家庭部門 CO_2 排出統計における 地方別エネルギー消費構造の解明に関する研究

Regional Energy Consumption Structures in Residential CO_2 Emission Survey Data

吉田友紀子*・平野勇二郎**・一ノ瀬俊明**
Yukiko Yoshida　Yujiro Hirano　Toshiaki Ichinose

Abstract

In the Ministry of the Environment's survey on the actual conditions of CO2 emissions in the household sector, it has been observed that there is a difference in energy consumption for lighting and plug power between urban and rural areas. Additionally, it has been found that the energy consumption structure for air conditioning varies by region. Therefore, covariance analyses based on region, household attributes, building performance, etc., were conducted to investigate the factors contributing to the differences in energy consumption structure. The analysis of the household sector CO2 emission survey data focused exclusively on information with clearly defined floor areas, aiming to comprehend the energy consumption structure in regions characterized by cold climates and urban environments. Discrepancies in energy consumption structures were observed among various regions, including Hokkaido, Tohoku, and Hokuriku, as well as others like Kanto and Chubu. Additionally, an examination of lifestyle behaviors associated with household sector energy consumption was undertaken to inform future considerations for measures within the household sector.

Key words *:* Residential energy consumption, CO_2 emission, Regional disparities, Energy consumption structures

１．はじめに

建築分野の大幅なエネルギー需要削減が，国の地域脱炭素ロードマップ[1)]において期待されている．

都道府県別家庭部門 CO2 排出量推計は，三浦・外岡[2)]が 1991 年から 1995 年の地方別住宅エネルギー消費量内訳を推計し，戸建と集合などの建て方別，燃料種別推計を明らかにした．その後，村上ら[3)]が全国の住宅 80 戸を対象としたエネルギー消費量の長期詳細調査を行い，井上[4)]はアンケートにより家庭エネルギー消費量の実態を報告した．下田ら[5)]は家庭用エネルギーエンドユースモデルを開発し，世帯類型別にエネルギー消費の推計を行うことで，国内で最も精密で省エネ行動と建物性能，家電機器の挙動の関係を結び付けた．田中・外岡[6)]は，市町村別家庭部門 CO_2 排出量をベイズ推計にて予測する手法を確立しており，世帯別や時系列データを用いた精密なモデルを開発している．長谷川[7)]は，数量化理論Ⅰ類等により，農業地域と都市的地域の特徴を明らかにした．

環境省家庭 CO_2 統計調査[8)]の研究会では，田中はベイズ推計法を用いて市町村別推計[9)]を，西尾[9)]は都市部の検討を行っている．これまで，世帯類型別エネルギー消費原単位に基づき議論が行われることで，ライフスタイルに関連するエネルギーの使われ方の議論は，省エネルギー行動有無や機器所有台数，機器効率によるものと考えられてきた．

本研究では，環境省 R2 年度家庭 CO2 統計調査[8)]にて延床面積が明らかな個票のみを用いることで，地方別エネルギー消費構造そのものに着目し，その要因を検討する．

２．R2 年家庭ＣＯ₂排出統計におけるデータ抽出方法

全国 10 の地方区分のうち，延床面積及び年間一次エネルギー消費推計内訳が明らかな 9071 個の個票を選定した．抽出したデータの全平均は，居住人数 2.6 人，延床面積 108.8 ㎡，居室数 4.9 室である．ピアソンの積率相関係数の算出を行い，統計的 1%水準の有意に高い相関がある 25 項目を抽出した．その地方別データの特性を，**表１**に示す．

表１　家庭 CO_2 統計調査の地方別個票データ

R2年度家庭CO_2統計調査		1北海島	2東北	3関東甲信	4北陸	5東海	6近畿	7中国	8四国	9九州	10沖縄	加重平均
個票（n=）		858	915	1517	811	904	1001	865	784	966	450	9071
都市クラス（階級）	1・2・3	1.9	1.9	1.6	1.8	1.8	1.7	1.8	1.9	1.8	2.0	1.8
居住人数	人	2.3	2.6	2.6	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.6	2.8	2.6
建て方	1:戸建，2:集合	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.4	1.5	1.4
延床面積	㎡	105.2	124.1	95.0	133.6	114.7	98.9	113.5	115.1	104.3	85.2	108.8
居室数	室	4.6	5.3	4.4	5.6	5.2	4.7	5.1	5.2	4.8	4.2	4.9
平日朝調理	人分	1.7	2.1	1.7	2.0	1.9	1.6	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
休日朝調理	人分	1.7	2.0	1.8	1.9	1.9	1.7	1.8	1.7	1.8	1.9	1.8
平日昼調理	人分	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	1.1
休日昼調理	人分	1.8	2.0	2.0	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	2.0	2.2	2.0
平日夜調理	人分	2.2	2.5	2.4	2.6	2.5	2.4	2.5	2.4	2.4	2.6	2.4
休日夜調理	人分	2.2	2.5	2.4	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.7	2.5
自動車数	台	1.1	1.6	0.9	1.7	1.4	0.9	1.4	1.5	1.4	1.5	1.3
自動車年間走行距離	km	8733	12336	6008	13018	9571	6125	11104	11749	10127	9519	9494
暖房利用方法	1:24時間暖房， 2:在室時は暖房する， 3:寒いと感じた時のみ暖房する。 4:ほとんど暖房しない	1.8	2.2	2.6	2.2	2.6	2.6	2.6	2.6	2.7	3.1	2.5
暖房機器使用時間（平日）	1:2時間未満， 2:2～4時間未満， 3:4～6時間未満， 4:6～8時間未満， 5:8～12時間未満， 6:12時間以上	5.3	4.2	3.6	4.2	3.6	3.6	3.7	3.5	3.6	2.5	3.8
暖房居室数	室	2.9	2.5	2.2	2.6	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	1.5	2.3
年間一次暖房	GJ換算	30.0	20.2	6.5	14.3	6.7	6.0	6.5	5.6	5.3	0.2	10.3
年間一次冷房	GJ換算	0.0	0.3	0.9	0.8	1.2	1.2	0.9	1.2	1.0	2.7	0.9
年間一次給湯	GJ換算	13.8	13.2	13.1	13.6	11.4	11.7	9.6	9.3	8.4	6.6	11.4
年間一次台所用コンロ	GJ換算	2.0	2.1	2.8	2.1	2.4	2.2	1.8	1.7	1.9	2.4	2.2
年間一次照明家電製品他	GJ換算	10.6	12.4	11.7	13.9	11.8	11.3	12.8	12.6	12.3	12.2	12.1
年間一次車	GJ換算	19.3	26.1	12.1	27.0	19.9	12.7	21.9	23.7	21.0	27.3	20.0

*Corresponding author; Yukiko Yoshida,
E -mail: yukiko.yoshida.uz27@vc.ibaraki.ac.jp
*茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学専攻
〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1
**国立環境研究所社会システム領域

３．主因子法を用いた地域別エネルギー消費構造の解析

表 1 では，調査項目の平均値を算出し，いずれの項目も地域別のエネルギー消費特性に関連するものと判断し，10 地域別に主因子バリマックス回転による因子分析を行った（**表 2～11**），固有値の変化と因子の解釈可能性を考慮すると，Kaise-Guttman 基準に従い固有値 1.0 以上の基準により，5～７因子構造が算出された．なお，回転前の５から７因子で全分散を説明する割合は，最も低い九州における 50.4%から最も高い関東甲信では 55.7%を示した．

主な因子分析による結果として，北海道（**表 2**），東北（**表 3**），北陸（**表 5**）の 6 因子の順は等しく，都市クラスを示す階級が最も大きい．さらに，居住人数，昼間在宅者有無，建て方，延床面積，居室数の後に，年間一次エネルギー消費量暖房，冷房，給湯，台所用コンロ，照明家電製品他，車の順に並び，自動車年間走行距離及び自動車台数と続くことから，おおむねエネルギー消費構造に在室人数と昼間在宅者有無の影響が大きく，建物性能では建て方，延床面積，居室数によって説明がつくと考えられる．

関東甲信（**表 4**）のみ７因子となるものの，都市レベル，居住人数，昼間在室者有無，建て方，延床面積，居室数の影響に続き，平日朝調理，平日夜調理，平日昼調理，休日昼調理，平日夜調理，休日夜調理と，在室スケジュールがエネルギー消費構造に与える影響が大きいと考えられる．自動車に関連した項目の次に，暖房利用方法として省エネ

表 2　北海道の因子分析　6 因子　累積 53.7%

回転後の因子行列[a]

	因子 1	2	3	4	5	6
都市クラス	-.114	.222	.448	.071	.033	-.110
居住人数	.884	.154	.144	.040	.123	.119
昼間在宅者	-.133	-.322	.180	-.366	-.012	.043
建て方	.038	-.775	-.179	-.094	-.088	-.102
延床面積	.047	.776	.115	.076	.052	.194
居室数	.168	.768	.124	.125	.023	.105
年間一次暖房	.126	.681	.123	.014	.013	.007
年間一次冷房	.031	.037	-.045	.009	-.015	.181
年間一次給湯	.328	.231	.133	.061	-.037	.227
年間一次台所用コンロ	.285	.035	-.010	.046	.038	-.270
年間一次照明家電製品他	.259	.399	.217	.157	.035	.531
年間一次車	.246	.071	.763	-.083	.025	.018
自動車年間走行距離	.165	.089	.750	-.084	.052	-.030
自動車台数	.225	.245	.709	.030	.064	.084
平日朝調理	.539	.206	.133	.102	.721	.054
休日朝調理	.571	.195	.121	.116	.690	.044
平日昼調理	.188	.187	-.003	.924	.093	-.012
休日昼調理	.618	.078	.181	.330	.223	.089
平日夜調理	.911	.161	.138	.065	.139	.091
休日夜調理	.908	.147	.127	.065	.147	.100
暖房エアコン台数	.041	.101	.001	-.047	.075	.359
暖房機器使用時間	.091	.489	.038	.100	.055	.088
暖房居室数	.219	.495	.126	.012	.088	.213
週湯はり日数	.194	.321	.219	.020	.138	.018

因子抽出法: 主因子法
回転法: Kaiser の正規化を伴うバリマックス法[a]
a. 7 回の反復で回転が収束しました。

表 3　東北の因子分析　6 因子　累積 53.8%

回転後の因子行列[a]

	因子 1	2	3	4	5	6
都市クラス	-.008	.217	.376	-.118	.126	-.085
居住人数	.838	.047	.278	.208	.092	.111
昼間在宅者	-.093	-.216	.108	-.157	-.703	-.049
延床面積	.124	.803	.135	.248	.118	.060
居室数	.165	.804	.145	.146	.161	-.010
建て方	-.090	-.660	-.142	-.193	-.202	-.081
年間一次暖房	.093	.322	.161	.644	.095	-.229
年間一次冷房	.131	.052	-.068	.443	-.019	.169
年間一次給湯	.336	.066	.178	.332	.033	.001
年間一次台所用コンロ	.375	.021	.074	.062	.097	-.223
年間一次照明家電製品他	.321	.285	.184	.610	.062	.265
年間一次車	.289	.048	.718	.075	-.137	.013
自動車年間走行距離	.165	.076	.647	.127	-.076	.022
自動車台数	.421	.236	.644	.107	.008	.053
平日朝調理	.817	.182	.060	.113	.041	.064
休日朝調理	.832	.168	.026	.085	.027	.113
平日昼調理	.310	.264	.018	.074	.529	.025
休日昼調理	.719	.088	.116	.060	.140	.073
平日夜調理	.895	.056	.230	.182	.071	.060
休日夜調理	.899	.054	.231	.158	.053	.075
暖房エアコン台数	.130	.063	-.001	.095	.055	.603
暖房機器使用時間	.013	.094	-.020	.393	.265	-.011
暖房居室数	.279	.280	.135	.324	.128	.068
週湯はり日数	.336	.228	.130	.091	.077	.177

因子抽出法: 主因子法
回転法: Kaiser の正規化を伴うバリマックス法[a]
a. 7 回の反復で回転が収束しました。

表 4　関東甲信の因子分析　7 因子　累積 55.7%

回転後の因子行列[a]

	因子 1	2	3	4	5	6	7
都市クラス	-.076	.112	-.177	.385	.043	-.013	.033
居住人数	.723	.139	.524	.147	.163	-.048	.064
昼間在宅者	-.027	-.196	-.058	.074	-.024	-.073	-.505
建て方	-.015	-.696	-.059	-.186	-.039	-.093	-.116
延床面積	.067	.864	.178	.125	.047	.006	.094
居室数	.103	.823	.172	.116	.070	-.003	.125
平日朝調理	.397	.161	.174	.114	.746	.027	.123
休日朝調理	.461	.131	.179	.090	.793	.028	.090
平日昼調理	.220	.152	.139	-.019	.110	.013	.737
休日昼調理	.574	.090	.279	.086	.235	.018	.290
平日夜調理	.785	.104	.445	.149	.184	-.011	.153
休日夜調理	.802	.098	.424	.138	.183	-.021	.123
自動車台数	.104	.298	.114	.776	.056	-.031	.012
自動車年間走行距離	.064	.071	.056	.813	.007	-.004	-.065
暖房利用方法	.000	-.085	-.063	-.021	-.026	-.683	.052
暖房エアコン台数	.119	.288	.329	-.067	.040	.077	.095
暖房機器使用時間	.031	.093	.141	-.065	.000	.775	.176
暖房居室数	.173	.336	.334	.026	.097	.049	.114
週湯はり日数	.159	.258	.233	.110	.174	.021	.032
年間一次暖房	-.001	.421	.051	.215	.065	.196	.122
年間一次冷房	.205	.050	.385	-.060	-.027	.133	.031
年間一次給湯	.153	.078	.676	.058	.139	.006	.031
年間一次台所用コンロ	.370	.016	-.052	-.052	.082	.032	-.008
年間一次照明家電製品他	.053	.303	.689	.082	.106	.128	.138
年間一次車	.105	.064	.119	.802	.067	.005	-.096

因子抽出法: 主因子法
回転法: Kaiser の正規化を伴うバリマックス法[a]
a. 8 回の反復で回転が収束しました。

表 5　北陸の因子分析　6 因子　累積 50.7%

回転後の因子行列[a]

