2 (-0.5)		3.2 (+0.6)		3.1 (+0.4)					3 (+0.2)																															
Income (10k yens)	< 250 25.9%		500-2000 60.9%		500-1000 44.7%		250-500 40.4%		250-500 40.9%		250-500 45.6%																														
Av. Floor Area m ² (diff. other)	68.2 (-37.2)		125.1 (+25.4)		134.3 (+34.8)		70 (-34.8)		136.5 (+36.2)		89.2 (-13.7)																														
Constr. Year			> 2000 68.5%		2001-2010 30.2%		2001-2010 28.3%		< 1991 59.1%		1991-1995 14.4%																														
Av. Cars Nb. (diff. other)	0.2 (-1.2)		1.6 (+0.4)		1.8 (+0.8)		1.4 (+0.1)		1.8 (+0.6)		1.6 (+0.3)																														

家庭 CO₂ 統計データの分析効率化ツールプロトタイプの構築

Development of a Prototype Tool for Efficient Analysis of Household CO₂ Statistical Data

上野 剛*・高橋 雅仁*・篠原 靖志**
Tsuyoshi Ueno Masahito Takahashi Yasusi Sinohara

Abstract

The Ministry of the Environment's household CO₂ statistics is a valuable data source that includes information on the energy consumption of actual houses in Japan, as well as information on municipalities. However, it is difficult to intuitively determine the location of the target house from this data alone, and weather conditions and regional characteristics are also unknown. Therefore, we linked the locations to local government codes and linked them to weather data and census data. For efficient analysis, a tool for visualization, filtering, and linkage with other databases was built on the GUI, and trial calculations were performed using the tool.

Key words : Household CO₂ statistic, inquiry Data, GUI tool, EV/PHV

1. はじめに

統計法改定に伴い、従来は統計作成のみに用いられてきた調査票情報が、学術研究目的でも利用可能となった。環境省による家庭部門のCO₂排出実態統計調査データ¹⁾(以下、「環境省データ」と呼ぶ)もその一つであり、許可を受けた利用者による調査票の利用が可能となっている。

環境省データは国内各地の約10,000世帯の実在世帯について、アンケート調査に基づいてエネルギー消費量が整備され、また所在地として市区町村情報が紐づいた貴重なデータである。しかしながら、本データのみからは対象とする住宅の所在地が直感的に把握できず、また気温等の気象条件や当該住宅の所在地の地域特性も分かりづらい。

そこで本研究では、所在地を全国地方公共団体コード²⁾と紐づけることで、気象データや国勢調査データ³⁾との連携を行う。また研究者が分析を効率的に行う支援のため、GUI上で可視化・フィルタリング・他データベースとの連携を行う分析効率化ツールのプロトタイプ(以下、「ツール」と呼ぶ)を構築する。

また、ツールの属性フィルタリング機能を用いた試算例として、電気自動車・プラグインハイブリッド自動車の利用によるCO₂排出削減効果に関する予備的検討を行う。電気自動車やプラグインハイブリッド自動車は輸送部門のCO₂排出量削減に有望であるが、保有車種など世帯属性の差による住宅単位の消費エネルギー量の差異について明らかとは言えない。

2. 分析効率化ツールプロトタイプの開発

2.1 ツールの全体像と機能

ツールの目的は、研究者が調査票を利用して研究を行うにあたり、データの全体像を把握し、対象となる世帯を効率よく抽出する支援をすることである。そのために以下の機能を実装したツールのプロトタイプを構築した。

- ・ 所在地の地図上への表示機能
- ・ 属性フィルタリング機能
- ・ 関連データのグラフ表示機能

図1にツールのGUI画面を示す。図中央には日本地図が提示され、図右側に属性フィルタリングを行うための選択肢(図2)が示されている。図1では環境省データの全世帯(9,505世帯、右上部に記載)が表示されているが、例えば図2に示したように、「太陽光発電を使用していない」「戸建住宅」で「性能の良い窓ガラス」を持ち「100m²以下の」「3-5人暮らし」の住宅は255世帯あり、GUI上でフィルタリングをすることによって、当該住宅のみが地図上で表示される。

