

家庭 CO₂ 統計とエネルギー最終需要モデルを用いた世帯間エネルギー消費差異の成因に関する研究

Analysis on Differences of Energy Consumption among Households by Simulation and Statistics

的 場 晴 香 *・ 杉 山 み な み *・ 松 岡 綾 子 *・ 下 田 吉 之 *・ 山 口 容 平 *

Haruka Matoba

Minami Sugiyama

Ayako Taniguchi-Matsuoka

Yoshiyuki Shimoda

Yohei Yamaguchi

(原稿受付日 2020 年 5 月 29 日, 受理日 2020 年 8 月 4 日)

Abstract

To estimate the energy use reduction due to energy saving measures, it is necessary to understand the current state of energy consumption considering difference of energy use among households. In this paper, a multinomial logistic regression model which predicts the appliance ownership status from household attributes was developed using government statistics (Household CO₂ Statistics, 2014). By integrating this model with the residential end-use energy simulation model, the residential sector energy consumption of Japan was calculated. As a result, it is clarified the household using a lot of energy owns more appliances than the others. Comparing the energy simulation result and actual energy consumption from the Household CO₂ Statistics, it was verified that the variation of the energy consumption close to the actual situation can be reproduced. It was also shown that the largest cause of error between simulation results and statistical values was due to the differences in resident lifestyle and occupant's behavior. Furthermore, it was demonstrated that households that were underestimated in the simulation model had more energy consuming behavior and lower energy saving awareness than standard households.

Key words : Appliance ownership, Household energy consumption, Resident habit and behavior

1. はじめに

日本の地球温暖化対策計画¹⁾では温室効果ガス排出量を 2030 年度に 2013 年度比で 26%削減するという目標が掲げられている。同計画では家庭部門の削減目標は 39%と他部門に比べて大きく設定されており、十分な対策が必要であると言える。目標達成に向けて、住宅の断熱改修やトップランナー制度による機器の効率向上、HEMS によるエネルギーマネジメントの導入等が検討されているが、民生部門においては同じ性能の住宅・機器を使用しているも居住者の行動の差異によってエネルギー消費に与える影響は大きく変わる。そのため、これらの対策によるエネルギー消費削減量を正確に推計するにあたっては、現状のエネルギー消費の実態を世帯間のエネルギー消費の差異発生要因を含めて明らかにすることが重要である。

以上の背景から、本研究ではまず環境省の家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査²⁾(以下、家庭 CO₂ 統計)の個票データを活用して、世帯特性と機器所有の関係をモデル化するとともに、筆者らが別途開発した湯はり頻度モデル³⁾、給湯・暖冷房ストック分布推計モデル⁴⁾を組み合わせることで、需要推計モデルの世帯間のばらつき再現性について改善を図った。本研究で開発された需要推計モデル(Total Residential End-use Energy Simulation : 以下、TREES モデル)

を新モデルと位置づけ、筆者らの以前のモデル開発段階におけるいくつかのバージョンを本論文ではまとめて旧モデル⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾と呼び、新モデルと精度の比較を行う。さらに、この TREES モデルを家庭 CO₂ 統計調査対象世帯に適用し、実態値と比較することでその精度を評価することに加えて、TREES モデルにおいて考慮しがたいエネルギー消費の分散要因の評価を行うことを目的とする。

世帯特性と家庭の電力消費量の関係性を分析した研究は数多くある。家庭のエネルギー消費量は①世帯特性による行動の差異と、②世帯特性から紐づく機器保有状況(台数・仕様)の両面から決定されると考えられる。安藤ら¹⁰⁾の研究では全電化住宅を対象とした測定データに基づき、建物・世帯特性が電力消費に及ぼす影響の大きさが分析されている。井上ら¹¹⁾は全国規模のアンケート調査に基づく分析により、世帯特性と保有機器台数の関係、エネルギー消費への寄与度を明らかにしているが、機器仕様の差異に関する検討まではなされていない。従来のエネルギーシミュレーション⁹⁾の多くにおいて、各世帯の機器保有状況のばらつき再現性は不十分であり、本論文では①・②両面のアプローチを取っているところに特徴がある。さらに、筆者らはエネルギーシミュレーション結果を各種統計値と比較し、地域別また世帯構成別平均値でその精度を示してきた⁶⁾。

一方、個々の世帯単位でエネルギー消費の実態を把握するためには、統計調査対象世帯のエネルギー消費影響要因を

Corresponding author; Haruka Matoba,

E-mail: matoba@ue.sec.eng.osaka-u.ac.jp

*大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻

〒565-0871 吹田市山田丘 2-1 M3 棟 322

第 38 回エネルギー・資源学会研究発表会、第 36 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンスの内容をもとに作成した

再現したシミュレーション結果を、世帯毎に実測値と比較する必要がある。このように、シミュレーションモデルと統計調査を組み合わせて各世帯のエネルギー消費の成り立ちを大規模に分析した研究例はこれまで見られない。

2. 家電機器保有状況予測モデルの開発

本章は家庭 CO₂ 統計を用い世帯特性と機器保有状況を回帰し、推計された保有確率から TREES モデルの入力値となる機器保有状況(台数・性能)を決定する過程を述べる。

2.1 使用データの概要

環境省の家庭 CO₂ 統計の概要を表 1 に示す。このデータから世帯特性と機器保有状況の相関を明らかにし、予測モデルを構築する。対象機器は家電機器の中で消費電力量の特に大きいテレビと冷蔵庫¹²⁾とした。

表 1 家庭 CO₂ 統計調査概要

対象地域	日本全国	
調査時期	2014 年 10 月~2015 年 9 月	
調査世帯数	16402 世帯	
集計世帯数	11632 世帯(有効回答世帯)	
調査方法	調査員・インターネットモニタ調査	
調査項目	地域情報	都道府県, 都市階級
	居住者情報	世帯主との続柄, 年齢, 仕事有無, 世帯人数, 世帯年収
	住宅情報	建築時期, 居室数, 延床面積, 住宅所有, 住宅形式, 二重サッシの有無
	機器保有	保有台数, 製造時期, 大きさ, 種類
	エネルギー消費量	電気, ガス, 灯油, ガソリン, 軽油(月別・年別)
	省エネ行動	機器使用, 入浴, 調理等に関する全 18 項目

2.2 分析手順

本研究では世帯特性と機器保有状況の関係性に注目し、表 1 の調査項目の地域、居住者、住宅情報を説明変数候補とし、機器の保有台数、製造時期、大きさ(TV については液晶・プラズマ・ブラウン管といった種類も)を目的変数に多項ロジスティック回帰分析を行った。保有台数については順序ありの多項ロジスティック回帰分析を行い、そのほかの目的変数の場合には順序なしの回帰分析を行った。この手法は、例えば製造時期であれば 1 台目のテレビは 2000 年以前製である確率が 10%、2011 年以降製である確率が 70%、というように目的変数の選択肢(カテゴリ)ごとの確率を算出でき、さらに複数の説明変数が採用可能であるため、様々な世帯特性を考慮し世帯の機器保有状況のばらつ