	因子 1	2	3	4	5	6
都市クラス	-.041	-.001	.299	.188	-.179	-.047
居住人数	.687	.301	.352	.175	.315	.026
昼間在宅者	-.050	-.063	.113	-.147	.010	-.655
建て方	-.008	-.106	-.142	-.665	-.070	-.111
延床面積	.096	.100	.152	.780	.187	.087
年間一次暖房	.186	.011	.154	.428	.151	.241
年間一次冷房	.174	.073	.163	.067	.470	.073
年間一次給湯	.307	.022	.218	.061	.332	.199
年間一次台所用コンロ	.211	.000	.020	-.001	.036	.076
年間一次照明家電製品他	.294	.102	.309	.365	.462	.171
年間一次車	.248	.132	.624	.050	.320	-.113
自動車年間走行距離	.120	.088	.601	.098	.210	-.068
自動車台数	.320	.154	.648	.273	.222	-.029
平日朝調理	.335	.801	.171	.119	.205	.108
休日朝調理	.287	.839	.163	.123	.143	.098
平日昼調理	.224	.281	-.079	.199	-.070	.547
休日昼調理	.628	.434	.106	.109	.139	.058
平日夜調理	.812	.392	.247	.166	.205	.000
休日夜調理	.802	.428	.231	.147	.202	-.009
暖房エアコン台数	.101	.181	.076	.204	.569	-.008
暖房機器使用時間	.008	-.025	.013	.020	.110	.354
暖房居室数	.238	.146	.176	.309	.323	.173
週湯はり日数	.201	.135	.297	.173	.097	.085

因子抽出法: 主因子法
回転法: Kaiser の正規化を伴うバリマックス法
a. 7 回の反復で回転が収束しました。

表 6　東海の因子分析　6 因子　累積 51.3%

回転後の因子行列[a]

	因子					
	1	2	3	4	5	6
都市クラス	.168	-.007	.102	-.176	.029	-.044
居住人数	.162	.665	.278	.491	.219	.006
昼間在宅者	-.268	-.197	.289	-.031	-.016	-.169
建て方	-.636	-.033	-.078	-.020	-.021	-.125
延床面積	.817	.067	.120	.078	.037	-.009
居室数	.803	.140	.097	.012	.058	-.008
平日朝調理	.152	.401	.119	.160	.753	-.002
休日朝調理	.097	.404	.156	.168	.840	.016
平日昼調理	.316	.471	-.206	-.047	.060	.139
休日昼調理	.165	.683	.142	.184	.311	.036
平日夜調理	.113	.763	.263	.430	.242	.014
休日夜調理	.107	.756	.244	.429	.259	.030
自動車台数	.426	.241	.626	.103	.099	.018
自動車年間走行距離	.180	.130	.759	.043	.085	.017
暖房利用方法	-.036	.022	-.053	-.086	-.023	-.621
暖房エアコン台数	.425	.024	.073	.255	.085	-.039
暖房機器使用時間	.049	.072	-.096	.063	-.027	.787
暖房居室数	.408	.237	.129	.175	.105	.117
週湯はり日数	.248	.162	.019	.352	.184	.046
年間一次暖房	.382	.099	.103	.098	.043	.327
年間一次冷房	.211	.191	.151	.316	-.023	.156
年間一次給湯	.039	.147	.089	.636	.123	.075
年間一次台所用コンロ	.004	.316	.012	-.002	.045	.004
年間一次照明家電製品他	.435	.137	.157	.474	.099	.137
年間一次車	.141	.110	.750	.159	.105	.043

因子抽出法: 主因子法
回転法: Kaiser の正規化を伴うバリマックス法
a. 8 回の反復で回転が収束しました。

表 7　近畿の因子分析　6 因子　累積 51.3%

回転後の因子行列[a]

	因子					
	1	2	3	4	5	6
都市クラス	-.051	.211	.299	.037	-.025	.005
居住人数	.838	.165	.204	.219	.021	.020
昼間在宅者	-.009	-.188	.020	-.005	-.100	-.444
建て方	-.034	-.652	-.220	-.110	-.089	-.098
延床面積	.054	.803	.230	.020	-.045	.151
居室数	.093	.809	.167	.030	-.070	.159
平日朝調理	.332	.176	.084	.791	.040	.087
休日朝調理	.360	.118	.118	.842	.020	.074
平日昼調理	.207	.173	-.025	.150	.058	.798
休日昼調理	.653	.106	.102	.274	-.005	.246
平日夜調理	.881	.123	.170	.221	-.005	.095
休日夜調理	.882	.102	.186	.231	-.020	.099
自動車台数	.214	.265	.731	.071	.009	.010
自動車年間走行距離	.074	.052	.729	.045	-.013	.000
暖房利用方法	-.026	-.052	-.026	-.013	-.659	.021
暖房エアコン台数	.190	.446	-.044	.044	.157	.032
暖房機器使用時間	.085	.069	-.031	.010	.793	.211
暖房居室数	.280	.377	.031	.064	.085	.155
週湯はり日数	.253	.280	.068	.065	.023	-.009
年間一次暖房	.141	.361	.174	.067	.293	.108
年間一次冷房	.414	.196	.001	-.041	.231	-.030
年間一次給湯	.550	.183	.018	.014	.155	-.049
年間一次台所用コンロ	.264	-.058	-.021	.170	-.016	.138
年間一次照明家電製品他	.380	.439	.082	.008	.273	.065
年間一次車	.210	.074	.721	.020	.093	-.061

因子抽出法: 主因子法
回転法: Kaiser の正規化を伴うバリマックス法
a. 6 回の反復で回転が収束しました。

表 8　中国の因子分析　6 因子　累積 51.7%

回転後の因子行列[a]

	因子					
	1	2	3	4	5	6
都市クラス	-.032	.164	.006	.163	-.001	.127
居住人数	.769	.123	.373	.222	-.055	.014
昼間在宅者	.007	-.234	.067	.207	-.140	-.502
建て方	.021	-.737	-.018	-.077	-.027	-.047
延床面積	.127	.807	.056	.061	-.049	.017
居室数	.067	.823	.046	.020	-.050	.096
平日朝調理	.315	.109	.799	.101	.002	.025
休日朝調理	.308	.103	.875	.102	.006	.033
平日昼調理	.180	.140	.211	-.022	-.028	.688
休日昼調理	.548	.073	.540	.123	-.083	.203
平日夜調理	.817	.056	.430	.154	-.069	.051
休日夜調理	.783	.052	.444	.146	-.065	.074
自動車台数	.308	.218	.108	.689	.029	.046
自動車年間走行距離	.168	.117	.047	.674	.024	-.087
暖房利用方法	-.024	-.027	.006	-.092	-.646	.095
暖房機器使用時間	.082	.032	-.034	-.039	.681	.169
暖房居室数	.234	.328	.122	.075	.074	.164
週湯はり日数	.300	.214	.080	.170	-.028	-.010
年間一次暖房	.071	.407	-.020	.114	.242	.186
年間一次冷房	.363	.023	.106	.062	.199	.061
年間一次給湯	.516	.022	.012	.126	.141	.032
年間一次台所用コンロ	.180	-.191	.247	.028	.002	.190
年間一次照明家電製品他	.440	.452	.051	.147	.209	.092
年間一次車	.246	-.031	.135	.798	.098	-.157

因子抽出法: 主因子法
回転法: Kaiser の正規化を伴うバリマックス法
a. 8 回の反復で回転が収束しました。

表 9　四国の因子分析　5 因子　累積 52.5%

回転後の因子行列[a]

	因子				
	1	2	3	4	5
都市クラス	-.039	.168	.276	-.093	.049
居住人数	.738	.075	.222	.508	-.060
昼間在宅者	-.123	-.342	.218	.044	-.225
建て方	-.051	-.716	-.155	.014	-.084
延床面積	.027	.806	.214	.149	-.052
居室数	.037	.821	.113	.215	-.033
平日朝調理	.792	.170	.124	.011	.024
休日朝調理	.819	.149	.135	.022	.082
平日昼調理	.369	.371	-.152	.012	.160
休日昼調理	.790	.156	.040	.122	.043
平日夜調理	.805	.070	.164	.437	-.037
休日夜調理	.811	.062	.173	.427	-.013
自動車台数	.247	.208	.702	.199	-.024
自動車年間走行距離	.139	.080	.714	.172	.002
暖房利用方法	.002	-.029	-.033	-.163	-.565
暖房機器使用時間	.073	.099	-.019	.082	.734
暖房居室数	.180	.276	.052	.238	.118
週湯はり日数	.244	.238	.080	.263	.060
年間一次暖房	-.004	.318	.178	.282	.249
年間一次冷房	.140	.079	.106	.358	.094
年間一次給湯	.230	.022	.064	.640	.129
年間一次台所用コンロ	.311	-.108	-.005	.073	.036
年間一次照明家電製品他	.155	.433	.206	.483	.173
年間一次車	.178	-.022	.778	.228	-.003

因子抽出法: 主因子法
回転法: Kaiser の正規化を伴うバリマックス法
a. 6 回の反復で回転が収束しました。

意識に連して暖房機器使用時間の影響が大きく，使用機器の種別では暖房エアコン台数，暖房居室数と続くことから年間一次エネルギー消費の暖房用途に関連する対策は使い方が有効と考えらえる．給湯に関連して，週湯はり日数の調査項目もあり，都市部特有のライフスタイルが存在すると考えられる．東海（**表 6**），近畿（**表 7**），中国（**表 8**），沖縄（**表 10**）はほぼ同様のエネルギー消費構造であると考えらえる．四国（**表 9**）及び九州（**表 10**）は，ほぼ同様の調査項目順が説明変数とし関わるものの 5 因子と簡易になり，エネルギー消費構造が複雑ではないことがわかる．

4．まとめ

環境省 R2 年度家庭部門 CO_2 排出実態統計調査データのうち，延床面積が明らかなデータのみを用いて，寒冷地，都市部等の地域別にエネルギー消費構造を把握した．北海道，東北，北陸の 3 地域とその他，関東甲信等の地域では，明らかにエネルギー消費構造が異なることが分かった．

表 10　九州の因子分析　5 因子　累積 50.4%

回転後の因子行列[a]

	因子				
	1	2	3	4	5
都市クラス	-.039	.168	.276	-.093	.049
居住人数	.738	.075	.222	.508	-.060
昼間在宅者	-.123	-.342	.218	.044	-.225
建て方	-.051	-.716	-.155	.014	-.084
延床面積	.027	.806	.214	.149	-.052
居室数	.037	.821	.113	.215	-.033
平日朝調理	.792	.170	.124	.011	.024
休日朝調理	.819	.149	.135	.022	.082
平日昼調理	.369	.371	-.152	.012	.160
休日昼調理	.790	.156	.040	.122	.043
平日夜調理	.805	.070	.164	.437	-.037
休日夜調理	.811	.062	.173	.427	-.013
自動車台数	.247	.208	.702	.199	-.024
自動車年間走行距離	.139	.080	.714	.172	.002
暖房利用方法	.002	-.029	-.033	-.163	-.565
暖房機器使用時間	.073	.099	-.019	.082	.734
暖房居室数	.180	.276	.052	.238	.118
週湯はり日数	.244	.238	.080	.263	.060
年間一次暖房	-.004	.318	.178	.282	.249
年間一次冷房	.140	.079	.106	.358	.094
年間一次給湯	.230	.022	.064	.640	.129
年間一次台所用コンロ	.311	-.108	-.005	.073	.036
年間一次照明家電製品他	.155	.433	.206	.483	.173
年間一次車	.178	-.022	.778	.228	-.003

因子抽出法: 主因子法
回転法: Kaiser の正規化を伴うバリマックス法
a. 6 回の反復で回転が収束しました。

表 11　沖縄の因子分析　6 因子　累積 52.5%

回転後の因子行列[a]

	因子					
	1	2	3	4	5	6
都市クラス	-.048	.012	.162	-.089	.020	.379
居住人数	.832	.165	.321	.168	-.032	-.125
建て方	.000	-.743	-.077	-.089	-.005	-.271
延床面積	.050	.851	.105	.046	.024	.017
居室数	.151	.765	.034	.025	.028	.027
平日朝調理	.526	.138	.140	.746	-.008	-.036
休日朝調理	.523	.129	.096	.742	-.009	.052
平日昼調理	.363	.296	-.104	.095	.212	.136
休日昼調理	.736	.103	.036	.231	-.098	.085
平日夜調理	.921	.141	.171	.128	-.032	-.084
休日夜調理	.925	.126	.169	.129	-.052	-.038
自動車台数	.340	.310	.649	-.002	.038	.175
自動車年間走行距離	.029	.045	.559	.127	-.043	.158
暖房利用方法	-.001	-.072	.020	-.013	-.556	-.073
暖房機器使用時間	-.018	.011	.018	-.050	.507	.049
暖房居室数	.105	.215	.185	.068	.197	-.094
週湯はり日数	.062	.059	.089	.127	-.095	-.129
年間一次暖房	.056	.109	.024	.082	.081	.361
年間一次冷房	.384	.253	.160	.129	.045	-.046
年間一次給湯	.455	.220	.326	-.003	.118	-.288
年間一次台所用コンロ	.404	-.056	.057	.068	.053	.038
年間一次照明家電製品他	.319	.563	.274	.116	.169	-.205
年間一次車	.305	.044	.748	.034	.015	-.013

因子抽出法: 主因子法
回転法: Kaiser の正規化を伴うバリマックス法
a. 6 回の反復で回転が収束しました。

既存住宅の省エネルギー対策が迅速に進められるように，さらなる解析を進める予定である．

謝辞

本研究は，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」のメンバーとして実施した成果である．さらに，日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（B）課題番号 23H01546（代表者：平野勇二郎）「再生可能エネルギー買取制度を併用した地産地消型エネルギー事業の計画・評価手法」及び茨城大学カーボンリサイクルエネルギー研究センターの支援によって実施されたものである．関係各位に対して謝意を表する．

参考文献

1) 地域脱炭素ロードマップ（2021.6），国・地方脱炭素実現会議
2) 三浦秀一，外岡豊；日本の住宅における地域別エネルギー需要構造とその増加要因に関する研究，（2002.12），pp.105－112，第 562 号，日本建築学会計画系論文集
3) 村上周三，坊垣和明ら；全国の住宅 80 戸を対象としたエネルギー消費量の長期詳細調査：対象住宅の属性と用途別エネルギー消費量，（2006.5），pp93-100，第 603 号，日本建築学会環境系論文集
4) 井上隆;アンケートによる住宅内エネルギー消費の実態と住まい方等に関する調査，日本建築学会第 4 回住宅エネルギーシンポジウム住宅用エネルギー消費と温暖化対策，（2005），pp. 37-56，日本建築学会
5) 下田吉之ら；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，（2009）pp.1－9，第 30 巻 3 号，エネルギー・資源学会論文誌
6) 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計-住宅の環境負荷とその地域性に関する研究 その 1-，（2014.3），pp305-312，第 79 巻 697 号，日本建築学会環境系論文集
7) 長谷川兼一，吉野博；農業地域と都市的地域の住宅のエネルギー消費特性に関する分析，（2017.2）pp201-204，第 23 巻 53 号，日本建築学会技術報告集
8) 環境省；家庭部門の CO_2 排出実態統計調査（家庭 CO_2 統計）．https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html（アクセス日 2023.11.30）
9) 田中昭雄；ベイズ的アプローチによる市町村別住宅環境負荷推定，（2023）pp265-273，第 44 巻 6 号，エネルギー・資源学会論文誌
10) 西尾健一郎；家庭 CO_2 統計の個票データと機械学習を用いた建築時期別光熱費の実態把握，（2020）pp175-185，第 42 巻 3 号，エネルギー・資源学会論文誌