図1はズームアウトすることで地域毎のグルーピング表示がなされ、ズームインすると各世帯の場所がマーカーとして表示される(図3)。特定の世帯のマーカーを選択することで、図1左側の領域に当該住宅の関連データが提示される。

図4にグラフ表示項目を示す。図4(d)は当該住宅から最も近いアメダス気象地点の月別最高・平均・最低気温を示している。また図4(e)は当該住宅のある市区町村での国勢調査データを元に作成された、地域の世帯特性に関する情報である。

なお環境省データには属性情報、エネルギー消費量データ共に膨大な項目が整備されているが、ここでは、考え方及び表示例としてごく一部を示している。

*電力中央研究所エネルギーイノベーション創発センター
カスタマーサービスユニット 上席研究員

**電力中央研究所エネルギーイノベーション創発センター
首席研究員

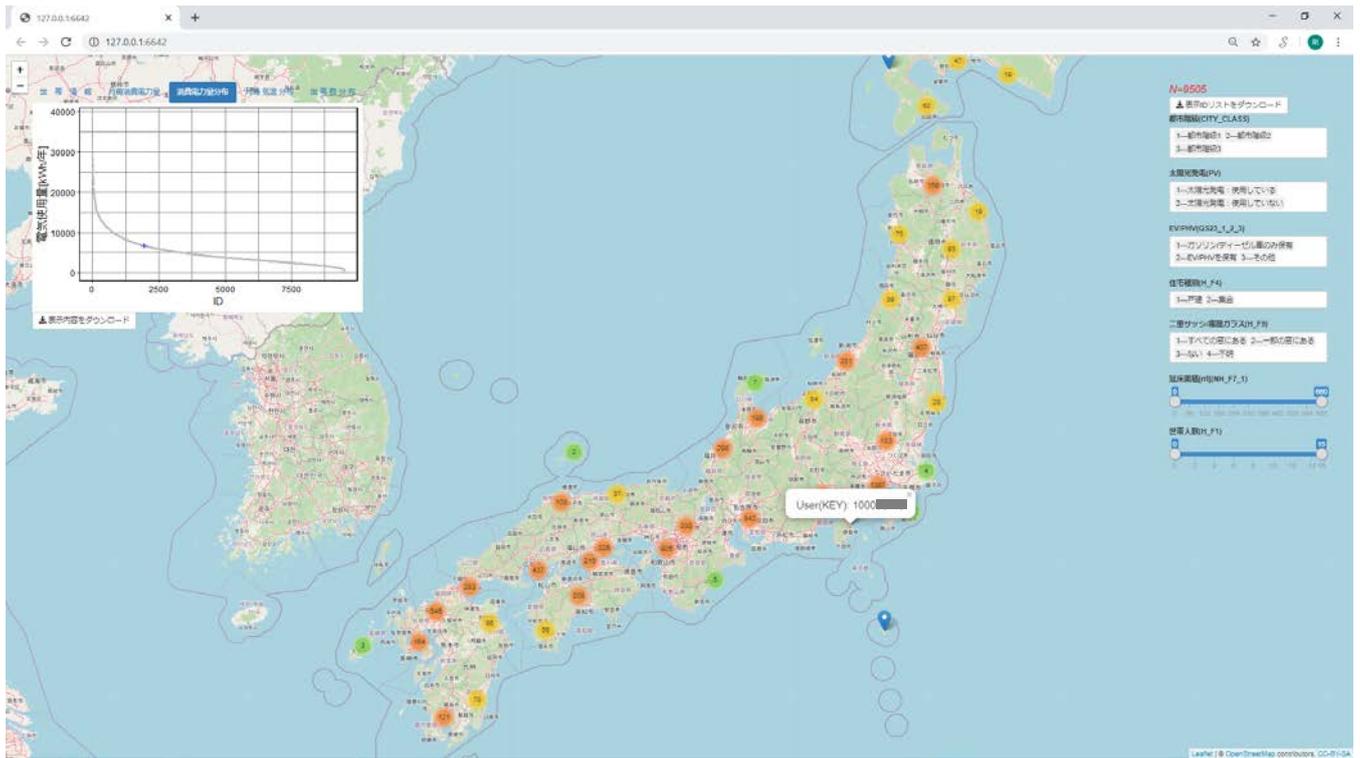


図1 分析効率化ツールプロトタイプ GUI 画面

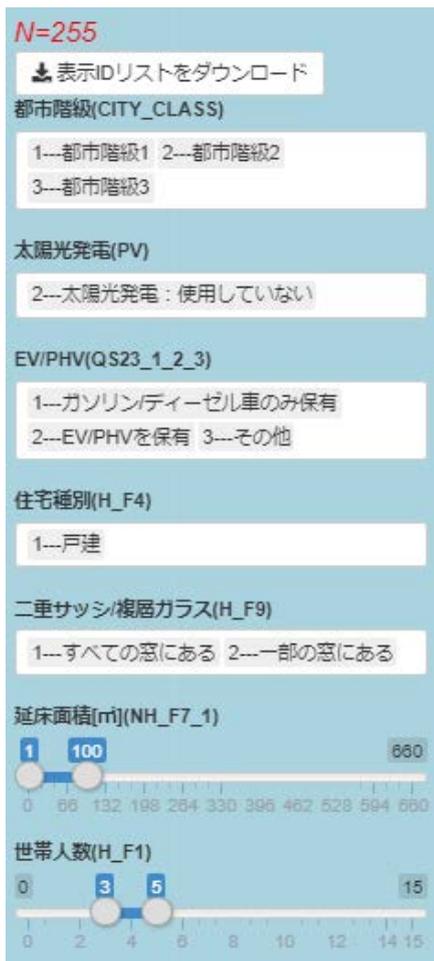


図2 フィルタリング選択画面
(図1 右側に表示される)