きを再現できる。説明変数の選択方法を以下に示す。

- 1) 表 1 の地域情報、居住者情報、住宅情報すべてをダミー変数化し、説明変数候補として回帰分析を行い、目的変数との相関が小さい変数は除去する。
- 2) 説明変数候補の区分の集約を検討する。ダミー変数の基準を変更して回帰分析を行い、区分の違いによる影響を確認し、傾向が有意に異なる区分同士はまとめる等説明変数を整理する。
- 3) ステップワイズ法により変数を絞る。
- 4) クラメールの連関係数により多重共線性を除去する。クラメールの連関係数は $0 \leq V \leq 1$ の値をとり、1 に近いほど変数同士の関連が強いことを表す指標である¹³⁾。本研究では 0.5 以上を多重共線性ありと判定した。

2.3 回帰分析結果

テレビの保有台数と製造時期、冷蔵庫の保有台数と容量についての回帰分析結果を表 2~表 5 に示す。表には選択された説明変数とその偏回帰係数、p 値を示す。表中の棒グラフは偏回帰係数の正負(赤が負、青が正)とその大きさを表している。保有台数(表 2)において偏回帰係数が正であれば、その世帯特性を持つ世帯では保有台数が増加することを表す。また、製造時期(表 3)については偏回帰係数が正であり値が大きいほど、各基準カテゴリー(~2000 年)と比較してそのカテゴリーが選択されやすいことを表現している。大きさ(表 4、基準カテゴリー: 401~450L)についても同様である。例えば、表 4 で世帯人数 1 人の世帯では基準カテゴリーである 401~450L よりも小さいサイズが選択されやすく、大きいサイズは選択されにくいことを表す。

表 2 に示したテレビの保有台数では、延床面積が大きくなる、高収入である、多人数世帯であるほど有意に保有台数が増加する。同様の傾向が表 5 の冷蔵庫の保有台数についても見られることから、機器の保有台数は設置可能な部屋数や同時に使用する人数によって変化すると考えられる。表 3 のテレビの製造時期については、2011 年の地上デジタル放送への移行の影響もあり多くの世帯で比較的新しいテレビが使用されている。その中でも比較的古い機器が残っているのは世帯年収が低い、世帯主が高齢者、建築時期が古いといった特徴を持っている世帯であり、機器の買い替えに対して消極的な世帯特性と、引越しのタイミングで機器を買い替える傾向の影響と考えられる。表 4 の冷蔵庫の大きさについては、世帯人数の多い世帯、また世帯年収の高い世帯で大容量になっていることから、居住者の人数および、経済状況やライフスタイルに合わせて容量を決定している世帯が多いことが推察される。

表2 回帰分析結果・テレビ保有台数

	偏回帰係数	p値		偏回帰係数	p値
1 2(切片)	0.21	**	高齢者あり	0.88	***
2 3(切片)	2.19	***	未成年あり	-0.83	***
3 4(切片)	3.86	***	三世帯	1.10	***
4 5(切片)	5.18	***	世帯年収_250万円以下	-0.24	***
東北	-0.11		世帯年収_500~750万円	0.18	**
北陸	0.37	***	世帯年収_750~1000万円	0.32	***
東海	0.17	*	世帯年収_1000万円以上	0.22	**
近畿	0.22	**	世帯主年齢_39歳以下	-0.64	***
中国	0.29	***	世帯主年齢_50代	0.29	***
四国	0.31	***	世帯主年齢_60~64歳	0.51	***
九州	-0.12		集合	-0.57	***
沖縄	-0.72	***	建築時期_1981年~1990年	0.06	
小都市	0.11		延床面積_40m2未満	-1.03	***
世帯人数_1人	-0.84	***	延床面積_40~60m2	-0.31	***
世帯人数_3人	0.80	***	延床面積_100~120m2	0.24	***
世帯人数_4人	1.01	***	延床面積_120~150m2	0.44	***
世帯人数_5人	1.21	***	延床面積_150~200m2	0.71	***
世帯人数_6人以上	1.59	***	延床面積_200m2以上	0.87	***

表3 回帰分析結果・テレビ1台目製造時期

	2001~2005年		2006~2010年		2011年~	
	偏回帰係数	p値	偏回帰係数	p値	偏回帰係数	p値
(切片)	0.84	***	2.62	***	2.06	***
沖縄	0.16	*	0.15	*	0.18	*
十歳未満あり	0.2	*	0.24	**	0.19	*
世帯年収_250万円以下	-0.15	*	-0.16	**	-0.05	
世帯年収_250~500万円	-0.15	*	-0.2	***	-0.16	**
世帯主年齢_39歳以下	-0.02		0.12		0.11	
世帯主年齢_65~74歳	-0.02		-0.06		-0.11	*
世帯主年齢_75歳以上	-0.05		-0.13	**	-0.11	*
賃貸その他	0.1		0.14		0.24	***
建築時期_1981~1990年	-0.17	**	-0.05		-0.06	
建築時期_2001年~2005年	0.38	***	0.22	**	0.21	**
建築時期_2006年~2010年	0.08		0.32	***	0.14	
建築時期_2011年以降	0.02		0.17		0.37	***
延床面積_40~60m2	-0.17	*	-0.06		-0.05	

(※基準カテゴリー：~2000年)

表4 回帰分析結果・冷蔵庫1台目大きさ

	~140L		201~250L		301~350L		501L~	
	偏回帰係数	p値	偏回帰係数	p値	偏回帰係数	p値	偏回帰係数	p値
(切片)	-1.68	***	-2.13	***	-1.3	***	-1.49	***
近畿	-0.11		-0.06		-0.4	*	0.07	
中国	-0.16		-0.09		-0.28		0.46	***
四国	0.08		-0.24		-0.1		0.05	
九州	-0.22		0.02		-0.19		0.32	*
沖縄	-0.29		0.17		-0.22		0.46	*
世帯人数_1人	1.49	***	1.02	***	0.85	***	-0.54	*
世帯人数_3人	-0.42	**	-0.68	**	0.21		0.27	*
世帯人数_4人	-0.6	**	-1.32	***	-0.04		0.48	***
世帯人数_5人	-0.64	*	-1.54	*	0.51	*	1.05	***
世帯人数_6人以上	-0.58		-0.57		-0.25		0.74	***
高齢者のみ	-0.81	***	-0.47	*	-0.1		0.11	
十歳未満あり	0.52	**	0.75	*	-0.14		-0.07	
世帯年収_500~750万円	0.01		-0.42	*	-0.43	**	0.27	*
世帯年収_750~1000万円	0.08		-0.82	**	-0.63	***	0.36	**
世帯年収_1000万円以上	0.22		-0.47	**	-0.67	**	0.62	***
居室数_1室	3.97	***	2.52	***	1.7	*	0.5	
居室数_2室	1.69	***	1.38	***	0.92	***	0.07	
居室数_3室	0.57	***	0.43		0.41	**	-0.3	*
居室数_4室	0.03		0.23		0.18		-0.2	*
賃貸その他	0.37	**	0.55	**	0.27		-0.36	*
建築時期_2001年以降	0.04		-0.84	***	-0.07		0.58	***
延床面積_200m2以上	0.14		0.85	*	-0.18		0.25	