家庭 CO_2 統計の個票データを用いた HEMS 導入世帯の特徴や省エネ効果の分析

Analysis of the Characteristics and Energy-saving Impacts of Households with HEMS using Micro Data of Survey on Carbon Dioxide Emissions from Residential Sector

西尾健一郎*・山田愛花*・後藤久典*
Ken-ichiro Nishio　Manaka Yamada　Hisanori Goto

Abstract
This study analyzed the reduction in electricity consumption due to home energy management systems (HEMS) using micro data from the fiscal year 2020 statistics of the Japanese government. Based on issues arising from previous studies on HEMS, we pointed out the need to correct for biases in household characteristics. From this perspective, a propensity score corresponding to the probability of adopting HEMS was calculated and a doubly robust estimator, which is considered to be one of the most accurate causal inference methods, was applied. As a result, it was estimated that the adoption of HEMS would reduce annual electricity consumption by 5.7%. On the other hand, the results were not statistically significant, suggesting problems related to the highly skewed characteristics of the households that adopted HEMS. Finally, we discussed expectations and challenges related to the analysis method, implications for the global warming mitigation approaches, and the significance of the statistics data.
Key words : Climate change, Energy efficiency, Decarbonization, HEMS, Propensity score

１．はじめに

家庭用エネルギーマネジメントシステム(home energy management system, HEMS)の導入は，地球温暖化対策計画(温対計画)における徹底的なエネルギー管理の実現手段の一つとされているが，その進捗は遅れている．

温対計画は，地球温暖化対策推進法に基づく政府の総合計画である．2021 年 10 月に閣議決定された現行の温対計画 [1]では，2030 年度において温室効果ガスを 2013 年度比で 46%削減するという目標の実現に向け，各分野で取り組むべき対策・施策が記載されており，参考資料には削減量の根拠が示されている．

このうち，HEMS に関わる項目は「HEMS・スマートメーター・スマートホームデバイスの導入や省エネルギー情報提供を通じた徹底的なエネルギー管理の実施」である．2030 年度の省エネ見込量は 2013 年度を基準として 216 万 kL，排出削減見込量は 569.1 万 tCO_2 とされている．160 万 kL が HEMS・スマートホームデバイスによるもので，4,941 万世帯 [1]に普及し，年間電力消費量 3,500kWh の 10%が削減されるとしている．残りの 56 万 kL は，エネルギー小売事業者による省エネ情報提供によるもので，8 割の世帯で追加的に 2%の省エネ効果が想定されている．

2023 年 6 月には，温対計画に掲げた対策・施策の進捗状況について，最新の点検結果 [2]がとりまとめられた．家庭部門で「D. 取組がこのままの場合には目標水準を下回ると考えられる対策」と評価された 4 つの対策・施策のうち，最も影響が大きいのは HEMS を含む徹底的なエネルギー管理の実施である．導入数は，2020 年度は 984 万台の見込みに対して 646.8 万台，2021 年度が 740.2 万台とされているが，「2020 年度から HEMS の導入世帯数に加え，スマートホームデバイスの導入世帯数を含む」ようになっている．その点では，2021 年度の HEMS 導入数は ECHONET Lite 機器出荷台数から 85.5 万世帯に限られる．

このような進捗状況を踏まえ，今後の温暖化対策の検討をより実態に即したものにするためにも，HEMS の導入状況や導入時の効果を把握していくことは重要である．

そこで，本研究では令和 2 年度の「家庭部門の CO_2 排出実態統計調査」(家庭 CO_2 統計)を用いて，HEMS 導入世帯の住宅・世帯属性等の特徴や，HEMS 導入による電力消費量の削減効果を分析する．2 章では，既往研究で HEMS についてどのような指摘がされているかを確認した上で，本研究の位置づけを示す．3 章では，家庭 CO_2 統計の HEMS 導入世帯の特徴を概観した上で，個票データに基づく省エネ効果の統計分析を行う．4 章ではまとめと考察をする．

２．HEMS の効果などに関する既往研究

2.1 国内

わが国の HEMS に関連する研究として，導入意向，利用者の反応，省エネ効果などに関する報告として，例えば以下のようなものがある．

中野・鷲津(2017)[3]は，1,241 名の消費者を対象に行ったアンケート調査を通じて，HEMS の利用意向を分析し，先進アイテムの活用経験や自動制御に対する肯定的な態度が HEMS の導入意思を高めることなどを指摘している．

*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
E-mail：nishio@criepi.denken.or.jp

利用者の反応に関しては，河路(2018)[4]によるアンケート調査では，300 名の HEMS 利用者にその有用性などを尋ねている．調査対象者は 2010 年以降に所有する戸建住宅に HEMS を導入し，過去 1 年間のエネルギー消費量を確認できるとした人であり，結果では，満足点として「見える化ができる」「省エネ効果が確認できる」などが挙げられた一方，「省エネ手法を考えられる」と感じている人は多くはなかったことなどを指摘している．

また，八木田他(2014)[5]は，特定の住宅メーカーが提供する HEMS を利用している 448 世帯に対して質問紙調査を行い，情報閲覧行動やその背景要因を分析している．見える化専用端末ではなくネットを介して好みの端末で閲覧するタイプのものであり，閲覧回数が設置後の時間経過とともに減少する傾向や，閲覧回数が多い層ほど環境意識が高い傾向があることなどを報告している．

省エネ効果に関して，加藤(2013)[6]は，2001 年以降の約 10 年間に行われたサンプル数 100 以上の試験結果では，HEMS 導入により約 3～12%の省エネ効果が報告されていたとしている．一方，省エネ効果が明確でないことを，導入コストの高さなどとあわせて，課題として指摘している．

省エネ効果が不透明な理由の一つは，HEMS 導入世帯の前後比較による報告が多いことである．気温補正はされることが多いが，ライフスタイルなどの変化もあるため，いわゆる対照群と呼ばれる HEMS 非導入世帯の消費量と比較することが望ましい．その点で平山・中村(2021)[7]は，HEMS を導入した 112 世帯の 1 年間のデータと，アンケート経由で別途取得した HEMS 非導入の 112 世帯のデータを準実験手法で比較し，ガス消費量で 14%，電力消費量で 6%の省エネ効果があったと推定している．分析では傾向スコア逆確率重み付け推定法(inverse probability weighting, IPW)を適用し，その過程では世帯人数，居住地域，電気契約容量，住宅延床面積，建築時期，厨房熱源を共変量として用いたが，効果が大きく推定された点について，両群間のバイアス(偏り)を補正しきれなかった可能性を指摘している．

HEMS を取り巻く環境について，鶴崎(2009)[8]は，HEMS 黎明期の経緯や普及課題などに詳しい．2001 年の省エネ部会報告書で，2010 年度までに省エネ率 10%程度，普及率 30%との期待が示され，HEMS に先行する「省エネナビ」のモニター事業の実績に基づき省エネ効果が想定されていたことや，2001～2005 年度の NEDO 実証で確認された HEMS 効果の大部分は情報提供によるものであり，当時のエアコンや照明の自動制御の効果はその 1 割以下にとどまったことなどを振り返っている．NEDO 実証の一つを詳細に分析した石田・佐藤(2005) [8]は，必要な場所・時間にしか空調をしない世帯で自動制御の効果が小さかったと述べ，将来的に終日空調のように冷暖房水準が向上すれば効果が発揮される可能性があると付言している．

制御機能を取り巻く環境は変化しつつある．飯島(2022)[10]は，HEMS の 20 年余りの変遷を振り返る中で，初期には見える化モニター，次いで操作リモコン程度に過ぎなかったが，太陽光発電の買取価格低下で自家消費のメリットが出始めてから，本来のエネルギーマネジメント機能への注目が高まっていることを述べている．自動・遠隔制御は活用され始めた段階にあり，その目的や対象機器は様々であるため，現状では効果を見積もるための情報は不足しているが，ヒートポンプ給湯機の昼間運転による再生可能エネ活用や給湯効率向上の効果(岩船他，2017)[11]や蓄電池の運用最適化による効果(山田他，2023)[12]などの可能性を秘める．

2.2 国外

国外の研究については，特に複数の研究知見をメタ分析したものに注目すると次のようなものがある．

Ehrhardt-Martinez et al.(2010)[13]は，1995～2010 年の欧米を中心とした 36 件の研究のメタ分析により，家庭における電力消費量の年間削減率は約 4～12%に分布していることを明らかにした．具体的には，見える化を 5 つのタイプに分類し，高度化請求書では 3.8%，推定フィードバックでは 6.8%，日次・週次フィードバックでは 8.4%，リアルタイムフィードバックでは 9.2%，総消費量だけでなく機器・回路別などの有用な情報も含むリアルタイムプラスフィードバックでは 12.0%と整理した上で，国の規模で可能な効果としては 0.4%から 6%超までが考えられると指摘している．ここでの分析対象には，対照群がある研究とない研究が混在している．

対照群がある研究に絞る形で，Zangheri et al.(2019)[14]は，見える化による省エネに関する 70 件以上の研究のメタ分析を行い，最終エネルギー消費量で 5～10%の削減可能性があるとしている．対象となった研究の地域別内訳は，欧州 59%，北米 37%などである．媒体別の効果比較では，宅内モニターは平均効果が 8.7%と高いこと，請求書による見える化は平均効果は 3%と小さいが，再現性が高く，より多くのサンプルに拡大できることなどが指摘されている．電力消費量の省エネ効果の各種比較では，2010 年以降の研究や期間が 1 年以上の研究では効果が小さいことが明らかにされており，考察として前者は省エネ意識や機器効率の向上が，後者は継続性が関係している可能性が指摘されている．上述の効果を解釈する際にはこの点にも留意する必要がある．

Agarwal et al.(2023)[15]は，1979～2021 年の 33 件の見える化実証をレビューしている．その中で，対照群を持つランダム化比較対照実験の省エネ効果は，前後比較研究と比べ

てどちらかといえば小さく，ばらつきも少ないことを指摘している．また，宅内モニターは省エネ効果を大きくする可能性がある一方，継続的な利用には課題があることなどを考察している．ランダム化比較対照実験の研究期間が長いほど，また分析住宅数が多いほど，省エネ効果が小さくなることも明らかにし，考察で前者は新規性の低下を，後者は関与度の低下を可能性として指摘している．

自動制御に関して，King(2018)[16]は，米国におけるスマートホーム技術動向の調査において，既往知見を活用しながら省エネ効果も推定している．結果によると，各用途で想定技術を最大限適用した場合の省エネポテンシャルは17%で，そのうち暖房が7.6%，冷房が3.7%となっている．ここでの効果にはHEMSや見える化の効果は含まれておらず，自動制御に焦点が当てられていて，暖房の効果はスマートサーモスタット(空調の温度制御をする装置)やスマート窓の効果である．省エネ性能に優れた製品を認定する米国のエナジースタープログラムでは，スマートサーモスタットにも認定基準を設けており，平均運転時間を暖房で8%，冷房で10%短くできることも要件の一つとなっている(EPA, 2017[17])．日本の冷暖房事情やエアコンに既に搭載されている省エネ運転機能も考慮すると，米国で想定されるような効果が当てはまるわけではないことに留意すべきであるが，制御技術が進歩していることは注目に値する．

2.3 既往研究の課題と本研究の位置づけ

既往研究から浮かび上がる課題を踏まえ，本研究の位置づけを示す．

第一に，HEMSの期待される省エネ効果は大きいがばらつきもあることや，定常的な効果は使用開始直後ほど高くないことが示唆されている．実証による効果検証は有益だが，普及時の議論を深めるためには，統計データなど自然状態の観測に基づく分析も求められる．

第二に，効果を適切に分析するためには，HEMSを導入した世帯の特徴を把握し，非導入世帯との属性の偏りを補正する必要がある．そのためには，できるだけ多くのデータを用いて統計的に分析するのが望ましい．

第三に，現状では，HEMSによる制御の効果やスマートホーム技術の効果を明らかにできるデータは限られていると言わざるを得ない．この点は今後の検討課題として残るが，HEMSの省エネ効果について，見える化機能を念頭に現状を明らかにしていくことは有益である．

3．家庭CO_2統計を用いた分析

3.1 家庭CO_2統計の概要

環境省が平成29年度から実施している「家庭部門のCO_2排出実態統計調査」(家庭CO_2統計)では，世帯・住宅属性，家電・機器の保有・使用状況，各種エネルギー消費量・CO_2排出量，光熱費支払額などが把握されている．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，エネルギー・資源学会の「家庭部門のCO_2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CO_2統計の調査票情報(個票データ)を直接利用し，多様な視点で分析することとしている．筆者らも既報(西尾, 2021[18])において建築時期による光熱費の違いをもたらす要因を分析するなどしてきた．

令和2年度の調査票では，HEMSを次のように扱っている．設問「お宅での家庭用エネルギー管理システム(HEMS：ホームエネルギーマネジメントシステム)の導入状況についてお答えください．※HEMSとは，エネルギー使用状況を専用の画面やパソコン，スマートフォンなどに表示することなどにより，家庭における省エネルギーを支援するシステムのことを言います．家電機器などの最適運転を行う機能をもつものもあります．」に対して，選択肢は「導入している」「導入していない」「わからない」の3つであり，内訳は順に2.9%，92.5%，4.6%である．このHEMS導入率2.9%は，前述の温対計画の進捗状況に記載されているHEMS導入世帯数85.5万世帯を考えると若干高いが，回答者によって設問文の解釈が異なる可能性も認識しておく必要があるだろう．2章で参照した既往研究からもわかるように，HEMSの提供方法は多様かつ変遷があり，提供方法によって効果も異なり，また理想的には見える化機能と制御機能の効果を併せ持つものであるが，調査票ではそれらの区別がされていないため，本研究では一括りに分析することになる．

なお，家庭CO_2統計では，母集団における世帯数分布に調整するための重み付けの係数があり，個票データの各サンプルにも付与されている．本章でも各サンプルの重みを考慮した分析を行う．

3.2 HEMS導入世帯の特徴の概観

次節以降では個票データの統計分析のために有効なサンプルを抽出する必要があるが，本節では，e-Statで公表されているデータに基づき，抽出前の10,015サンプルの特徴を概観しておく．