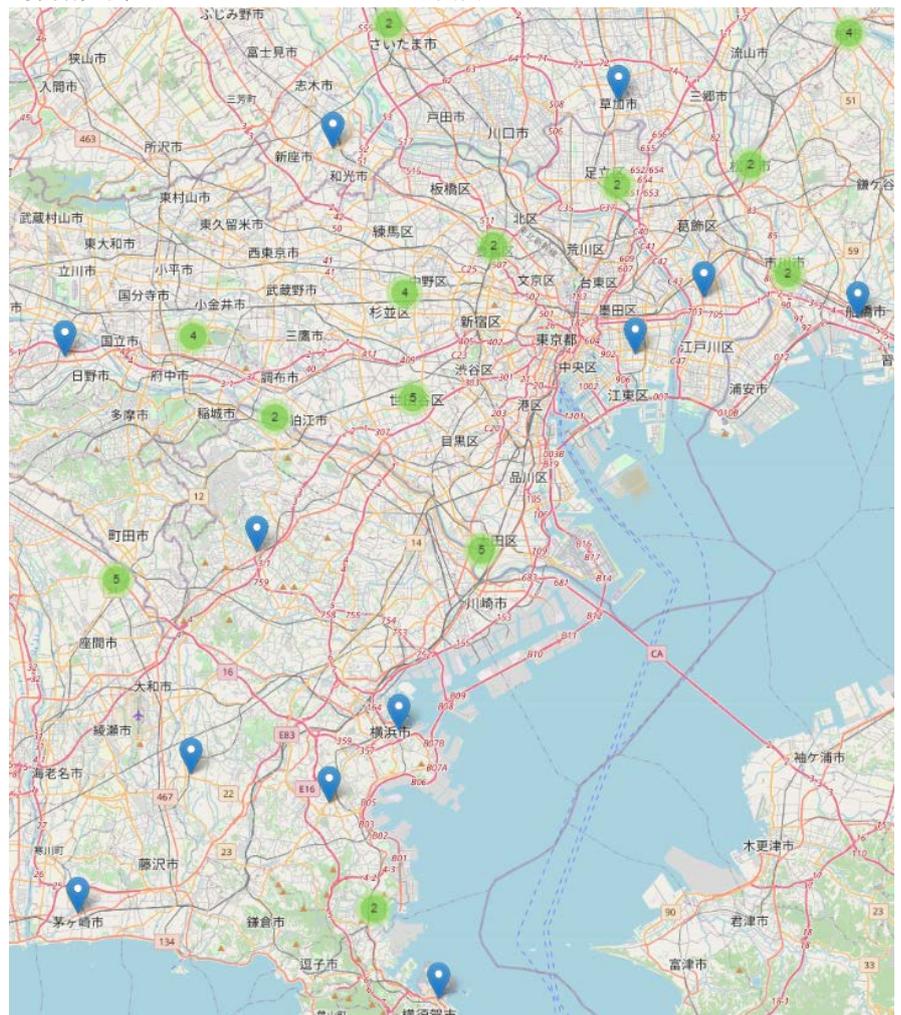


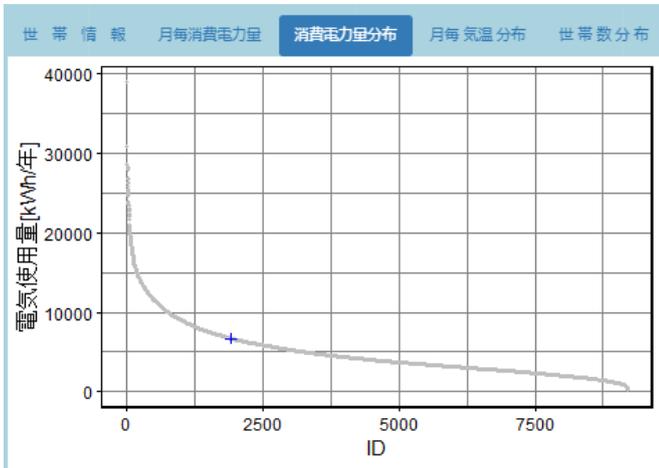
図3 ズームインした状態(各住宅のマーカが表示される)

世帯情報	
KEY	1000
CITY	静岡県伊東市
CityCode	22208
AMeDASPlace	網代
CITY_CLASS	2
PV	1
H_F4	1
H_F9	1
NH_F7_1	128.7
H_F1	3
EV_PHV	1