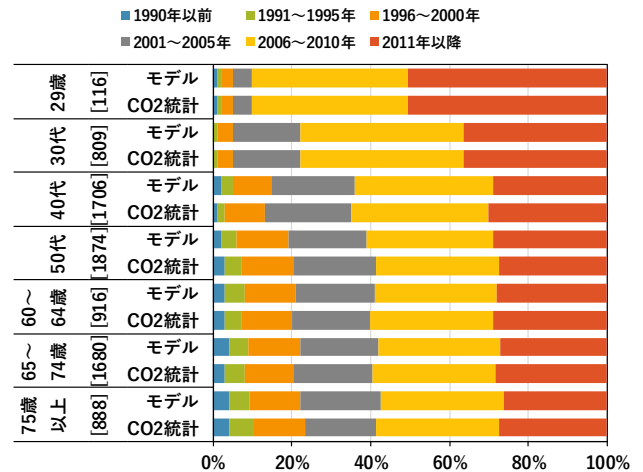
(※基準カテゴリー：401~450L)

表5 回帰分析結果・冷蔵庫保有台数

	偏回帰係数	p値		偏回帰係数	p値
0 1(切片)	-6.74	***	子供の数_0人	0.56	***
1 2(切片)	1.99	***	高齢者あり	0.60	***
北海道	0.53	***	三世帯	0.75	***
近畿	-0.25	*	世帯年収_1000万円以上	0.28	**
四国	0.21		世帯主年齢_40代以下	-0.87	***
九州	0.28	**	居室数_6室以上	0.54	***
大都市	-0.18	*	集合	-0.93	***
小都市	0.28	***	建築時期_1970年以前	0.43	***
世帯人数_1人	-1.39	***	延床面積_120~150m2	0.26	**
世帯人数_2人	-0.58	***	延床面積_150~200m2	0.63	***
世帯人数_5人以上	0.27	*	延床面積_200m2以上	1.13	***

2.4 回帰モデルの精度検証

回帰モデルの精度検証を以下の2つの方法により行った。1つ目は、全ての目的変数の全てのカテゴリーについてホスマー・レメショウ検定を適用し、p値が0.05を上回っていることを確認した。もう1つの方法として、回帰モデルによって得られた保有台数、製造時期、大きさ、種類の保有確率分布が、家庭CO2統計調査から集計した世帯の保有確率分布と一致するかを検証した。図1には冷蔵庫製造時期の世帯主年齢別世帯数割合を示す。世帯主年齢が高いほど製造時期が古くなるという家庭CO2統計の傾向をモデルにおいても表現できている。これらの結果より、この回帰モデルの適合性に問題は無いと判断した。



(※[]内数字:カテゴリーサンプル数)

図1 世帯主年齢別冷蔵庫1台目製造時期

2.5 各世帯の機器保有状況の決定

構築した回帰モデルより、各世帯における機器の保有台数・製造時期・大きさ・種類の累積確率をそれぞれ算出する。累積確率とは各目的変数のカテゴリーごとの保有確率を積算したものである。まず、保有台数の累積確率を一様乱数と比較することで確率的にその世帯の機器保有台数を決定する。その後、同様方法により機器1台毎に製造時期・

大きさ・種類を確率的に決定した。さらに、機器の製造時期と大きさによって定格消費電力や待機時消費電力に差が生まれることに着目し、製造時期と大きさの階級の組み合わせに対応する消費電力の代表値を設定した。代表値は、公表されている省エネ能力カタログ¹⁴⁾を参考に、各カテゴリーの定格消費電力と待機電力の平均値を求めることで決定した。旧モデルでは各年の出荷台数、機器寿命関数等から推計した一律のストック平均効率に、各都道府県別の世帯あたり機器保有数を乗じた値をその機器の消費電力として設定しているため、**図2**に示すように、回帰モデルでは旧モデルと比較して保有機器性能が世帯間で大きくばらつきを持つことが表現可能となっている。

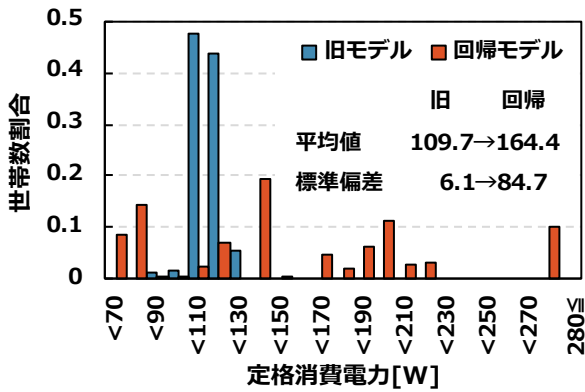


図2 モデル間比較によるテレビ性能のばらつき (テレビ1台目)

3. TREESモデルへの応用

3.1 TREESモデル概要

本研究では、TREESモデルを用いて家庭のエネルギー消費量を推計する。TREESモデルとは筆者らが開発してきた旧モデル⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾をベースに世帯間のばらつきの再現性をより改善したモデルを指す。世帯単位のエネルギー消費量推計フローを**図3**に示す。まず、各都道府県の世帯の0.03%を代表世帯として抽出し、世帯ごとに家族構成、世帯員の性別・就業形態、住宅形式や延べ床面積等の世帯属性情報を国勢調査及び住宅土地統計調査から確率的に決定する。この情報を基に、前節で述べた機器保有状況予測モデルを含むデータ作成モデルからシミュレーションに入力する各世帯データを作成し、代表世帯それぞれについてエネルギーシミュレーションを行う。最後にすべての代表世帯の結果を合計し、0.03%で割り戻すことで都道府県全体、更には日本全体のエネルギー消費量が推計できる。

TREESモデルでは居住者行動モデル¹⁵⁾を用い、対象世帯の居住者一人ひとりについて属性に応じた行動スケジュールが社会生活基本調査¹⁶⁾に基づき生成され、そこから機器の稼働状態を決定している。気象条件については、各都道府県の代表都市で観測された対象期間の1分間隔観測デー

タ(気温、全天日射量等の観測結果)と各地点において3時間ごとに観測された雲量データを用いて設定されている。また暖冷房のエネルギー消費は気象データ、住宅の間取り情報等を入力条件として、熱負荷計算に基づいて推計される。このように、本モデルでは現実の家庭でエネルギーが消費されるプロセスを再現しており、世帯によるエネルギー需要の差異の考慮、現実的な機器の稼働状況の想定に基づく推計が可能である。

本研究においては**図3**のデータ作成モデルのうち第2章で家電機器保有状況予測モデルを開発したが、同様に湯はり頻度³⁾、給湯・暖冷房ストック分布⁴⁾についても世帯のばらつきをより表現可能なモデルが開発されている。TREESモデルと旧モデルには大きく2つの相違点がある。1点目に、旧モデルは抽出された各代表世帯を912類型(家族類型・住宅の建て方・延床面積・住宅熱性能別)のモデル世帯いずれかに当てはめていたのに対して、TREESモデルは類型化を行わず、世帯毎にシミュレーションが可能である。2点目は家電機器に関して、旧モデルでは部屋数、世帯人数、行動により機器のエネルギー消費を再現し、保有台数や機器性能は都道府県毎に一律であったのに対して、TREESモデルではエネルギー効率を2.5節に示す手順で設定することにより、世帯の多様性に紐づく機器保有状況のばらつきを再現している点である。