図1は，HEMS導入の有無による年間エネルギー消費量の単純比較である．エネルギー消費量は，電力・ガス会社などからの購入量であり，太陽光やコージェネレーションで発電された電気の自家消費分は含まれていない．電力消費量は全体平均で15.3GJ(4,258kWh)であり，時系列では2018～2021年度の中では最多となっている．ここで単純比較としたのは，HEMS導入世帯は世帯人数が多いことや戸建住宅比率が高いことなどにより，もともとエネルギー消

費量が多いことが予想されるからである．実際に同図もそうなっており，バイアス補正の必要性がわかる．

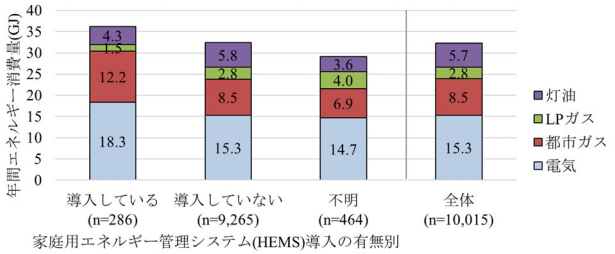


図 1　HEMS 導入有無別の年間エネルギー消費量

図 2 は，相関の高い属性に着目して HEMS 導入率を比較したもので，以下のような傾向が把握できる．HEMS 導入率は，戸建住宅で高く，床面積が 100m^2 以上で高い．建築時期は 2011 年以降，特に 2016 年以降で高い．世帯人数が多いほど，HEMS 導入率は高い．世帯主年齢が 30 代や 40 代でも高い．地域による差はそれほど見られない．特に，太陽光発電，蓄電システム，燃料電池のようなコージェネレーションシステムなど，エネルギーマネジメント機能と密接な機器の保有とあわせた HEMS 導入率の高さが特徴的である．また，「電気のみを使用」や「電気と灯油を使用」で導入率が高いことや，電気ヒートポンプ式給湯器の保有世帯でも高いことなどから，増加している電化住宅と相関関係にあることも確認できる．

表 1 は，各種の意識・行動データの該当率を HEMS 導入の有無で単純比較したものである．

HEMS 導入世帯で該当率が高い項目が多く，差が大きい上位 3 項目は，「温水洗浄便座の温水の設定温度を低めにしている」の+18.9 ポイント，「家族が続けて入浴するようにしている」の+18.4 ポイント，「地球温暖化対策のため，省エネを心がけている方の有無」の+10.3 ポイントである．上位 2 項目は，HEMS 導入世帯の方が温水洗浄便座の平均保有台数が多いことや世帯人数が多いことも影響する．「地球温暖化対策のため，省エネを心がけている方の有無」も属性の影響を受ける可能性はあるが，+10.3 ポイントとその差は大きい．

なお，HEMS 導入世帯の方が該当率が低い項目は少なく，差が顕著なのは「ガスコンロを使うときは，炎が鍋底からはみ出さないように調整している」の-24.7 ポイントと，「給湯器を使用しないときは，コントローラーの電源を切るよ

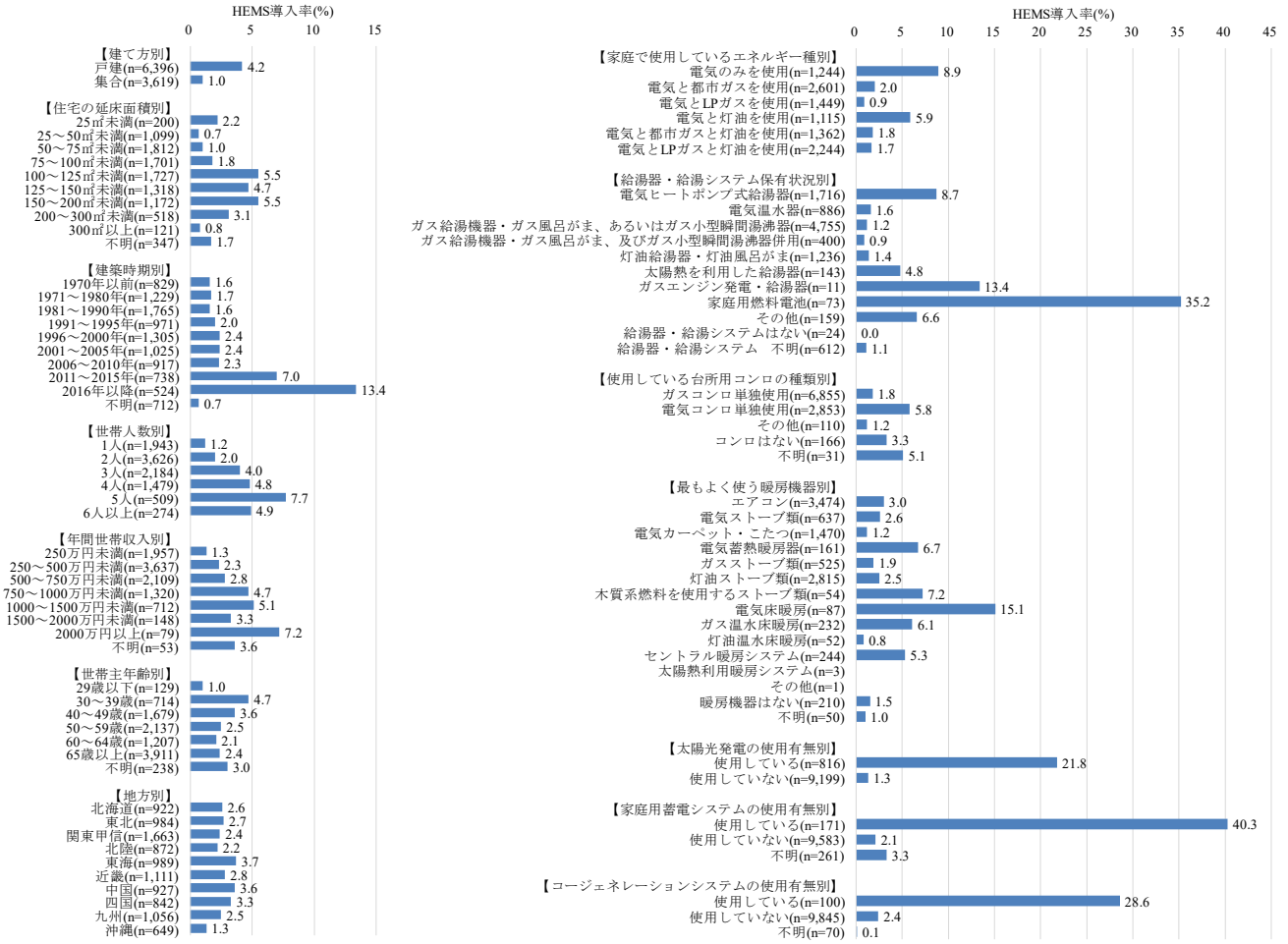


図 2　属性別の HEMS 導入率

表 1　HEMS 導入有無別の意識・行動率

	導入している	導入していない	差分
1 省エネルギーに心掛けている方の有無	91.7	88.8	2.9
2 光熱費を節約するため、省エネを心がけている方の有無	88.8	82.7	6.1
3 冷蔵庫を開けたままにしたり、むやみに開閉しないようにしている	87.5	87.3	0.2
4 エアコンの室外機の吹き出し口に物を置かないようにしている	86.3	85.4	0.9
5 シャワーを使うときは、不必要に流したままにしない	81.7	76.2	5.5
6 パソコンを使用しないときは電源を切るか低電力モード（”スリープ”等）に切り替えている	79.4	73.4	6.0
7 短時間でも場所を離れるときは消灯を心がけている	78.3	75.9	2.4
8 食器を手洗いするときは、お湯を流したままにしない	75.4	69.3	6.1
9 温水洗浄便座の温水の設定温度を低めにしている	75.0	56.1	18.9
10 地球温暖化対策のため、省エネを心がけている方の有無	71.9	61.6	10.3
11 冷蔵庫に物をつめこみ過ぎないようにしている	66.9	68.2	-1.3
12 炊飯器の保温機能を極力使用しないようにしている	65.3	64.5	0.8
13 明確な理由はないが、省エネを心がけている方の有無	64.6	61.0	3.6
14 家族が続けて入浴するようにしている	59.5	41.1	18.4
15 状況に応じて照明の明るさを調整している（減灯や自動調光機能の利用を含む）	58.2	51.5	6.7
16 冷房時にすだれやブラインドなどで日射をさえぎるようにしている	52.3	50.5	1.8
17 冬以外は暖房便座機能を使用しない	50.4	46.7	3.7
18 調理を行うときは、電子レンジで下ごしらえを行うようにしている	50.0	45.3	4.7
19 冷蔵庫の温度設定を夏は“中”以下、他の季節は“弱”にしている	45.4	44.2	1.2
20 ガスコンロを使うときは、炎が鍋底からはみ出さないように調節している	42.8	67.5	-24.7
21 その他の理由で省エネを心がけている方の有無	38.0	35.1	2.9
22 他の世帯が省エネ行動をしているため、省エネを心がけている	34.9	35.6	-0.7
23 テレビの明るさを抑えている	34.1	31.7	2.4
24 給湯器を使用しないときは、コントローラー（リモコン）の電源を切るようにしている	31.0	41.3	-10.3
25 テレビを使用しないときは主電源をオフにしている	29.9	28.4	1.5

うにしている」の-10.3 ポイントくらいである．これには，HEMS 導入世帯の方がガスコンロやガス給湯機器・ガス風呂がまの保有比率が低いことが影響している．

3.3 個票データを用いた統計分析の共通前提

以降では，家庭 CO_2 統計の個票データに基づき，統計的な分析を行う．3.4 節で重回帰分析，3.5 節で傾向スコアを用いた分析を行うが，分析対象となるデータは共通である．

表 2 は，統計分析の対象データのサンプル数と平均値である．全体の値とともに，HEMS 非導入世帯を意味する対照群(control group)と HEMS 導入世帯を意味する処置群(treatment group)の値を示す．

(1) サンプル数

個票データはもともと 10,015 サンプルであるが，統計分析のために例えば建築時期や HEMS 導入状況が「わからない」と回答したサンプルを除外するため，抽出後の 7,742 サンプルを分析対象としている [iii]．内訳は，対照群が 7,499 サンプル，処置群が 243 サンプルである．

(2) 変数

検証対象は，HEMS の省エネ効果を最も代表する指標である年間電力消費量(kWh)とし，平均値は 4,481kWh である．処置群の方が大きいが，属性のバイアスによる影響も受けているため，ここでも単純に比較すべきではない．

住宅属性関連では，戸建ダミー，延床面積，建築年 [iv] を与える．ダミーは，該当時は 1，非該当時は 0 となる変数である．世帯属性関連では，世帯人数，世帯年収(百万円)[v]，世帯主年齢 [vi] を与える．機器属性関連では，各種家電製品等の使用台数(14 変数)，電気ヒートポンプ給湯器，電気温水器，電気コンロの使用ダミー，最もよく使う暖房機器のうち各種電気機器の使用ダミー(6 変数)，太陽光発電，蓄電システム，コージェネレーション，電気自動車・プラグインハイブリッド(PHV)車，電気式融雪機器の使用ダミーを与える．地域属性としては，関東甲信を基準とした 9 地域のダミーを与える．

これら変数の選択にあたっては，3.4 節の重回帰モデルの偏回帰係数の統計的有意性と符号条件，多重共線性の回避などを考慮した．例えば，乾燥機能付洗濯機台数と乾燥機能なし洗濯機台数を同時に変数として投入すると，VIF(variance inflation factor)が 5 を超えてしまうが，両者の相関係数はもともと高いため，乾燥機能なし洗濯機台数は投入しないこととした．蓄電システムダミーは，ここでは十分な説明力を持たないが，HEMS との関係や，3.5 節の傾向スコアを用いた分析での必要性を考慮して含むことにした．

HEMS 導入有無での平均値比較からは，処置群の主な特徴として，戸建比率が 87.1%と高い，建築年にして 10 年程度新しい，世帯人数が 3.10 人と多い，世帯年収が約 160 万円多い，ほとんどの家電製品は使用台数が多い，電気ヒートポンプ給湯器の使用率が 48.7%，電気コンロの使用率が 52.2%，太陽光発電の使用率が 58.1%，蓄電システムの使用率が 23.7%，コージェネレーションの使用率が 13.5%と高いことなどを把握できる．

表 2 統計分析の対象データ

	全体	対照群 (HEMS 非導入)	処置群 (HEMS 導入)
サンプル数	7,742	7,499	243
電力消費量(kWh)	4,481	4,460	5,157
HEMS 導入ダミー	0.030	0	1
住宅属性			
戸建ダミー	0.607	0.599	0.871
延床面積(百㎡)	102.6	101.9	124.9
建築年	1992.2	1992.0	2001.6
世帯属性			
世帯人数	2.39	2.37	3.10
世帯年収(百万円)	5.53	5.48	7.10
世帯主年齢	60.8	60.9	56.7
家電製品等の使用台数			
冷蔵庫	1.21	1.21	1.28
エアコン	2.41	2.39	3.04
テレビ	1.82	1.81	2.04
乾燥機能付洗濯機	0.34	0.34	0.53
電気式衣類乾燥機	0.05	0.05	0.07
食器洗い乾燥機	0.28	0.27	0.59
食器乾燥機	0.08	0.08	0.09
ウォーターサーバー	0.04	0.04	0.15
温水洗浄便座	0.96	0.95	1.38
加湿器	0.37	0.37	0.56
除湿機	0.24	0.24	0.23
空気洗浄機	0.47	0.46	0.59
パソコン	1.36	1.36	1.56
ビデオレコーダー等	0.99	0.99	1.23
給湯器使用ダミー			
電気ヒートポンプ給湯器	0.161	0.151	0.487
電気温水器	0.083	0.084	0.058
電気コンロ(IH 等)使用ダミー	0.261	0.253	0.522
暖房機器最頻使用ダミー			
エアコン	0.365	0.364	0.404
電気ストーブ類	0.072	0.072	0.071
電気カーペット・こたつ	0.158	0.161	0.069
電気蓄熱暖房器	0.012	0.011	0.029
電気床暖房	0.009	0.008	0.044
電気セントラル暖房システム	0.004	0.003	0.016
その他機器の使用ダミー			
太陽光発電	0.076	0.061	0.581
蓄電システム	0.015	0.008	0.237
コージェネレーション	0.013	0.009	0.135
電気自動車・PHV 車	0.014	0.013	0.035
電気式融雪機器	0.003	0.003	0.000
地域ダミー(基準：関東甲信)			
北海道	0.048	0.048	0.038
東北	0.067	0.066	0.076
北陸	0.036	0.037	0.024
東海	0.108	0.107	0.132
近畿	0.168	0.168	0.164
中国	0.056	0.055	0.075
四国	0.030	0.030	0.042
九州	0.099	0.099	0.099
沖縄	0.008	0.008	0.005