(a) 当該住宅の世帯情報



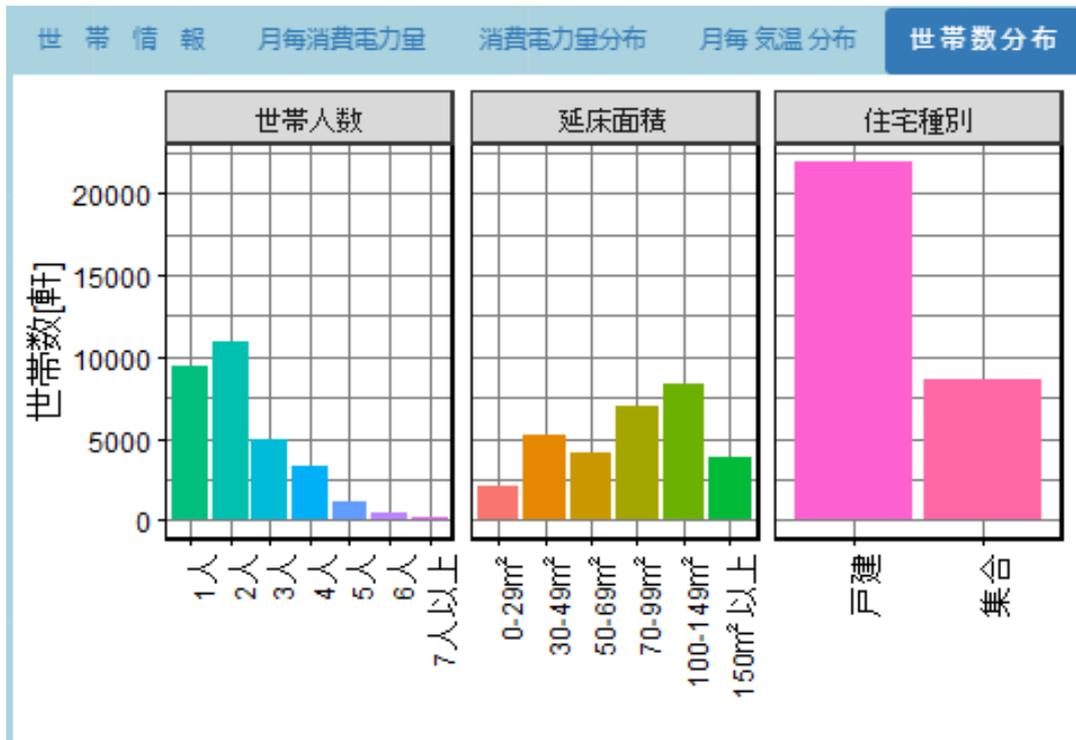
(b) 当該住宅の月毎消費電力量の推移



(c) 表示されている集合での消費電力量の分布



(d) 月毎最高・平均・最低気温推移



(e) 当該住宅のある市区町村の世帯数分布

図4 関連データのグラフ表示例(図1左側に表示される)

2.2 ツールで利用したデータベース

ツール構築の主たる部分は、統計処理言語 R(ベース)、RShiny⁴⁾(GUI 表示/場合によってはサーバー化)、leaflet ライブラリ(地図描画)を用いている。

図 5 に、ツール内で用いている各データベース間の関係を示す。市区町村名から市区町村コードへの変換は文献⁵⁾のテーブルを用いたが、名寄せ上の問題¹⁾は余り見られず、数ヶ所について手動での補正が必要な程度で、全ての世帯を名寄せできた。環境省データの市区町村名が綺麗に整理できていることが窺えた。市区町村の緯度・経度情報についても今回は文献⁵⁾のテーブルを用いたが、技術的には国勢調査等の shp ファイルを用いて重心計算を行う等でも可能である。

日本には 840 余の気象観測点があるが、ここでは市区町村の緯度経度情報と各気象観測点の緯度経度情報から、最も距離の近い気象観測点を抽出した。気象観測点の値は、図 4(a)では拡張 AMeDAS 気象データ⁶⁾(1995 年版標準年)から計算した値を表示しているが、電力中央研究所では領域気候モデルを用いて空間解像度 5km の格子点上気象要素を整備したデータベースである CRIEPI-RCM-Era2 を開発⁷⁾しており、その計算結果を表示することも可能としている。また図 4(a)のように気象地点を表示しているため、ユーザーが別途気象データを用意し、分析を行うことも可能である。

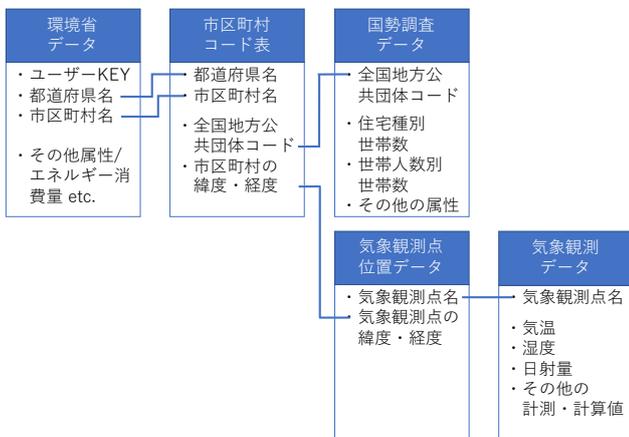


図 5 ツールで利用したデータベースの関係

3. EV・PHV による CO₂ 排出削減効果に関する予備的検討

本章では、平成 29 年度の家庭 CO₂ 統計を用いて、電気自動車・プラグインハイブリッド自動車の導入が、世帯あたりの CO₂ 排出量をどの程度削減しているか評価するための予備的な集計を行った。全サンプル 9,505 件のうち、電気自動車・プラグインハイブリッド自動車を保有する世帯(以