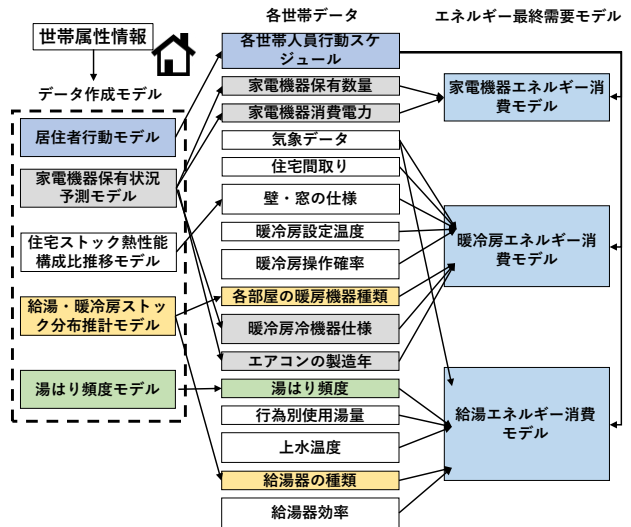


図3 TREESモデルのフロー

3.2 機器保有状況のばらつき考慮による効果

TREESモデルを用いてエネルギー消費量を推計した結果を、機器保有のばらつきを考慮しない場合(旧モデル)と比較し、テレビを例に**図4**に示す。製造年の古いテレビの残存、保有台数が多い等の多消費世帯の特徴を再現したことで平均値が385.4kWhから433.3kWhに上昇し、標準偏差も旧モデルに比べて大きくなった。これまで旧モデルにおいては、ロードカーブ予測において未特定分として1年を

通じて 70W/世帯をシミュレーション結果に加算することで、キャリブレーションを行っていた⁹⁾。TREES モデルにおけるテレビと冷蔵庫の消費量増加は旧モデルと比較して年間 197kWh であり、これは旧モデルにおける未特定分年間 613.2kWh に対して約 32%の解消に寄与する結果である。

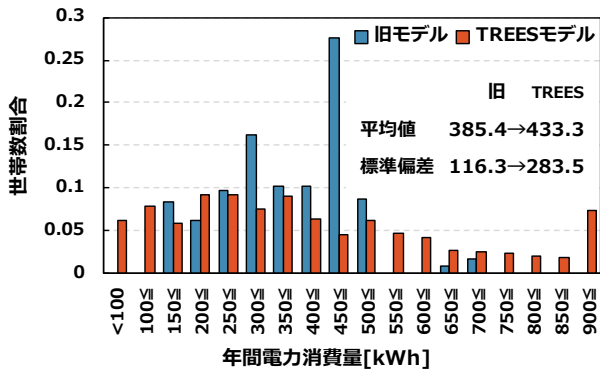


図4 テレビの年間電力消費量

3.3 TREES モデルの精度検証

図3に示すように、TREES モデルは世帯属性情報を基に第2章で述べた機器保有状況予測モデルを含む様々なデータ作成モデルから各世帯データの特徴を反映したデータを作成し、シミュレーションの入力値とする構造である。つまり、世帯属性情報に基づいてその世帯のエネルギー消費量が推計可能となる。そこで、表1に示す地域、居住者、住宅情報を基に、家庭 CO₂ 統計調査対象世帯に対して TREES モデルを適用し、シミュレーション結果を統計記載の回答値と比較し、TREES モデルの精度検証を行った。精度検証の結果を世帯毎のプロットとして両対数グラフにより図5に示す。図5より散布点は概ね対角線上に集中しており、ある程度の精度での予測が可能であることが示された。モデルの当てはまりの良さを表す指標である RMSE(二乗平均平方根誤差¹⁰⁾の値は 18.0GJ であった。この結果のばらつき誤差には大きく2つの要因があると考えられる。1つ目はデータ作成モデルによる乱数の影響である。2.5節でも述べたように、機器情報は回帰モデルにより確率的に決定されており、家電機器以外の住宅や暖房、給湯機器ストックについても同様の方法により決定されているため、実際に保有されている機器とは異なる機器がシミュレーション内で選択されている可能性がある。2つ目は、結果を比較した回答値には現在の TREES モデルでは考慮できない非合理的なエネルギー消費が含まれる点である。現実ではテレビや照明の不使用时のつけっぱなし等の無駄なエネルギー利用が存在するが、モデル上では考慮されていない。

家庭 CO₂ 統計においては、テレビと冷蔵庫のみならず、暖房や給湯器についても機器情報が調査されており、その情報を直接 TREES モデルの入力値とすることも可能である。この方法により、上記の1点目の要因を除外した検討

が可能であり、その結果については5章で述べる。

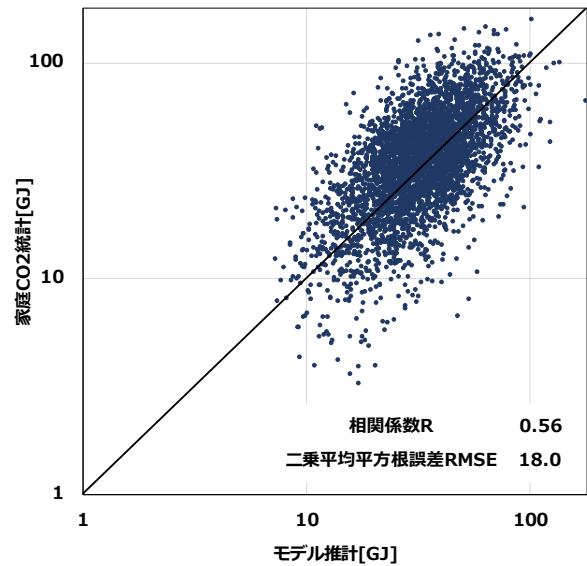


図5 世帯毎年間二次エネルギー消費量分布比較 (データ作成モデル使用)

4. 家庭部門エネルギー消費量推計結果

本章では、TREES モデルのエネルギー消費量推計結果の分析を通して、機器保有予測モデルを開発したことによる知見を述べる。

4.1 エネルギー消費量内訳

図6には近畿地方の代表世帯 2652 世帯のうち、4人世帯のみを抽出した 403 世帯の推計結果について、年間一次エネルギー消費量の大きい世帯から降順にその内訳を示した。世帯のエネルギー消費に大きな影響を及ぼす気象条件(地域)と世帯人数を揃えたにも関わらず、最大で約4倍の差が生じている。エネルギー消費量の大きい多消費世帯の特徴を探るため表6に示すようにエネルギー消費量の大きい順に世帯をグループ分けした。図7に各グループの用途別エネルギー消費量の世帯平均を示す。まず、Aグループは他世帯に比べてすべての用途でエネルギー消費量が大きく、特に給湯用途の消費量が大きいことで全体の需要が引き上げられている。これらの世帯ではエネルギー効率の悪い電気温水器が使用されていることが要因である。Aグループに次いでエネルギー消費量の多いBグループは給湯以外の用途については、Aグループと大きな差は見られない。つまり、Bグループは年間一次エネルギー消費量のうち、家電機器の保有や使用による消費量の占める割合が他世帯よりも大きい世帯であると言える。Cグループについては、すべての用途でエネルギー消費量が少なかった。