3.4 重回帰モデルを用いた HEMS の省エネ効果の分析

まず，年間電力消費量を被説明変数とし，HEMS 導入ダミーを含む表 3 に示した 44 の変数を説明変数として，サンプル全体に対して重回帰モデルによる統計分析を行う．

表 3 は重回帰分析の結果であり，HEMS 導入ダミーの偏回帰係数は-309kWh で，有意水準 5%で統計的に有意であった．通常であればこの偏回帰係数を HEMS 導入による省エネ効果と解釈することもできるが，ここでは説明変数が多く，HEMS 導入ダミーが 1 となるサンプル数は少なめで相関のある変数の存在も予想される中で，安定的な結果が得られていない可能性もあることに注意が必要である．

表 3 重回帰モデルの推定結果

	偏回帰係数		標準誤差
HEMS 導入ダミー	-309	*	(131)
住宅属性			
戸建ダミー	270	***	(58.2)
延床面積(百㎡)	4.39	***	(0.53)
建築年	-6.54	***	(1.55)
世帯属性			
世帯人数	623	***	(20.0)
世帯年収(百万円)	34.1	***	(6.20)
世帯主年齢	15.2	***	(1.79)
家電製品等の使用台数			
冷蔵庫	690	***	(44.1)
エアコン	193	***	(19.3)
テレビ	110	***	(26.0)
乾燥機能付洗濯機	107	*	(44.3)
電気式衣類乾燥機	262	**	(89.9)
食器洗い乾燥機	332	***	(52.3)
食器乾燥機	196	*	(76.0)
ウォーターサーバー	697	***	(99.5)
温水洗浄便座	117	**	(36.3)
加湿器	92.1	**	(34.1)
除湿機	110	**	(41.8)
空気洗浄機	135	***	(31.0)
パソコン	95.6	***	(21.9)
ビデオレコーダー等	155	***	(26.6)
給湯器使用ダミー			
電気ヒートポンプ給湯器	1,423	***	(74.1)
電気温水器	2,605	***	(78.9)
電気コンロ(IH 等)使用ダミー	801	***	(59.8)
暖房機器最頻使用ダミー			
エアコン	877	***	(50.4)
電気ストーブ類	863	***	(85.6)
電気カーペット・こたつ	175	**	(63.3)
電気蓄熱暖房器	6,247	***	(196)
電気床暖房	2,017	***	(219)
電気セントラル暖房システム	3,240	***	(337)
その他機器の使用ダミー			
太陽光発電	-1,289	***	(90.2)
蓄電システム	-176		(179)
コージェネレーション	-2,057	***	(188)
電気自動車・PHV 車	576	**	(176)
電気式融雪機器	809	*	(357)
地域ダミー(基準：関東甲信)			
北海道	279	*	(109)
東北	504	***	(90.2)
北陸	712	***	(116)
東海	-207	**	(71.1)
近畿	-13.6		(60.6)
中国	238	*	(94.5)
四国	2.61		(123)
九州	-6.81		(75.0)
沖縄	8.36		(234)
切片	10,979	***	(3123)

***は 0.1%，**は 1%，*は 5%，・は 10%水準で統計的有意．
n=7,742，R2＝0.645，調整後 R2＝0.643

3.5 傾向スコアを用いた HEMS の省エネ効果の分析

このような状況も踏まえて，バイアスを減らすことができてモデルの誤設定にも強いとされる，傾向スコア(propensity score)を用いた分析を行う．

(1) 分析の基本的枠組み

傾向スコアを用いた分析の基本的枠組みを図 3 に示す．

結果変数 y_i は電力消費量である．処置変数 z_i は因果推論

における原因を表す変数で，ここではHEMS導入ダミーである．共変量 $\boldsymbol{x}_i$ は，処置変数と結果変数の両方に関連し，時間的に先行する交絡因子であり，前傾表2の一覧から電力消費量とHEMS導入ダミーを除いた変数である．

傾向スコア e_i は，処置群に割り付けられる確率を表し，ロジスティック回帰モデルによって求められる(式1). 傾向スコアを用いた分析には，標準形である傾向スコア調整法のほかに, 拡張形である傾向スコア逆確率重み付け法(IPW)や，より高度な拡張形である二重にロバストな推定法(doubly robust estimator, DR)がある．DR法は，共変量によって結果変数を説明するモデルの予測値である$\hat{y}_{i1}, \hat{y}_{i0}$も用いて，処置群と対照群の周辺期待値を推定し(式2，式3)，両者の差を効果とみなす手法である．共変量によって処置変数を説明するモデル(傾向スコアを推定するモデル)と，共変量によって結果変数を説明するモデルのどちらかが正しく指定されていれば, 因果効果を正しく推定できるため，より頑健であるとされている．本研究では，傾向スコアが小さいサンプルも多く，傾向スコア逆確率をそのまま用いると結果が不安定になる可能性があることなども考慮し，DR法を用いることにした．

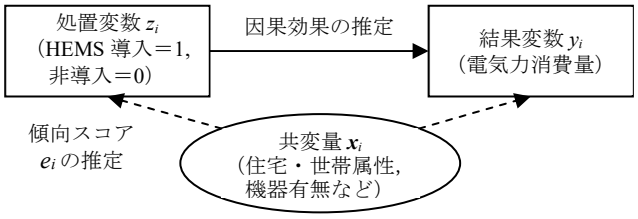


図 3　変数間の関係と分析枠組み

$$e_i = p(z_i = 1|x_i) = \frac{1}{1 + exp(-\alpha^T x_i)} \quad (1)$$

$$\hat{E}(y_1) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{z_i}{e_i}y_{i1} + \left(1 - \frac{z_i}{e_i}\right)\hat{y}_{i1}\right\} \quad (2$$

$$\hat{E}(y_0) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{1 - z_i}{1 - e_i}y_{i0} + \left(1 - \frac{1 - z_i}{1 - e_i}\right)\hat{y}_{i0}\right\} \quad (3)$$

(2) 傾向スコアの推定

表4は，共変量によって処置変数(HEMS導入ダミー)を説明するロジスティック回帰分析の結果である．統計的有意性に注目して主な解釈をすると次のとおりである．

顕著な特徴として, 太陽光発電, コージェネレーション，蓄電システムを使用している場合に，HEMS導入確率は高くなる．ウォーターサーバー台数の偏回帰係数は正，空気清浄機台数は負であり，これらをHEMS導入への直接的な影響であるとは解釈しづらいが，結果変数に直接的な影響を及ぼすため，共変量として投入している．建築年が新しくなるほど，HEMS導入確率は高くなる．

表 4　ロジスティック回帰モデルの推定結果

	偏回帰係数		標準誤差
住宅属性			
戸建ダミー	0.496	・	(0.284)
延床面積(百㎡)	0.001		(0.002)
建築年	0.015	*	(0.007)
世帯属性			
世帯人数	0.037		(0.068)
世帯年収(百万円)	-0.020		(0.022)
世帯主年齢	-0.008		(0.007)
家電製品等の使用台数			
冷蔵庫	-0.075		(0.138)
エアコン	-0.045		(0.062)
テレビ	-0.076		(0.085)
乾燥機能付洗濯機	0.233		(0.150)
電気式衣類乾燥機	0.265		(0.280)
食器洗い乾燥機	0.139		(0.173)
食器乾燥機	0.256		(0.254)
ウォーターサーバー	0.828	**	(0.253)
温水洗浄便座	0.107		(0.121)
加湿器	0.079		(0.101)
除湿機	-0.131		(0.147)
空気洗浄機	-0.228	*	(0.100)
パソコン	-0.016		(0.079)
ビデオレコーダー等	0.164	・	(0.098)
給湯器使用ダミー			
電気ヒートポンプ給湯器	0.460	・	(0.243)
電気温水器	-0.123		(0.320)
電気コンロ(IH等)使用ダミー	-0.011		(0.224)
暖房機器最頻使用ダミー			
エアコン	0.118		(0.183)
電気ストーブ類	-0.155		(0.421)
電気カーペット・こたつ	-0.093		(0.277)
電気蓄熱暖房器	-0.077		(0.462)
電気床暖房	0.586		(0.439)
電気セントラル暖房システム	0.244		(0.668)
その他機器の使用ダミー			
太陽光発電	2.018	***	(0.184)
蓄電システム	1.880	***	(0.229)
コージェネレーション	1.920	***	(0.348)
電気自動車・PHV車	0.300		(0.425)
電気式融雪機器	-13.2		(337)
地域ダミー(基準：関東甲信)			
北海道	0.056		(0.391)
東北	0.068		(0.310)
北陸	-0.322		(0.374)
東海	0.012		(0.285)
近畿	0.151		(0.284)
中国	0.025		(0.295)
四国	0.081		(0.299)
九州	-0.306		(0.297)
沖縄	-1.016	・	(0.562)
切片	-34.2	*	(13.4)

***は 0.1%，**は 1%，*は 5%，・は 10%水準で統計的有意.
n=7,742，c 統計量=0.862

得られたロジスティック回帰モデルを用いて各サンプルの傾向スコアを推定した後，対照群と処置群の分布を比較すると図4のようになる．処置群の方が傾向スコアが大きくなることは明らかである一方，群間で分布が大きく異なることに留意する必要がある．傾向スコア調整法は集団全体の効果を分析するのには適しておらず，また，傾向スコアが小さいサンプルも多い状況下でそのまま傾向スコアの逆確率を用いると，分母である傾向スコアがゼロに近いサンプルの影響力が大きくなり過ぎて結果が不安定になる可能性があることから，IPW法を用いるのも適切とは言い難

い．このため，集団全体の平均効果（average treatment effect, ATE）をロバストに推定できるDR法を用いることにした．

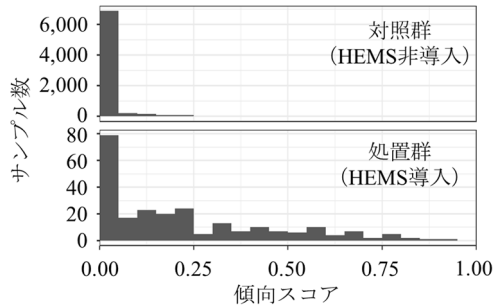


図 4　傾向スコアの分布

共変量のバランスを確認するための参考として，処置群に対照群を最近隣法でマッチングさせた場合の標準化差(standardized difference)を図 5 に示す(変数順は表 4 に同じ)．例えば連続変数の標準化差は，(処置群の平均－対照群の平均)÷{(処置群の標本分散＋対照群の標本分散)の平方根}で表される．目安としては絶対値が 0.1 より小さければバランスが取れているとされ，調整前には多くの共変量でこの条件を逸脱するが，調整後には戸建，エアコン使用，蓄電システム使用ダミーの 3 変数で僅かに 0.1 を上回るのみであり，全体的にバランスしていることがわかる．

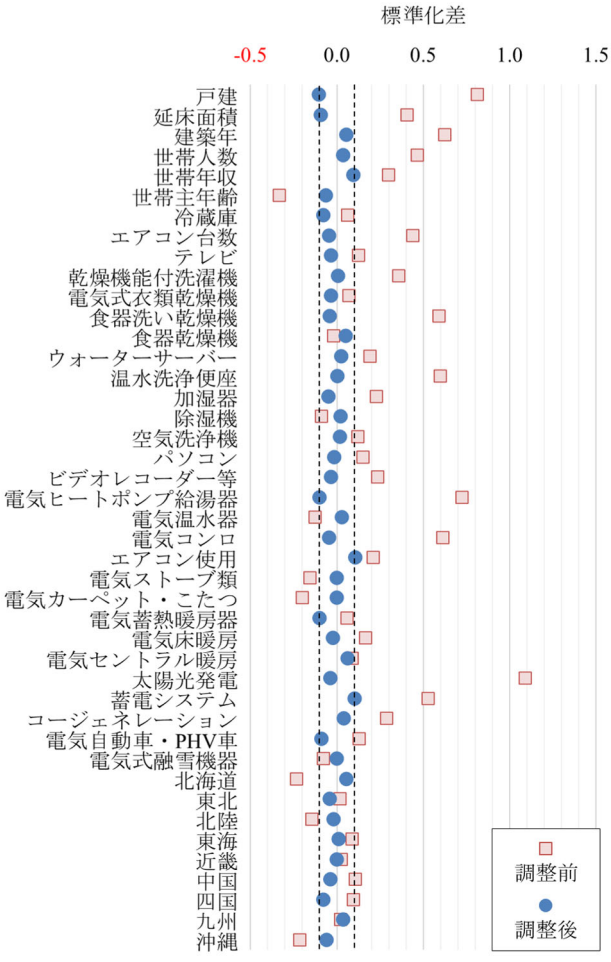


図 5　共変量の標準化差

(3) Doubly Robust 推定量の結果

表 5 に DR 推定量の結果を示す．処置群の周辺期待値(全サンプルが HEMS を導入した場合の消費量)と対照群の周辺期待値(全サンプルが HEMS を導入しなかった場合の消費量)の差から，省エネ量は 255kWh と推定された．この差を対照群の周辺期待値で割ると，省エネ率は 5.7%と推定される．一方，これらの省エネ効果は統計的に有意ではなく，本研究からは効果の有無の判断は難しい．3.4 節の結果を若干下回っているが，重回帰モデルの結果は HEMS 導入世帯が戸建住宅や世帯人数の多いサンプルに偏っていることの影響を受けやすいことなども一因と推察される．

表 5　Doubly Robust 推定量

	対照群 (HEMS 非導入)の 周辺期待値	処置群 (HEMS 導入)の 周辺期待値	差 処置群-対照群
電力消費量(kWh)	4,492	4,236	-255 (標準誤差 184) p=0.16

なお，DR 法は傾向スコア調整法や IPW 法よりも頑健な手法であるが，分析対象データの特性に左右されることには変わりない．分析の精度が落ちることから概要説明にとどめるが，この理解を確認するために 3 つの参考分析を付記する．第一に，太陽光発電，蓄電システム，コージェネレーションのいずれかを使用したサンプルは除外して分析した．これらの機器が発電や充放電を行うため，結果に意図しない影響を及ぼす可能性があることを考慮したものだが，処置群として 78 サンプルしか確保できなかった．そのため，重回帰分析の結果が符号条件を満たさない，10 個以上の共変量について標準化差の絶対値がバランスの目安とされる 0.1 を超えるなどの問題が散見され，省エネ効果の DR 推定量は 144kWh であったが，定量的な議論ができる統計分析とは言い難い．第二に，共変量から家電製品等の使用台数を除外して分析した．DR 推定量は 59.5kWh となったが，家庭製品等の使用台数は結果変数に影響を及ぼしていて群間差もあったことや，影響の出やすい世帯人数や世帯年収の標準化差の絶対値が 0.1 を超えたことから，補正が十分でない可能性がある．第三に，傾向スコアが閾値を下回った場合の影響抑制処理を試みた．これは，傾向スコアが小さいサンプルも多く，逆確率を乗じることによる特定のサンプルの影響の拡大を避けるためであり，このような閾値を用いた補正方法は複数あり，閾値の絶対的な基準はないが，例えば閾値が 0.1 を下回った場合に 0.1 で代替した場合の DR 推定量は 164kWh であった．これら 3 つの参考分析の結果は，定量的な比較考察をするのに十分ではないが，HEMS 導入世帯の属性は大きく偏っているとい