下 EV・PHV 世帯)は 78 件、ガソリン車・ディーゼル車のみを保有する世帯(以下 GV・DV 世帯)は 7,425 件あり、両グループの世帯あたり CO₂ 排出量を比較する。なお、EV・PHV 世帯は EV・PHV のみを保有する世帯だけでなく、2・3 台目にガソリン車・ディーゼル車を保有する世帯を含める。

住宅と自動車の部門横断の CO₂ 排出量を考えるため、世帯あたりの CO₂ 排出量は、電気(購入電力)・都市ガス・LPG・灯油・ガソリン・軽油それぞれの年間 CO₂ 排出量の合計とした。EV・PHV の自宅での充電電力量は、電気(購入電力)に含まれる。一方、急速充電器など自宅外での充電電力量は、家庭 CO₂ 統計では調査されていないため、含まれていないことに留意されたい。

表 1 に、両グループの基本属性の比較結果を示す。PV 所有率と全電化住宅の割合は、EV・PHV 世帯の方が GV・DV 世帯よりも多い。EV・PHV は PV やオール電化と親和性が高いことを示唆する。自動車の保有台数と年間走行距離(世帯あたり)は、EV・PHV 世帯の方が GV・DV 世帯よりも多い。

両グループの世帯あたりの年間 CO₂ 排出量の平均値を比較したところ、EV・PHV 世帯の方が GV・DV 世帯よりも 12% 少ない(図 6)。図 7 は、両グループの世帯あたりの年間 CO₂ 排出量の世帯分布である。ガソリン消費量が少ないことが EV・PHV 世帯の CO₂ 排出減の主因である(図 6)。一方、電気使用量(購入電力)は、EV・PHV 世帯の方が GV・DV 世帯よりも 3% 多い。3% 増にとどまる理由としては、EV・PHV 世帯の方が GV・DV 世帯よりも PV 所有率が高いこと(自家消費による購入電力減)、EV・PHV の自宅外での充電電力量を考慮していないことが考えられる。これらの予備的な集計結果を踏まえて、今後、より定量的な評価に家庭 CO₂ 統計データを活用していく。

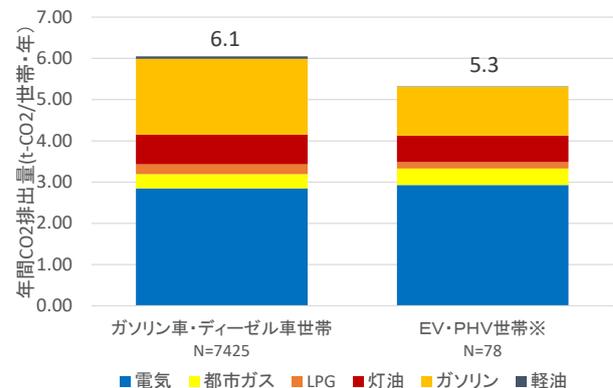


図 6 EV・PHV 世帯と GV・DV 世帯の世帯あたり年間 CO₂ 排出量平均値 (t-CO₂/世帯・年)

¹⁾ 例えば”龍”と”竜”、”ヶ”と”ヶ”等、表記揺れが多いと名寄せが困難となる。

表1 EV・PHV世帯とGV・DV世帯の基本属性の比較

属性	ガソリン車・ディーゼル車世帯 (N=7425)	EV・PHV世帯※ (N=78)	
住宅	居住人数	2.87人	2.77人
	戸建住宅の割合	69%	77%
	延床面積	108.8㎡	114.4㎡
	地域分布	北海道9%, 東北10%, 関東甲信14%, 北陸10%, 東海11%, 近畿10%, 中国9%, 四国9%, 九州10%, 沖縄7%	北海道6%, 東北12%, 関東甲信17%, 北陸5%, 東海18%, 近畿13%, 中国9%, 四国8%, 九州8%, 沖縄5%
	PV所有率	9%	29%
	全電化住宅割合	12%	26%
自動車	保有台数	1.59台	1.83台
	年間走行距離 (世帯あたり)	11,460km	15,282km