表6 年間エネルギー消費量別世帯グループ分け

	Aグループ	Bグループ	Cグループ
エネルギー消費量	上位45世帯	上位91~135世帯	下位45世帯

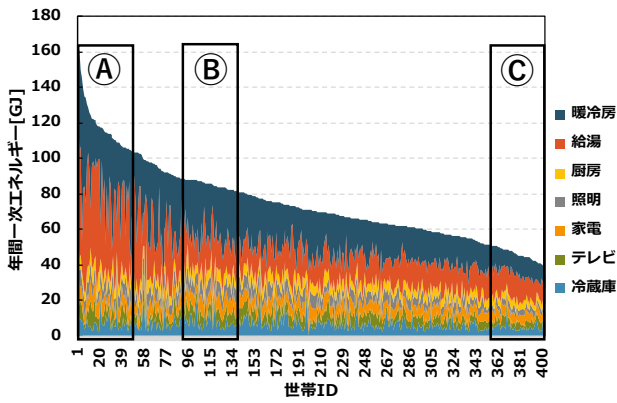


図6 世帯の年間一次エネルギー消費量の内訳

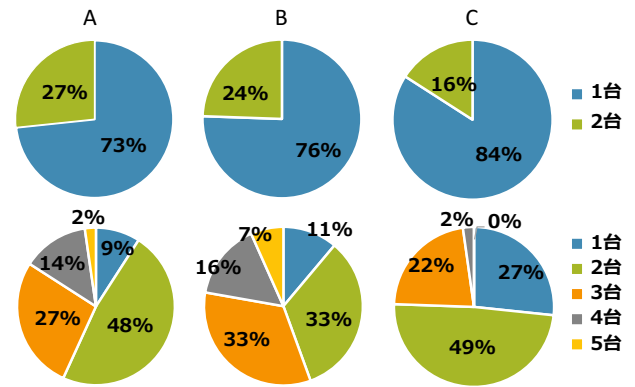


図8 各グループにおける機器保有数量 (上段:冷蔵庫 下段:テレビ)

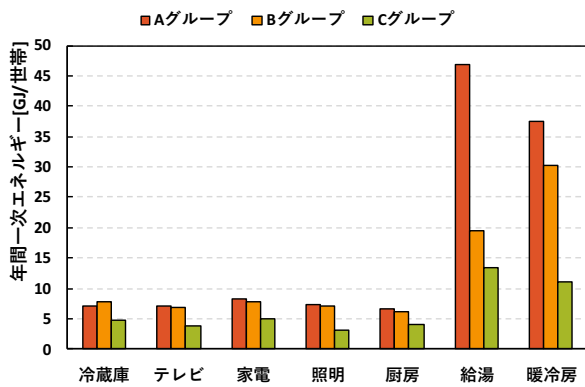


図7 用途別一次エネルギー消費量世帯平均

4.2 機器保有数量の影響

図8に各グループの冷蔵庫とテレビの保有数量の割合を示す。まず、テレビについてCグループでは7割強の世帯で保有数量が2台以下であるのに対し、A,Bグループでは世帯の半数近くが3台以上保有している。また、A,Bグループにおいては冷蔵庫を2台保有している世帯が2割以上存在する。各グループの機器保有数量について、平均値の差の多重比較検定¹⁶⁾を行った。その結果、テレビについてはグループA-C間、B-C間で有意差が見られ、A,Bグループでは機器の保有数量が多いことが確認された。冷蔵庫については有意水準5%で帰無仮説を棄却できず、グループ間の保有数量に有意差があるとは言えなかったが、冷蔵庫は常時稼働している機器であり、また消費電力が大きいことから、複数台所有することによる全体のエネルギー消費量に与える影響は大きいと考えられる。

以上のことから、多消費世帯の成り立ちの1つの要因は機器保有数量であり、CO₂排出量削減のためには家電機器保有数量を制限することも重要であると言える¹⁷⁾。

例えば、家電機器保有状況予測モデルより、全世界帯で2台目と判定された冷蔵庫のみの総電力消費量を推計した結果、消費量は年間45.3PJであり、これは我が国の家庭部門の全エネルギー消費量の1.5%に相当する。

4.3 多消費世帯に共通する世帯特性

図7によれば、本研究で世帯特性による影響を評価したテレビと冷蔵庫だけでなく、その他の用途についてもBグループとCグループには差があり、これら用途すべてに渡ってエネルギー消費の増要因に関わる世帯特性が共通していることがうかがえる。図9に世帯主年齢、高齢者の有無、延床面積について各グループ別にその世帯割合を示す。図9より多消費世帯であるA,Bグループは居住者の年齢層が高く、また広い住宅であることが分かる。特に、照明や暖冷房用途で消費量に差が見られるのは、高齢者など在宅時間の長い世帯人員の存在により、機器稼働時間にも差が生じているためであると考えられる。Cグループについては賃貸集合住宅に暮らす若年夫婦と未就学児2人からなる世帯が多く、A,Bグループに比べ同時刻に異なる部屋で行動する人数が少ないことも消費量の少ない要因として考えられる。このように、テレビや冷蔵庫といった機器の保有台数や単体のエネルギー消費量を大きくする世帯特性は、その他の用途についてもエネルギー消費を増加させる要因として働くことが示された。

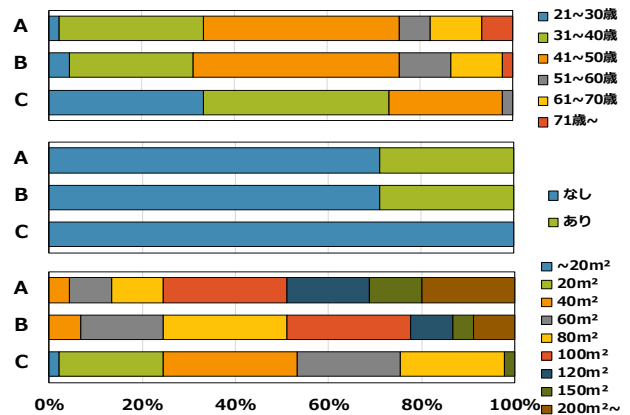


図9 各グループにおける世帯特性 (上段:世帯主年齢 中段:高齢者の有無 下段:延床面積)

5. シミュレーション結果と家庭 CO₂ 統計の比較

本章では TREES モデルを用いて、家庭 CO₂ 統計で調査されている世帯のエネルギー消費形態を、できるだけ機器保有モデル等を使用せず忠実に再現し、結果を記載されている消費量と比較する。これにより、モデルの再現性ととも、モデルで考慮している要因でいかに世帯のエネルギー消費のばらつきが再現できるか検証を行う。

5.1 シミュレーション条件

計算条件を表7に示す。3.3節では世帯情報のみを TREES モデルの入力値としたが、本章ではデータ作成モデルによる乱数の影響を除くため、機器保有情報についても可能な限り調査情報をそのまま入力値とすることとした。ただし、エアコンについては家庭 CO₂ 統計に保有台数と製造時期の記載があるものの、シミュレーションでは全世帯の全居室にエアコンを設置する想定としており、外気温で決まる暖冷房期間、室温で決まるエアコンの ON/OFF によって地域差を表現している。暖房機器については、各暖房機器の使用台数と最も頻繁に使用するものを回答する設問があるが、各部屋の正確な使用機器までは判別不可能であったため、最もよく使用すると回答した機器をすべての部屋で使用する設定とした。また、断熱性能と湯はり頻度（夏冬の回答はあるが中間期はないため）については各推計モデルにより決定した。