う本来的な難しさや，十分なサンプル数や共変量データが確保できない場合の方法論的な難しさを示唆している．

４．まとめ

4.1 主な結果

本研究では，令和 2 年度家庭 CO_2 統計データを用いて，HEMS 導入世帯の住宅・世帯属性等の特徴や，HEMS 導入による電力消費量の削減効果を分析した．分析にあたっては，HEMS に関する既往研究から浮かび上がる課題を踏まえ，統計データなど自然状態の観測に基づき，非導入世帯との属性の偏り(バイアス)を補正する必要があることなどを指摘した．この観点から，HEMS 導入確率に相当する傾向スコアを推定した上で，傾向スコアを用いた因果推論手法の中でも正確性が高いとされる，二重にロバストな推定法(doubly robust estimator)を適用した．その結果，HEMS 導入により年間電力消費量は 255kWh(5.7%)減少すると推定された．一方，分析結果は統計的に有意ではなく，HEMS 導入世帯の特性が大きく偏っていることに伴う課題も示唆された．

調査対象時期が 2020 年度であることを勘案すると，以上の結果は制御機能よりも見える化機能の効果が中心であると推察される．実際には，HEMS の提供方法は多様であり，既往研究もその提供方法によっても効果が異なることを指摘しているが，本研究では統計データの制約上，その区別はできない．今後，機能の変化にあわせて，より高い解像度で効果分析をする必要も出てくるであろう．

4.2 考察

最後に，分析手法への期待と課題，温暖化対策検討への示唆，統計データの意義の 3 点について考察する．

第一に，分析手法への期待と課題である．HEMS は機器の設置を伴うのが一般的であるため，ランダム化比較対照実験のような介入型研究で理想的な条件下で効果検証をするのはハードルが高い．そのため，本研究のように観察型研究による効果検証も選択肢となる．とはいえ，バイアスのある群間の比較には，十分なサンプル数の確保はもちろんのこと，バイアスを補正するための変数の確保，適切な分析手法の選択が求められる．実際，HEMS は太陽光発電，蓄電システム，コージェネレーションなどとセットで導入されることもあり，導入世帯のバイアスは大きい．普及が進めばこうしたバイアスは小さくなっていくだろうが，現状では分析上の課題があることを認識する必要がある．

第二に，温暖化対策の検討への示唆である．本研究で検証した省エネ効果は見える化機能を念頭に置いたものであり，制御機能の効果はまだ顕在化していない可能性が高いため，HEMS の効果は今後も注視していく必要がある．一方，HEMS の導入は遅れていることや，既往研究で宅内モニターの省エネ効果は見える化の中では高いとされるが長く検証すると効果が小さくなると指摘されていること，本研究で示唆された導入時の省エネ効果も加味すると，現行の温対計画やエネルギー基本計画の関連検討で盛り込まれた，HEMS やスマートホームデバイスの普及により多くの世帯で電力消費量が 10%削減されるという目標水準の達成は現状では容易でないと考えられる．カーボンニュートラル社会の実現に向けて，進捗状況を踏まえて目標を適宜見直し，より確実な効果が期待できる他の対策の強化も検討していく必要があると考えられる．

第三に，統計データの意義である．本研究では，HEMS の導入世帯の特徴把握や省エネ効果の分析のために，家庭 CO_2 統計を活用した．HEMS はまだ普及が進んでいないため，明確な効果分析まではできなかったが，今後のデータ蓄積によって，どのように導入が拡大するのかや省エネ効果が変わるのかなどを検証できる可能性がある．統計データを政策検討に活用することは重要であり，その一例となれば幸いである．

謝辞

本研究は，環境省「令和 5 年度民生部門における脱炭素化対策・施策検討委託業務」(委託先：株式会社建設技術研究所)の一環で実施し，家庭 CO_2 統計の個票データはエネルギー・資源学会の「家庭部門の CO_2 排出実態統計調査利用研究会」のメンバーとして利用した．関係諸氏に対して謝意を表す．なお，結果にかかる責任は筆者が負う．

参考文献

1) 閣議決定; 地球温暖化対策計画, (2021.10.22).
2) 地球温暖化対策推進本部; 2021 年度における地球温暖化対策計画の進捗状況, (2023.6.30).
3) 中野諭, 鷲津明由; HEMS に対する消費者の導入意思についての要因分析，日本エネルギー学会誌, 97-7(2018), pp.205-215.
4) 河路友也; ZEH 実現に貢献するツールとしての HEMS の活用法に関する研究 その 1 HEMS 利用者に対する HEMS と ZEH に関する WEB アンケート調査結果, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集(2018.10), pp.193-196.
5) 八木田克英, 岩船由美子, 畑泰彦; 見える化 HEMS の閲覧行動とコミュニケーション効果, エネルギー・資源学会論文誌, 35-4(2014), pp.50-58.
6) 加藤力也; 家庭用エネルギー管理システム(HEMS)の普及に関する課題とその動向―過去の実証の分析による課題整理―, 電力中央研究所報告 Y12011(2013).

7) 平山翔, 中村美紀子; 新築住宅に導入された HEMS の省エネ効果に関する実証研究, 第 40 回エネルギー・資源学会研究発表会 講演論文集(2021.8), pp.225-228.
8) 鶴崎敬大; HEMS, 電子情報通信学会「知識ベース」, S4 群－4 編－1 章(2009), pp.20-23.
9) 石田建一, 佐藤誠; HEMS による家庭用冷暖房・照明エネルギーの削減効果の検証,日本建築学会環境系論文集, 70-595(2005), pp.57-64.
10) 飯島雅人; HEMS によるエネルギー需要マネジメント, エネルギー・資源, 43-1(2022), pp.50-54.
11) 岩船由美子, 金森淳一郎, 伊藤章, 榊原久介; ポスト FIT 時代の HP 給湯機の最適運用に関する検討, 第 33 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(2017.2), pp.403-408.
12) 山田愛花, 西尾健一郎, 岩船由美子; 自給自足住宅の多面的評価―PV・蓄電池の大容量化や運用高度化ポテンシャルの分析―, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), 143-3(2023), pp.226-238.
13) Ehrhardt-Martinez, K., Donnelly, K., and Laitner, S.; Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs: A Meta-review For Household Electricity-saving Opportunities, ACEEE Report E105(2010).
14) Zangheri, P., Serrenho, T., and Bertoldi, P.; Energy Savings from Feedback Systems: A Meta-Studies' Review, Energies, 12(19), 3788(2019).
15) Agarwal, R., Garg, M., Tejaswini, D., Garg, V., Srivastava, P., Mathur, J., and Gupta, R.; A Review of Residential Energy Feedback Studies, Energy and Buildings, 290, 113071(2023).
16) King, J.; Energy Impacts of Smart Home Technologies, ACEEE Report A1801(2018).
17) Environmental Protection Agency; ENERGY STAR Program Requirements for Connected Smart Thermostat Products (Rev. Jan 2017) (2017).
18) 西尾健一郎; 家庭 CO_2 統計の個票データと機械学習を用いた建築時期別光熱費の実態把握, エネルギー・資源学会論文誌, 42-3(2021), pp.175-184.

(注)

i) 同日に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画の関連資料である「2030 年度におけるエネルギー需給の見通し」では HEMS・スマートホームデバイスの導入率を 85%としており，4,941 万世帯はこれに対応する．

ii) 家庭 CO_2 統計の時系列統計表より．家庭 CO_2 統計は平成 29 年度から開始されており，2017 年度は 2020 年度を上回る．これらの傾向は，EDMC エネルギー・経済統計要覧 2023 年版でも同様である．2020 年度の消費量が多い背景には，新型コロナウイルスの影響で在宅時間が長かったこともあると考えられる．

iii) サンプル数減少の最大の要因は，建築時期が「わからない」の 712 サンプルである．建築時期が不明のサンプルは集合住宅に多く発生しやすく，抽出後の平均的な電力消費量を増加させる一因になるが，本研究はバイアスを補正した比較をするため，結論に大きな影響を与えるものではない．

iv) 建築時期の選択肢「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」「わからない」に対して，順に 1960.5，1975.5，1985.5，1993，1998，2003，2008，2013，2018 を代入し，不明のサンプルは除外した．

v) 世帯年収の選択肢「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」に対して，順に 1.25，3.75，6.25，8.75，12.5，17.5，22.5 を代入した(不明のサンプルは除外)．

vi) 世帯主年齢の選択肢「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」に対して，順に 4.5, 14.5, 24.5, 34.5, 44.5, 54.5, 62, 69.5, 82.5 を代入した(不明のサンプルは除外)．

光熱費データから冷蔵庫を分離する統計モデルの研究

Research on Statistical Models to Estimate Refrigerator Power Consumption Using Utility Bill Data

田 中 昭 雄 *
Tanaka Akio

Abstract
Currently, the only way to know the power consumption of a residential refrigerator is to check the data listed in the product catalog. However, there are many reports that this value differs from the actual value. Therefore, in this study, I developed a statistical model to estimate the amount of electricity consumed by refrigerators from utility bill data. To create the statistical model, this study collected 72 sets of refrigerator data that were operating from 1995 to 2018 and conducted statistical analysis. As a result, it was found that the annual electricity consumption of refrigerators had a high correlation with the quarterly electricity consumption of four types. Therefore, we define the refrigerator power index (IRx), which is an index of QEx based on QE1. By using this value as a variable in the RSVD (Regularized Singular Value Decomposition) method, we were able to obtain a more accurate value than the catalog value. Finally, we analyzed approximately 40,000 individual surveys using the RSVD method and created a statistical model formula for the annual power consumption of refrigerators.

Key words : Household, Refrigerator, JIS, Utility bill data

1. 研究の背景・目的

住宅の冷凍冷蔵庫や冷凍庫（以下まとめて“冷蔵庫”）の世帯普及率は 1980 年代前半に 1 世帯当たり 1 台を超えた．その電力消費量は 500～600kWh/年[1), 2)]とされ，これは住宅の電力消費量[3)]の 15%以上に相当する．この値は調査値ではなく予測値である．その方法は製造年別カタログ性能（JIS 値[4)]）やその残存率，庫内環境などを考慮した積み上げ値で，海外でも類似方法での計算例がみられる[5)]．

しかし冷蔵庫の JIS 値摘要範囲は限られるため，これまで何度も改定されてきた．JIS 測定法の変遷を**表 1** に示す．測定法が制定されたのは 1979 年で A 法と呼ばれる．これは 1993 年に改訂され B 法，1999 年以降の改訂は C 法と呼ばれ，2006 年と 2015 年にも改訂された（以下“C99 法”，“C06 法”，“C15 法”）．しかし数度の改訂でも多様な周辺環境や使用状況を完全に反映するのは困難である．JIS では冷蔵庫側面中央から 300㎜ 程離れた点を環境温度（JIS 室内温度）と規定しているが．現実の設置環境では冷蔵庫の放熱部と壁との間隔が 300㎜ 以下の場合も多い．間隔が不十分な場合は，放熱部の空気対流熱伝導率は壁との距離・壁の形状・材質，風速により異なり環境計測方法を一律に定めることは困難である．過去の研究例を見ても冷蔵庫の環境温度の測定条件を放熱部と壁の位置関係を考慮して規定したものは少なく，異なる測定条件の環境値を同一視した検討の存在が予想される．

表 1 冷蔵庫の消費電力測定法（JIS）[4)]

呼称（制定年）	JIS室内温度（日数）［周囲相対湿度］		扉開閉	庫内設定温度	
				冷蔵室	冷凍室
A法 (1979)	30℃(100日)	15℃(265日)	冷蔵室50回/1日 冷凍室15回/1日	3±0.5℃	-18±0.5℃
	［75±5%］				
B法 (1993)	25℃（365日） ［45～85%］		開閉なし	5℃以下	-18℃以下
C99法 (1999)	25℃(365日) ［70±5%］		冷蔵室25回/1日, 冷凍室8回/1日	5℃以下	-18℃以下
C06法 (2006)	30℃±1℃ (180日)	15℃±1℃ (185日)	冷蔵室35回/1日, 冷凍室8回/1日	4℃以下	-18℃以下
	［70±5%］	［55±5%］			
C15法 (2015)	32±0.5℃ (205日)	16±0.5℃ (160日)	冷凍室 1回／日, 冷蔵室 1回／日	4℃以下	-18℃以下
	［70±5%］	［55±5%］			

これまで冷蔵庫消費電力の研究では冷蔵庫周囲や設置した部屋の温度，庫内の食品収納状況や設定モード，ドアの開閉回数の重要性が指摘されてきた．砂原等[6)]は，外気温を変数とするシミュレーションモデルを用いて，外気温が 30℃から 15℃に変化した場合の実消費電力量を推定できるとした．坂本等[7)]は JIS 値と実消費電力量の乖離を，設備の使用や使用状況を考慮した統計解析で JIS 値の改善効果を予測した．

河野等[8)]，日本建築学会[9)]や筆者等[10), 11)]も同様に実測調査を行っているが，これらの研究ではいずれも実消費電力量が JIS 値と 2 倍以上の相違がある事例を報告している．

河野等[8)]の研究では，環境温度計測点を JIS 室内温度測定点ではなく冷蔵庫下とし，その温度が 24.5～25.5℃の消費電力を計測できれば年間実消費電力量が推定可能とした．注目すべきは，同一設備であればその消費電力量は基準となる室内温度と比例関係を想定できることを示したことで

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

ある．筆者は光熱費を正則化処理した特異値分解法”（RSVD 法: Regularized Singular Value Decomposition Method）[12] で各種エネルギー用途に分解する手法を提案しているが，冷房，暖房，給湯需要については気象度日などの基準量との単純な線形性を仮定し，設定温度や使用時間などは考慮していない．それは同一の理由による．ただし推定値が誤差により極端に変動することを抑制するため L2 正則化 [13] 処理を施している．しかし冷蔵庫は，これまでにこの条件を満たす説明変数が見いだせず分解対象外であった．