※EV・PHV世帯は2・3台目にガソリン車・ディーゼル車を保有する世帯を含める。

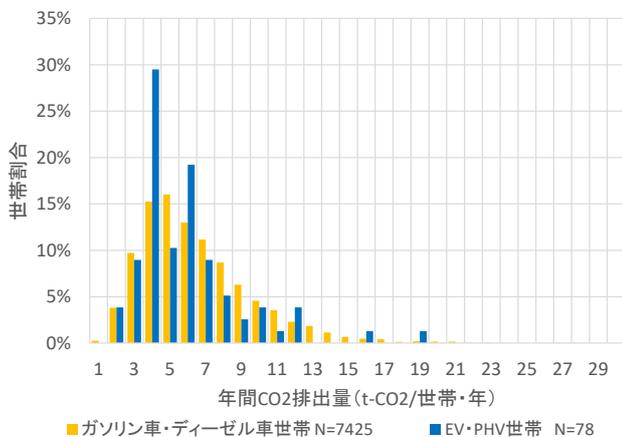


図7 世帯あたり年間CO2排出量の世帯分布の比較

4. おわりに

本稿では、環境省CO2統計データと気象データや国勢調査データとの外部データベースとの連携を行うとともに、分析を効率的に行うためのツールを構築した。主な知見は以下のようにまとめられる。

- 1) 環境省家庭CO2統計データの各対象住宅の所在地(市区町村レベル)を名寄せし、地方公共団体コードと紐づけることで、緯度経度情報(市区町村の重心)を付与し、国勢調査データや気象データとの連携を行った。これによって、分析対象とする住宅のエネルギー需要と外気温との相関分析等を行うことが可能となる。

- 2) GUI上で地図上での可視化・分析対象とする住宅のフィルタリング・他データベースとの連携を行うためのツールのプロトタイプを構築した。これによって、研究者が分析を効率的に行うことが可能となり、より効果的に家庭CO2統計データを活用していくことが可能となる。

- 3) 本ツールの試算例として、EV・PHVによるCO2排出削減効果に関する予備的検討として、EV・PHV所有世帯とそれ以外の世帯についてグループ間の基本属性の比較を行った。

本稿におけるツールの活用や、予備的検討結果を踏まえ、今後、より定量的な評価を行うために家庭CO2統計データを活用していく予定である。

なお今回の家庭CO2統計の分析を行った際、以下の気づきがあった。次年度以降のデータベース構築において、可能であれば改善を希望したい。

- ・地方公共団体コードの付与
- ・EV・PHVの自宅外での充電電力量の追加

謝辞

本研究では、環境省による家庭CO2統計データ、総務省による国勢調査データを用いている。関連する各社・組織の皆様へ深く感謝する。また地図の描画にはR Shinyを介し、Open Street Mapを用いた。本データがOpen Database Licenceの元によりのみ利用可能である⁸⁾ことをここに明記するとともに、Open Street Map Contributorsの皆様へ深く感謝する。

参考文献

- 1) 環境省 家庭部門のCO2排出実態統計調査 <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html>
- 2) 総務省 全国地方公共団体コード <http://www.soumu.go.jp/denshijiti/code.html>
- 3) 平成22年国勢調査小地域集計 <https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/index.html>
- 4) Shiny from RStudio: <https://shiny.rsudio.com/>
- 5) おまるくんの技術ノート：市区町村コード表 <http://note.omarukun.com/notes/4/>
- 6) 日本建築学会:拡張 AMeDAS 気象データ(1995)
- 7) 橋本篤,平口博丸,田村英寿,服部康男,松梨史郎: 領域気候モデルを用いた過去53年間の気象・気候再現, 電力中央研究所報告 N13004, 2013
- 8) OpenStreetMap Copyright: <https://www.openstreetmap.org/copyright>