家庭 CO₂ 統計全集計世帯数 11632 世帯のうち、世帯情報や表7の項目いずれかにわからない・不明と回答した世帯は本研究の推計対象から除いている。また、TREES モデルでは木質系燃料を使用するストーブ類やセントラル暖房システム、太陽熱温水器等はモデル内で考慮されていないため、それらの回答があった世帯についても対象から外した。太陽光発電はモデル内で考慮可能であり、家庭 CO₂ 統計には発電量や買電量の設問があるものの、正確な自家消費量は特定できなかったため、今回は太陽光発電を導入している世帯についても対象外としている。以上のことから本研究の推計で用いた世帯数は 4023 世帯となった。

表7 TREES モデル入力項目と条件

項目	TREES モデル入力値
テレビ	回答された保有状況 (最大保有台数テレビ:3台 冷蔵庫:2台)
冷蔵庫	
エアコン	エアコンモデル ¹⁸⁾ により推計
その他機器	機器ストックモデル ¹⁹⁾ により推計
コンロ・給湯器種類	使用機器として回答した種類
暖房機器	最もよく使用すると回答した種類
断熱性能	各推計モデル ³⁾²⁰⁾ により世帯・住宅
湯はり頻度	情報から推計

5.2 エネルギー消費ばらつきの再現性

エネルギー消費の世帯間のばらつきの再現性を確認するため、年間二次エネルギー消費量の分布を推計値と回答値を比較して図10に示す。シミュレーションによる推計値は回答値よりも 40GJ 以下の世帯が多い。そのため、平均値でもシミュレーション値が回答値よりやや小さいという結果となった。これは家庭 CO₂ 統計には融雪用や農業用などの家庭部門以外のエネルギー消費量が含まれている等の理由で極端にエネルギー消費量の大きな世帯を再現できないことが原因の1つとして考えられ、その点を考慮すれば図10の結果は全体的な消費量のばらつきを概ね良く表現できていると考えられる。

さらに、本モデルによる推計が世帯1件1件のエネルギー消費構造を表現できていることを確認するために、推計値と回答値を比較して図5と同様に散布図により図11に示す。モデルの当てはまりの良さを表す指標である RMSE²⁰⁾ の値は 16.7GJ であり、3.3節の推計結果よりも向上した。これは、データ作成モデルによる乱数の影響を極力除いたためと考えられる。しかし、誤差にはモデルで用いた乱数以外の要因が依然として存在することが示唆された。さらに、式(1)に示す誤差率を両者のずれの指標とし、図12には誤差率別の世帯数分布を示す。図12より、誤差率±50%を超える過大推計、過小推計である世帯が一定数存在していることや、全体的に少し過小推計側に偏っていることが見受けられるが、約8割の世帯が誤差率±50%以内に入っていることから、両者は概ねよく一致していると考えられる。つまり、一般的な世帯については TREES モデルを使用することで高い精度でエネルギー消費の推計が可能であると判断できる。

$$\text{誤差率}[\%] = \frac{a-b}{b} \times 100 \quad (1)$$

a: TREES による二次エネルギー消費量の推計値
b: 家庭 CO₂ 統計記載のエネルギー消費量

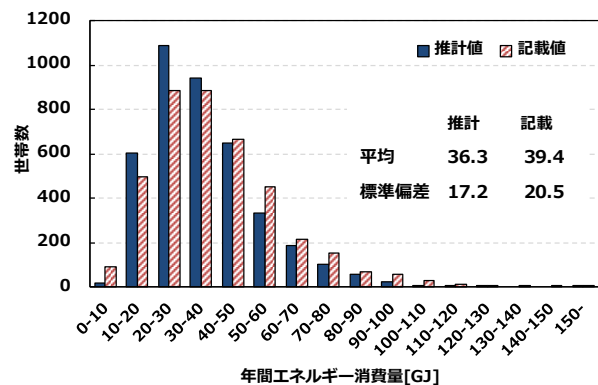


図10 年間二次エネルギー消費量ばらつき比較

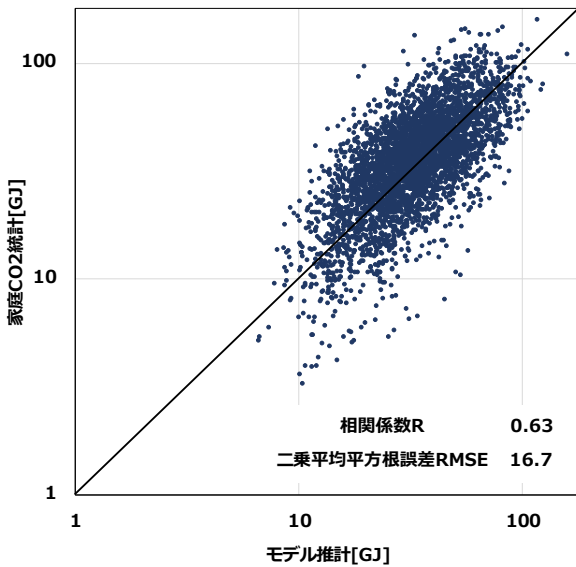


図 11 世帯毎年間二次エネルギー消費量分布比較 (データ作成モデル不使用)

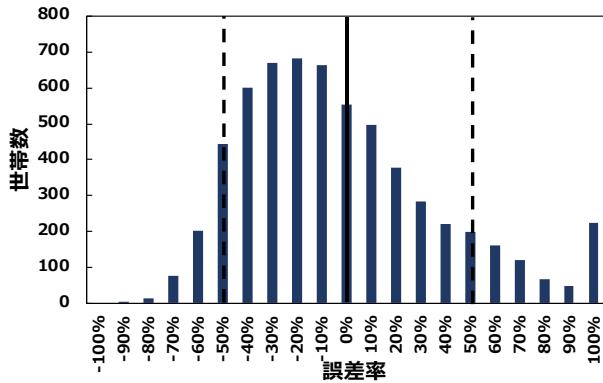


図 12 誤差率別世帯数分布

度で、誤差率と機器のエネルギー源の間に特徴的な傾向は見られなかった。つまり、暖房と給湯にどのような機器を使用していたとしても、それが推計上の誤差の大きな要因ではないと言える。