そこで本報では冷蔵庫の実測データを解析し，その消費電力量と線形性を有する説明変数を特定し，RSVD 法で冷蔵庫の消費電力量を推定可能にすることを目標とする．さらに環境省「家庭部門の CO2 排出実態統計調査」(SSH) [14] の個票に適用し，地域性，住宅属性や世帯属性を考慮した冷蔵庫消費電力量統計モデルを作成することで，その電力需要の発生構造を明らかにする．

2. 研究手法

2.1 冷蔵庫消費電力計測データの収集

冷蔵庫の消費電力は，多様な要因に影響をうけるので，それらの影響が混在する様に新旧 3 文献[9)~11)]から冷蔵庫の計測データを収集し，その説明変数を明らかにする．

本研究で収集・分析した設備の概要を**表 2** に示す．対象設備は，消費電力を 1 年以上計測し，かつデータ欠測率 10%以下の 72 台である．設備の所在地は北海道，東北，北陸（まとめて“寒冷地域”）が 30 台，関東関西が 29 台，九州 13 台である．省エネルギー法の地域区分ではⅡ～Ⅶ地域に該当する．設備容量は 357 *L*～512 *L* である．製造年は型番と計測時期から 1991 年～2016 年製と推測される．製造年が正確に特定できない設備もあるので本報告では製造年の代わりに JIS タイプで記す．例えば”B/C99”は製造時期 1995 年～2003 年，“A/B”は 1995 年以前の設備である．判明している場合は**表 1** の呼称で記す．

2.2 計測データの分析

実消費電力と JIS 値，外気温，冷蔵庫周辺の環境温度，世帯員数等との関係を解析し，実電力消費量と線形性を有する説明変数を特定する．

なお，冷蔵庫の消費電力に影響する環境温度の測定方法は設備毎に一律でないので，本報告では全て“室内温度”と記す．

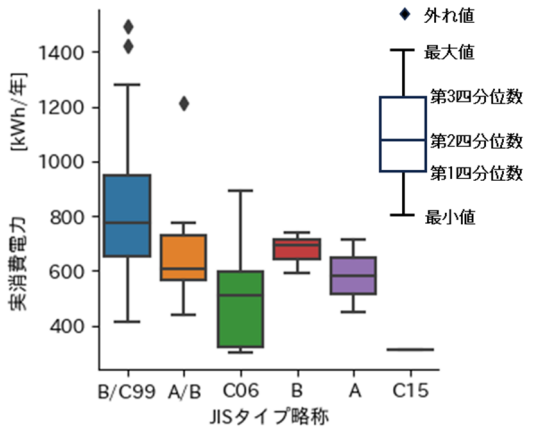
2.3 冷蔵庫推定精度の確認と冷蔵庫統計モデルの開発

特定した説明変数を用いて冷蔵庫の消費電力量（RSVD 値）を求め JIS 値の精度と比較する．次いで SSH の個票データを RSVD 法で分解し，冷蔵庫の年間消費電力量を推定する統計モデルを作成する．

表 2　分析対象計測データの概要

地域（省エネ法区分）	製造年	台数	計測期間	データ引用[文献番号]
寒冷地域※（Ⅱ～Ⅴ）	2003年以前	30	2003～2005年	建築学会[9)]
関東・関西（Ⅴ，Ⅵ）	1990～1996年	13	1995～1997年	筆者等[10)]
	2003年以前	16	2003～2005年	建築学会[9)]
九州（Ⅵ，Ⅶ）	2003年以前	7	2003～2005年	建築学会[9)]
	2000～2016年	6	2017～2018年	筆者[11)]
	計	72		

※寒冷地域：北海道，東北，北陸
文献番号：引用文献リスト参照



※B/C99：製造時期 2003 年以前
A/B　：製造時期 1995 年以前

図 1 年間実消費電力量と製造時期（JIS 基準）との関係

3. 冷蔵庫消費電力計測データの分析

3.1 実消費電力量

(1) JIS タイプと JIS 値

全設備 72 台中 JIS タイプ B/C99 は 54 台と最も多い．次いで最も古い製造時期の A/B は 7 台，C06 は 5 台，最も古い A，B と最新の C15 の 3 タイプ合計は 7 台である．

JIS タイプ別実消費電力量の分布を**図 1** でしめす．実消費電力量平均値の最大は B/C99 が 822kWh/年，次いで A/B が 693kWh/年，C06 が 525kWh/年である．A，B，C15 の 3 タイプ平均は 582kWh/年である．JIS タイプ別平均値から見て製造時期と実消費電力量の明瞭な相関性は確認できない．

JIS 値が判明している 29 台について，実消費電力を JIS 値で除した結果を**図 2** に示す．棒グラフは台数，実線はカーネル密度分布 [15] で，これは有限の標本点から全体の分布を推定するノンパラメトリック推定値である．実消費電力量／JIS 値の最小は 0.8，平均 1.5，最大は 2.6 である．JIS 値の誤差平均は 40%である．

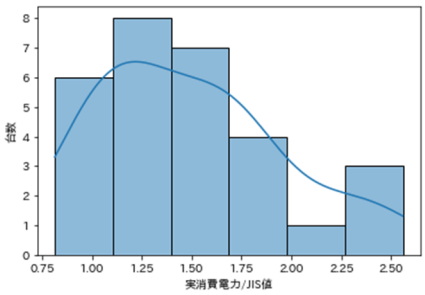


図 2　JIS 値と実消費電力量との関係

(2) 世帯員数

世帯員数と実消費電力量には相関性が確認できるが，その状況を**図 3** に示す．世帯員数 1 人で約 70kWh/年増加する．単身世帯は 1 世帯のみなので参考値であるが，72 台中最小の電力消費量 310kWh/年である．しかし設備容量は 512*L* と 72 台中最大で，JIS タイプは最新の C15 である．

(3) 外気温と室内温度

冷蔵庫の設置場所の年平均外気温と室内温度との関係を**図 4** に示す．設備所在地の平均外気温は 9～19℃で，その温度巾は 10℃であるが，室内温度は 20℃～25℃と温度巾は 5℃と小さい．寒冷地域では室内温度が全て 21.5℃以上で，温暖な 2 地域より低温とは言えない．外気温と室内気温の相関性は r =－0.15 と弱い逆相関である．

(4) 実消費電力量と外気温及び室内温度

図 5 に冷蔵庫の実消費電力量と外気温及び室内温度との関係を示す．実消費電力量と室内温度は r = 0.34 と弱い相関性があるが外気温とは r =－0.06 と相関性がない，

(5) 月別消費電力パターン

図 6 は 3 地域の月別実消費電力量とその相関行列である．月変動パターンは 3 地域ともに類似しておりそれぞれ r=0.98 と相関性が高い．これは住宅の室内温度が，季節の着衣量に応じた不快過ぎない温度[16), 17)]に維持されるためと考えられる．

詳細に見ると寒冷地の実消費電力量は冬期が 3 地域中最大で，夏期は最小である．これは寒冷地の室内温度が冬期は温暖な地域よりも高めに維持され，夏期は低めに維持されていることを示す．これには寒冷地域住宅の高い断熱性も影響していると考えられる．関東関西は夏期の消費電力量が最大なことから，室内温度は 3 地域中最大と予想される．

(6) 四半期実消費電力量 *QE* と冷蔵庫電力指数 *IR*

設備毎の四半期消費電力量 QE_x（QE_1 は 1 ～ 3 月合計値）と年間消費電力量 QE_y との関係を**図 7** に示す．**図 7** 右上は散布図とその回帰線，**図 7** 左下はカーネル密度とその回帰線である．すべての QE_x は他の *QE* と比例関係が認められる．

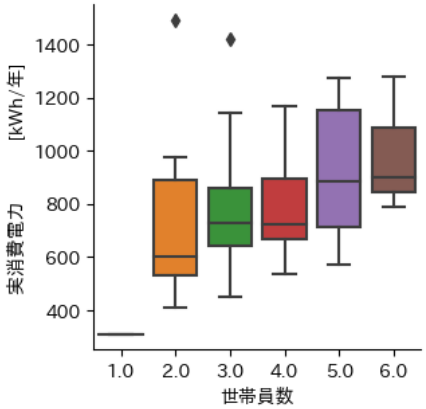


図 3　年間実消費電力量と世帯員数の関係

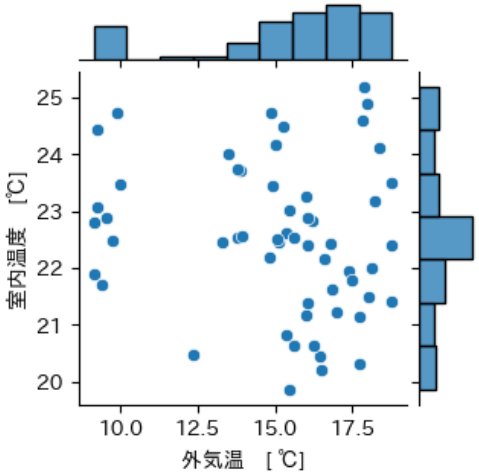


図 4　外気温と室内温度

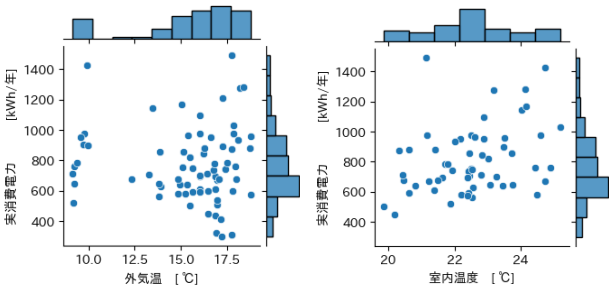


図 5 実消費電力量と外気温，室内温度との関係

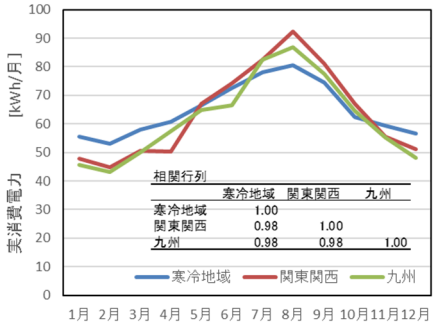


図 6　地域別月別実消費電力量とその相関行列

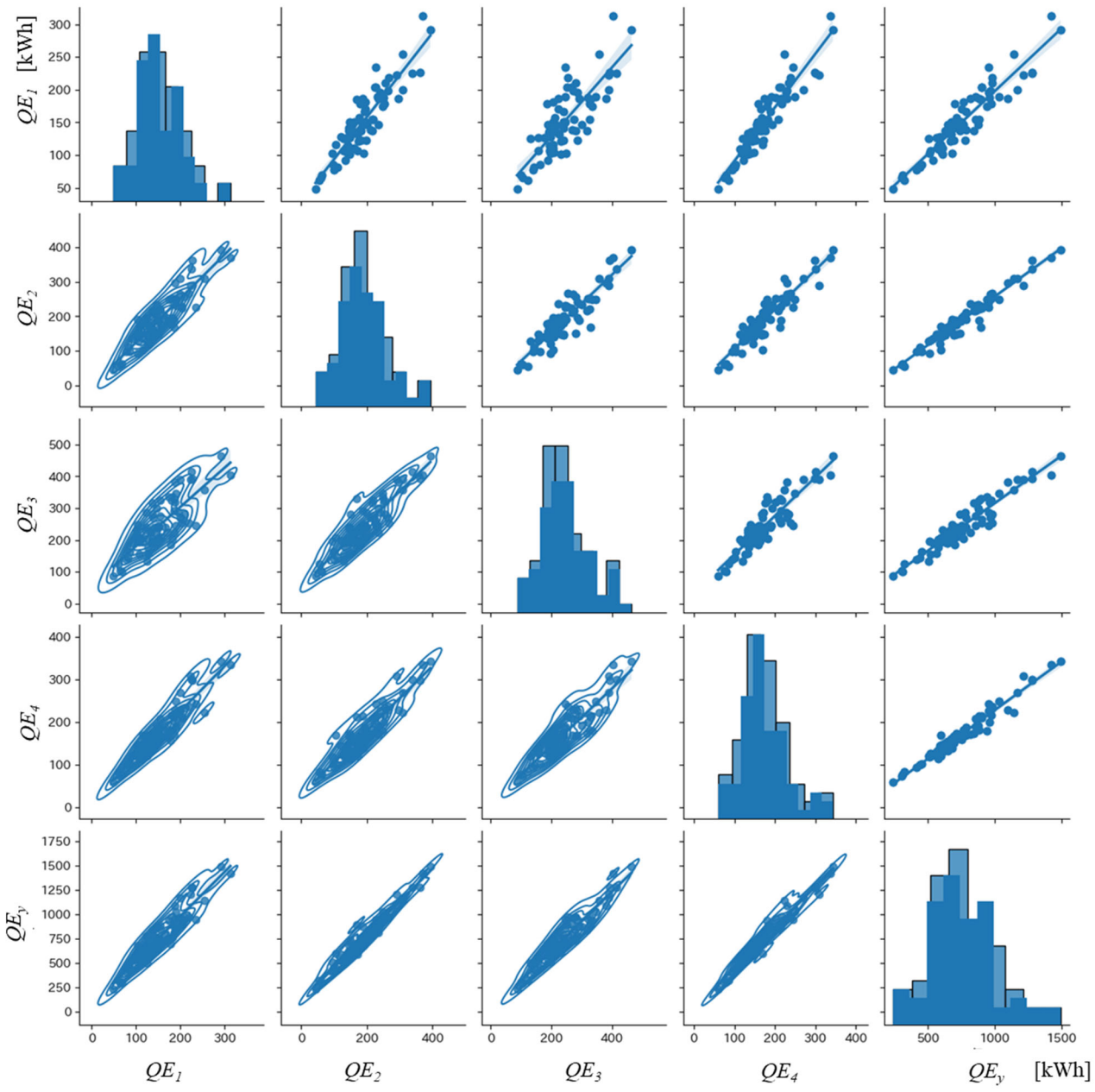


図 7　四半期実消費電力量 QE_x 間の相関性とカーネル密度

そこで QE_1 を基準に QE_x を指数化した冷蔵庫電力指数（IR_x ；Refrigerator power index）を定義する．

$$IR_x = 3 \cdot QE_x / QE_1$$

各四半期 Q_1 の IR_x は**表 4** のとおりである．これより目的とする設備の QE_1 が判明していれば冷蔵庫の年間消費電力量 QE_y は(1)式で計算できる．

$$QE_y = QE_1 \sum IR_x = QE_1 \cdot IR_y \qquad (R^2=0.88) \qquad (1)$$

(1)式のQE_y予測精度は R^2= 0.88 である．

これより IR_x を冷蔵庫の説明変数として，RSVD 法の説明変数ベクトル $\boldsymbol{X}$ に追加し冷蔵庫消費電力量推定に用いることとする．

表 4　冷蔵庫電力指数 I_x

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_y
冷蔵庫指数 IR_x	*3.00*	*3.74*	*4.96*	*3.48*	*15.17*