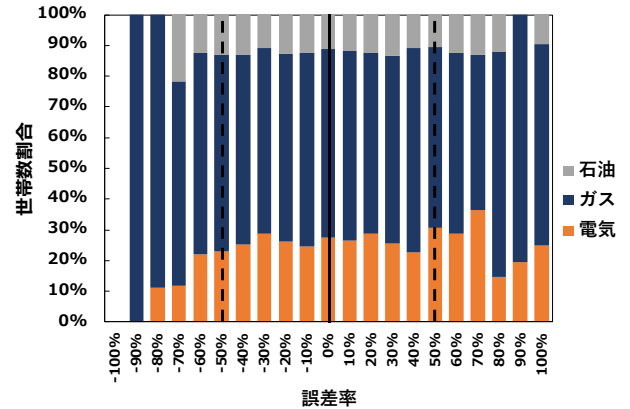
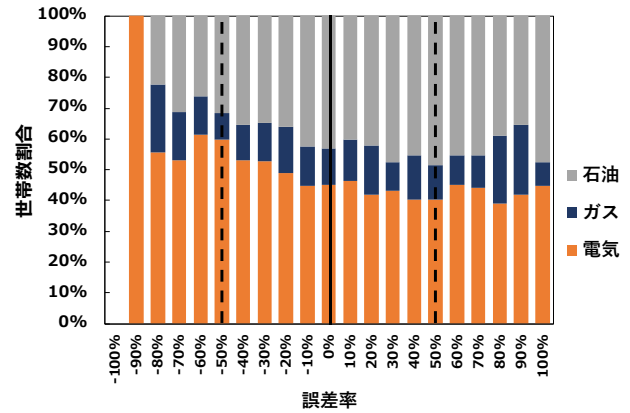


図 13 誤差率別使用機器エネルギー源割合 (上図：暖房 下図：給湯)

6. 誤差要因の評価

推計値と回答値を世帯毎に比較した結果、両者は概ねよく一致したが、誤差の大きい世帯は一定数存在していた。この誤差の要因を評価することによって、TREES モデル自体のエラーまたは TREES モデルでは表現しきれない実世帯での非合理的なエネルギー消費の実態が明らかになると考えられる。誤差要因の仮説として以下に3つを挙げ、順に検証を行った。

6.1 燃料系機器による過小推計の可能性

北海道のような寒冷地域ではその他の地域に比べて、暖房設定温度が高い、即暖性の高い燃料系(石油・ガス)の暖房機器が使用されるといった特徴があると考えられる。例えば断熱性能の悪い住宅で、燃料系機器による非効率な暖房を行う世帯が存在すれば、モデルでは表現できず過小推計の要因となる。そこで、TREES モデルに入力した推計対象世帯の使用暖房機器と使用給湯機器について、誤差率別にそのエネルギー源割合を図 13 に示す。結果は想定に反して、過小推計側で若干電気系の暖房機器が多いといった程

6.2 居住者の行動

推計に用いた全 4023 世帯を表 8 のように誤差率の範囲でグループ分けした。α グループは回答値よりもモデルでエネルギー消費量が過小に推計された世帯であり、γ グループはその逆である。家庭 CO₂ 統計では保有状況のみならず、機器の使用状況や習慣を調査する設問がある。ここでは冬季湯はり回数[回/週]・暖房の仕方・省エネルギー行動実施率(全 18 項目のうち実施している項目数の割合)について、その傾向を誤差率グループ別に図 14 に示す。

図 14 より β グループの世帯を推計が可能な一般的、平均的な世帯とするならば、過小推計の α グループは週における湯はり回数が多く、暖房時間も長い。さらには、省エネルギー行動実施率は低く、総じて想定よりもエネルギーを多く消費する傾向にあることが分かる。また過大推計の γ グループはその逆にエネルギー消費行動が少なく、省エネルギーへの意識も高いグループである傾向がある。本章のシミュレーションでは一週間の湯はり回数については湯はり頻度モデル³⁾により確率的に決定しているため、乱数

の影響から偶然実態と予測が外れてしまった世帯が α や γ グループに集中したとも見えるが、湯はり日数が多い世帯は暖房やその他の行動についてもエネルギーを多く消費しており、世帯属性の差のみではなく、多消費世帯は全般的にエネルギー消費を増やすような行動を多く取る傾向にあることが示唆された。つまり、TREES モデルによって推計しきれない各世帯の誤差は、モデル化が困難な個人やその世帯家族のエネルギー消費行動の差に起因することが示された。また、このような検証を可能にする調査が家庭 CO₂ 統計ではなされているところに大きな意義があると言える。

表 8 誤差率別グループの分け方

	α (過小推計)	β (誤差小)	γ (過大推計)
誤差率	-50%以下	±50%以内	+50%以上
世帯数	212 世帯	3283 世帯	528 世帯

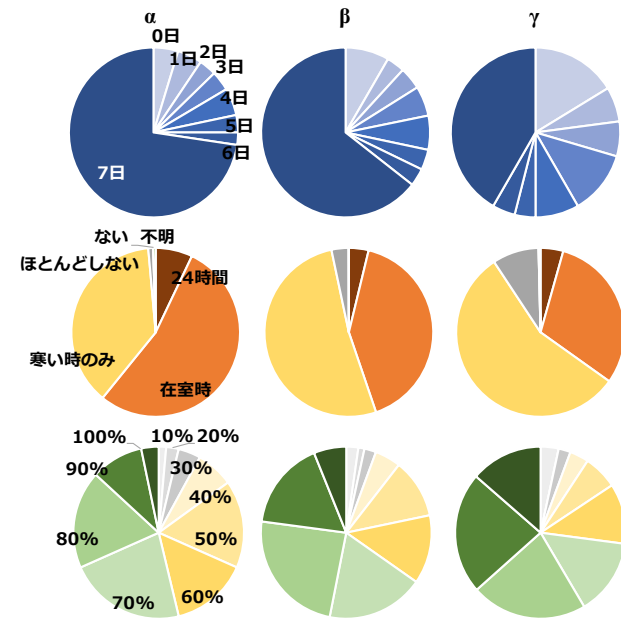


図 14 各グループ別行動の差(上図から冬季湯はり日数・暖房の仕方・省エネ行動実施率)

6.3 未考慮機器の存在

家庭 CO₂ 統計の調査対象機器には含まれているが、TREES モデルでは未考慮の機器を表 9 に示す。家庭 CO₂ 統計の調査結果より、加湿器、除湿器、空気清浄機、浴室乾燥機におけるこれら機器の保有率は全体で 20~30%とさほど高くはなかった。しかし、浴室乾燥機の消費電力は稼働状態により差はあるが 680~1250W とドライヤーと同程度の大きな消費電力を有し²¹⁾、また空気清浄機等は長時間稼働している可能性が高いと考えられる。さらに近年保有率が増加しているインターネットルーターやスマートフォンの充電機器等は、その単体の消費電力は小さいが、これら未考慮機器の電力消費量が積算されれば、一定の誤差要因

になる可能性はあると考えられる。この点については、機器保有状況や使用時間等について今後さらに調査、検討が必要である。

表 9 TREES モデルでの主な未考慮機器

種別	機器名
住宅機器	食器乾燥機(乾燥機能のみ)
生活家電	浴室乾燥機, 空気清浄機, 加湿器, 除湿器
デジタル機	インターネットルーター, 充電機器
調理機器	ガスオーブン, ウォーターサーバー

7. まとめ

本研究では、世帯の家電機器保有状況のばらつきを再現するとともに、湯はり頻度モデル、給湯・暖冷房ストック分布推計モデル等を組み合わせた家庭部門エネルギーエンドユースモデル TREES を用いて、エネルギー消費量を推計した。また、家庭 CO₂ 統計の標本世帯に TREES モデルを適用し、実際に記載されているエネルギー消費量と比較することで、TREES モデルにおいて表現しきれない分散要因を評価した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 世帯間の機器保有状況のばらつきを考慮したことによって、これまで表現できていなかった多消費世帯を再現可能となった。
- 多消費世帯は、他世帯と比較して各用途でエネルギー消費量が大きく、特に電気温水器使用による給湯エネルギー消費によって全体の需要が引き上げられている。また、家電機器保有数量は多消費世帯を生み出す要因の 1 つであり、CO₂ 排出量削減に向けて保有数量を制限することも有効である。
- 家電機器の電力消費量と世帯特性の関係性を評価したことで、その他すべての用途に渡って多消費世帯に共通する世帯特性の存在が明らかになった。
- 家庭 CO₂ 統計の調査情報を入力条件とすることで、実社会のエネルギー消費形態を世帯単位で概ね精度よく再現可能である。
- エネルギー消費量推計結果と回答値の最大の誤差要因は居住者の習慣や行動の差によるものであることが示された。過小推計のグループでは特にエネルギー多消費行動が多く、省エネへの意識も低い。過大推計のグループではその逆の傾向が現れた。
- 家庭 CO₂ 統計は世帯属性情報から、機器の保有状況、エネルギー消費量、さらに居住者の習慣や行動に至るまで、世帯間のエネルギー消費の差異発生要因の解明に必要な要素が揃っているところに大きな意義があると言える。

謝辞：本研究は JST-CREST JPMJCR15K4 による。また家庭用 CO₂ 統計個表の利用に当たっては、環境省およびエネルギー・資源学会 CO₂ 排出実態統計利用研究会の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 環境省;地球温暖化対策計画
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/taisaku.html>
 - 2) 環境省;家庭からの二酸化炭素排出量の推計に係る実態調査試験調査
 - 3) 松岡綾子, 山口容平, 上林由果, 下田吉之; 世帯属性情報に基づく湯はり頻度予測モデルの構築, 空気調和・衛生工学会論文集 264 (2019), pp.35-44.
 - 4) 森國太朗, 黒川祐輔, 松岡綾子, 下田吉之, 山口容平; 高効率給湯器大量導入に伴う暖房機器ストックの変化予測, 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(2019), pp.286-291.
 - 5) Yoshiyuki Shimoda, Takahiro Asahi, Ayako Taniguchi, Mminoru Mizuno; Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model. *Energy*, 32-9 (2007), pp.1617-1633.
 - 6) 松岡綾子, 杉山みなみ, 桃木貴志, 山口容平, 下田吉之; 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, (2019),pp.323-333
 - 7) 下田 吉之, 山口 幸男, 岡村 朋, 谷口 綾子, 山口 容平; 家庭用エネルギーエンドユースモデルを用いた我が国民生家庭部門の温室効果ガス削減ポテンシャル予測. *エネルギー・資源* 30 (3), pp.1-9, 2009.
 - 8) Yoshiyuki Shimoda, Yukio Yamaguchi, Tomo Okamura, Ayako Taniguchi, Yohei Yamaguchi; Prediction of greenhouse gas reduction potential in Japanese residential sector by residential energy end-use model. *Applied Energy*, 87 (6), pp.1944-1952, 2010.
 - 9) Ayako Taniguchi, Takuya Inoue, Masaya Otsuki, Yohei Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda, Akinobu Takami, Kanako Hanaoka: Estimation of the Contribution of the Residential Sector to Summer Peak Demand Reduction in Japan Using an Energy End-Use Simulation Model, *Energy and Buildings*, Volume 112, 15 January 2016, pp. 80-92.
 - 10) 安藤 元気, 村川 三郎, 西名 大作, 松永 裕介; 世帯全体の電力消費に及ぼす影響要因の分析—広島地域の全電化住宅を対象とした電力消費量に関する研究—, 日本建築学会環境系論文集 2012 年 77 巻 675 号 p. 409-416
 - 11) 井上隆, 水谷傑, 田中俊彦; 全国規模アンケートによる住宅内エネルギー消費の実態に関する研究：影響を及ぼす要因に関する分析 その 2, 日本建築学会環境系論文集 2006 年, 第 71 巻 606 号 p. 75-80
 - 12) 経済産業省・資源エネルギー庁; 機器別電気使用量の内訳
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/what/index.html(閲覧 2020.7.1)
 - 13) 水本 篤, 竹内 理, “研究論文における効果量の報告のために—基礎的概念と注意点—,” 2008.
http://mizumot.com/files/EffectSize_KELES31.pdf.
(閲覧 2020.5.20)
 - 14) 経済産業省・資源エネルギー庁; 省エネ性能カタログ
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/media/index.html(各年)(閲覧 2020.5.20)
 - 15) Yohei Yamaguchi and Yoshiyuki Shimoda; A stochastic model to predict occupants' activities at home for community-/urban-scale energy demand modelling, *Journal of Building Performance Simulation*, 10 (2017), 565-581.
 - 16) 総務省統計局：平成 18 年社会生活基本調査
 - 17) A. Grubler, C. Wilson, N. Bento, B. Boza-Kiss, V. Krey, D. L. McCollum, N. D. Rao, K. Riahi, J. Rogelj, S. De Stercke, J. Cullen, S. Frank, O. Fricko, F. Guo, M. Gidden, P. Havlik, D. Huppmann, G. Kieseewetter, P. Rafaj, W. Schoepp and H. Valin; A low energy demand scenario for meeting the 1.5°C target and sustainable development goals without negative emission technologies, *Nature Energy* 3, pp.515-527, 2018.
 - 18) 山崎知哉, 松岡綾子, 山口容平, 下田吉之; 家庭用エアコンの部分負荷特性の変遷を考慮したストック分布に基づく空調電力需要の推計, 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 (2019), pp. 274-279
 - 19) 谷口綾子; 家庭部門エネルギー最終需要予測モデルの開発と応用に関する研究, 大阪大学博士学位論文, 2015 年
 - 20) 谷口綾子, 下田吉之, 旭貴弘, 山口幸男; 日本の住宅エネルギー最終需要のモデル化と住宅熱性能改善の影響評価, 日本建築学会環境系論文集, 73-632 (2008-10) ,pp1217-1224
 - 21) 三菱電機; 暮らしと設備の業務支援サイト WIN2K, バス乾 [本体]1 部屋換気<標準>タイプ 普及価格タイプ V-141BZ, 取扱説明書
https://dl.mitsubishielectric.co.jp/dl/dg/wink/ssl/wink_doc/m_contents/wink/FAN_IB/1811875h00603_ib.pdf(閲覧 2019.11.25)
- (注)
- i) ロジスティック回帰モデルへの適合度を調べる統計学的検定である。観測された事象率がモデル母集団のサブグループでの期待される事象率に適合するかどうかを評価する。
 - ii) 観測値と予測値の差を二乗した総和の平均値の平方根をとり、観測値と予測値が近づくほど、RMSE は小さくなる。
 - iii) 多重比較検定の 1 つであるテューキーの範囲検定を行った。すべての群の組み合わせについて母平均の差を検討する検定である。対象の各 2 群間の平均値に差がないという帰無仮説をおき、検定統計量 t が出現する確率 p 値を求める。