4.　冷蔵庫消費電力量推定の精度

4. 1　RSVD 法による冷蔵庫消費電力量推定法

RSVD 法で冷蔵庫消費電力量を推定するにあたり，本報では既報 [18] の RSVD 法に以下のような処理を追加する．

電力需要のベース負荷 B～N（$\bar{B}$，σ）と考え，σ の推定値への影響を最小化するため $\mathbf{Y}^{\circ} = \mathbf{Y} - B$ として（2）式の連立方程式を考える．

$$\mathbf{Y}^{\circ} = \mathbf{X}\mathbf{K}^{\mathrm{T}} \qquad (2)$$

(2) 式の解は(3)式を満たすK^rである．

$$K^r = \arg\min_{\mathbf{K}} \left\{ \|\mathbf{X}\mathbf{K}^T\|_2^2 + \alpha\|\mathbf{K}\|_2^2 \right\}, \quad \alpha \geq 0 \qquad (3)$$

ここでαは重回帰方程式解への罰則値である．α，B ともにハイパーパラメータで，個票毎のチューニング処理により最適解を求める．

4．2　冷蔵庫消費電力量推定精度

(1) RSVD 法の精度

実消費電力量，RSVD 値と JIS 値の３値を用いて RSVD 法の精度を確認する．検証対象設備は**表 2** の設備中で RSVD 法が適用可能（全計測月の電力使用量が判明）な 16 台である．16 台の３値の関係を**図 8** に示す．**図 8** 左は 3 値分布のボックスプロットで，その平均は実消費電力量が 692kWh/年，RSVD 値が 618kWh/年，JIS 値が 417kWh/年である．実消費電力量との誤差は RSVD 値が平均−11%, JIS 値が平均−40%と，RSVD 値が JIS 値より誤差が 1/4 で高精度である．**図 8** 右は３値の散布図である．破斜線が設備の実消費電力量線である．その鉛直方向の乖離量が設備毎誤差である．RSVD 値の誤差最大は−68%で，JIS 値−156%の 1/2 以下である．RSVD 値が誤差となる原因はパラメータチューニング時に見られる局所最小解の誤検知によると考えられ，この回避法の検討は今後の課題である．

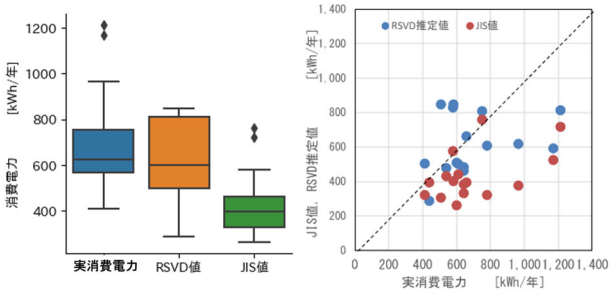


図 8　実消費電力量と RSVD 値と JIS 値

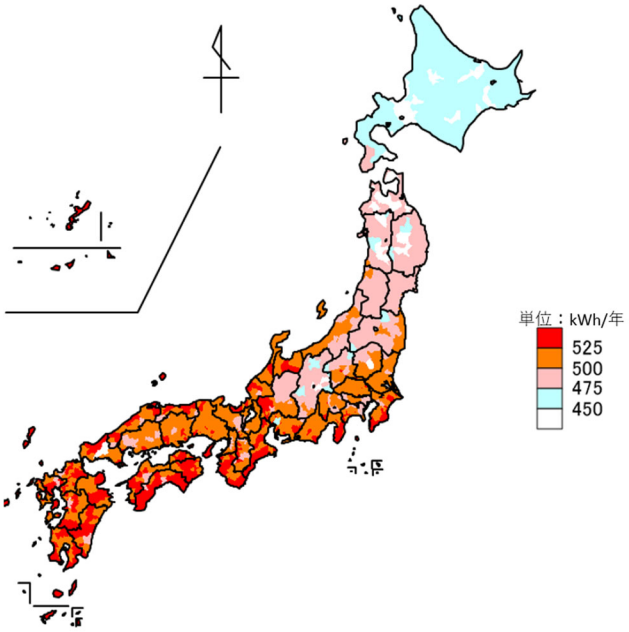


図 9　66 大地域区部別冷蔵庫消費電力量（RVSD 値）

5　家庭部門 CO2 排出実態統計調査への適用

RSVD 法により SSH の個票データ（試験調査から H31 年度までの 4 回分，調査期間：2014 年 10 月～2020 年 3 月）の冷蔵庫消費電力量（複数台所有の場合は合計値）を推定した結果を以下に示す．

5.1　地域性

図 9 は全国を 66 の大地域区分[18]による冷蔵庫の RVSD 法による推定値（RVSD 値）である．66 の内訳は 52 の都道府県庁所在都市及び政令指定都市と，その他地域 14（省エネ法気候区分と都市規模区分によりグループ化）である．冷蔵庫消費電力量は温暖な地域ほど大きく，その上位地域（525kWh/年以上）は省エネ法地域区分Ⅶ，Ⅷ地域に集中する．下位地域（475kWh/年以下）は主に省エネ法地域区分Ⅰ，Ⅱ地域で，一部Ⅲ～Ⅴ地域も含まれる．

66 地域中最大は 607kWh/年，最低地域は 396kWh/年でその差は 1.5 倍である．住宅の全エネルギー需要位（最終エネルギーベース）の地域差は 3 倍以上[18]であり，それに比べ冷蔵庫の地域差は，その 1/2 以下と小さい．

5.2　住宅・世帯属性

(1) 住宅属性

住宅属性別冷蔵庫消費電力量（RVSD 値）を**表 5** に示す．

表 5　住宅の電化タイプ別住宅種別冷蔵庫（SSH，RVSD 値）

単位：kWh/年，台/世帯

		戸建	集合	平均
全電化住宅	総電力需要	9,710	6,121	8,115
	冷蔵庫需要	672	525	607
	冷蔵庫率※	7%	9%	7%
	台数普及率	1.25	1.00	1.22
非全電化住宅	総電力需要	5,108	2,998	4,191
	冷蔵庫需要	523	417	477
	冷蔵庫率※	10%	14%	11%
	台数普及率	1.36	1.05	1.24
全住宅平均	総電力需要	7,312	4,525	6,096
	冷蔵庫需要	545	422	491
	冷蔵庫率※	7%	9%	8%
	台数普及率	1.35	1.04	1.24

※冷蔵庫率=冷蔵庫需要/総電力需要×100

全 SSH 個票の平均は 491 kWh/年であるが，戸建住宅の平均は 545 kWh/年で，集合住宅の 422 kWh/年より 29%大きい．この値は戸建住宅と集合住宅の台数普及率差 30%とほ

ぼ一致する．

住宅の総電力需要からみると冷蔵庫の電力割合（冷蔵庫率）は戸建住宅 7%，集合住宅 9%である．また全電化住宅の冷蔵庫需要平均は 607 kWh/年で，非全電化住宅の 477kWh/年より 27%大きい．冷蔵庫率は全電化住宅が 7%，非全電化住宅は 11%である．

(2) 世帯属性

表 6 に住宅種と世帯員数の関係を示す．戸建住宅，集合住宅ともに世帯員数と消費電力量は高い相関性を有する．全体平均では，戸建住宅が集合住宅より 29%大きいが，その差が最も大きいのは単身世帯で 40%である．差が最も小さいのは 2 人世帯で 10%である．

差異が最も大きい単身世帯について，年代別・住宅種別冷蔵庫消費電力量を**図 10** に示す．高齢になるほど，2 住宅の差は縮まるが，20 代以下ではその差が 84%と最大になる．

戸建住宅が大きいのは，冷凍食品の利用増大等により，冷蔵庫需要が高まり，戸建住宅においては設備の大型化や複数台所有の傾向があるためと予想される．

5.3 冷蔵庫実消費電力量統計モデル

全個票データの冷蔵庫消費電力量（RVSD 値） E_R[kWh/年]を重回帰分析した結果を(4)式に，各係数詳細を**表 7** に示す．

$$E_R(L) = k_1(L)A + k_2(L)D + k_3(L)F + b(L) \quad (4)$$

ここで　k_1～k_3（L）：地域区分別重回帰係数

L:省エネ法地域区分

A:全電化住宅率(0～1)　[－]

D:戸建住宅率(0～1)　[－]

F:世帯員数（5 人以上は 5）　[人]

b:ベース電力　[kWh/年]

この式より温暖な地域ほどベース電力 b と戸建住宅係数 k_2が大きくなることがわかる，全電化住宅係数k_1は温暖な地域ほど小さくなる．世帯員数係数k_3には地域差がほとんど見られない．

住宅全電化の有無．温暖化地域ほど両タイプの住宅差が減少する原因については，複合的要因が考えられるので，追加調査や分析を検討したい．

6. まとめ

冷蔵庫の消費電力量を，光熱費から推定するため全国 72 台の冷蔵庫の実消費電力を分析し，第 1 四半期（1～3 月）の消費量 QE_1 を指標に，冷蔵庫電力指数 IR_x を作成し年間消費電力量 QE_y を（1）式で推定した．式の推定精度は R^2=0.88 で．推定誤差は JIS 値の 1/4 と小さい．

そこで IR_x を RSVD 法の説明変数ベクトル **X** に追加し家庭 CO2 統計（SSH）の個票データ約 4 万件について冷蔵庫消費電力量（RSVD 値）をもとめ 66 大地域別分布図（**図 9**）を作成した．

さらにこの解析結果から冷蔵庫の年間消費電力量を推定する統計モデル（4）式を作成した．このモデルの説明変数は地域，全電化率，戸建住宅率，世帯員数である．

今後は RSVD 法の局所最小解の誤検知回避法の検討や，地域差出現要因の詳細検討，特に全電化住宅と非全電化住宅との差異が見られる原因についての分析や追加調査を予定している．

表 6　世帯員数と冷蔵庫消費電力量（RVSD 値）

単位:kWh/年（世帯）

世帯員数	戸 建　(n)		集 合　(n)	
1 人	307	(3,692)	220	(4,375)
2 人	536	(9,390)	489	(4,773)
3 人	585	(6,252)	509	(2,898)
4 人	611	(5,072)	529	(1,608)
5 人以上	570	(1,359)	663	(70)

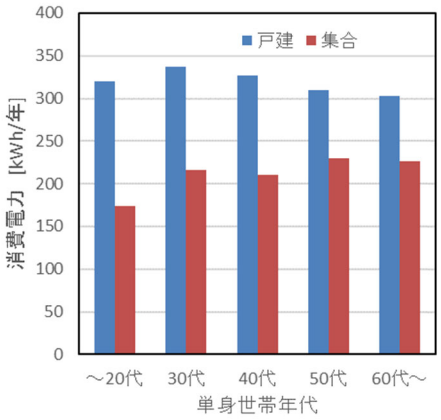


図 10　単身世帯年代別消費電力量(RVSD 値)

表 7　冷蔵庫消費電力重回帰モデルの重回帰係数

重回帰係数　[単位]	省エネ法地域区分 L		
	I ～IV	V～VII	VIII
k_1:全電化住宅係数　[－]	173	112	38
k_2:戸建住宅係数　[－]	64	82	97
k_3:世帯員数係数　[－]	69	68	66
b :ベース電力 [kWh/年]	222	260	317
R^2	0.35	0.35	0.31
n=	7,555	29,588	2,346

謝辞

本研究は，エネルギー・資源学会 "家庭部門の CO_2 排出実態統計調査利用研究会"に環境省様より提供いただいた「家庭 CO_2 統計データ」と（一社）日本建築学会“住宅用

エネルギー消費と温暖化対策検討委員会”様の公開データの解析による研究成果です．貴重なデータを提供いただいた環境省様,（一社）日本建築学会様に謝意を申し上げます．

参考文献

1) 環境省;令和３年度　家庭部門の CO2 排出実態統計査事業委託業務　（令和３年度調査分の実施等）報 告 書（2022.3），p80,（株）インテージ,（株）住環境計画研究所.
2) 経済産業省資源エネルギー庁;平成 30 年度電力需給対策広報調査事業(2020.3)，　p899,（一財）日本エネルギー経済研究所.
3) (一財)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(2021), p357，(財)省エネルギーセンター.
4) 経済産業省資源エネルギー庁；https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/denki_reizoko/pdf/001_s01_00.pdf（2023/11/01 アクセス）
5) EIA；https://www.eia.gov/consumption/residential/ webinar_slides/2020%20RECS%20C&E%20Webinar%20slides.pdf，(アクセス日 2023.11.01）
6) 砂原善文, 大瀬長門, 川村隆男;外気温変化による冷凍冷蔵庫の消費電力予測，日本機械学会論文集（C 編），53 巻 492 号,pp.1800-1805.
7) 坂本智幸，奥村清香，前田玲那，高瀬香絵，松橋隆治；実測データを用いた冷蔵庫のエネルギー効率の改善による実消費電力への影響に関する考察，エネルギー資源　37-5(2016)，pp.8-17.
8）河野佑輔，古賀ひろ子，佐藤春樹；住宅に置かれた冷蔵庫の消費電力推定法，日本建築学会環境系論文集, No.667(2011), pp.799-807.
9）日本建築学会；住宅内のエネルギー消費に関する研究委員会，http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/index.htm，(アクセス日 2023.11.1）
10）田中昭雄，酒井孝司，中上英俊，村越千春，石原修；住宅種別用途別エネルギー消費量推定に関する研究，日本建築学会環境系論文集, No.539(2001), pp. 67-74.
11) 田中昭雄；多様な設置環境下での冷蔵庫消費電力推定のための統計モデルの研究，エネルギー資源学会研究発表会講演論文集, 37(2018), pp80-83
12) 田中昭雄；住宅エネルギー消費の 6 用途分解と再生可能エネルギー利用量の推定, エネルギー・資源学会論文誌(2022),43-1,pp.25-32.
13) Robert Tibshirani; Regression Shrinkage and Selection via the Lasso, J.R. Statist. Soc. B (1996) 58-1, pp.267-288.
14) 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 2023.4.2）
15) Bernard. W. Silverman； Density Estimation for Statistics and Data Analysis (1986), p188, Springer.
16) 室 恵 子；住宅における暖冷房機器の使用および着衣量に関する実態調査，日本建築学会技術報告集(2018.2),24-56，pp.253-258.
17) Gagge, A.P, Stolwijk, J.A., Nishi Ysaunobu; An effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological regulatory Response, ASHRAE TRANSACTIONS (1972), 77, pp.247-262.
18)田中昭雄;ベイズ的アプローチによる市町村別住宅環境負荷推定，エネルギー・資源学会論文誌(2023),44-6,pp.265-273.

家庭部門における CO_2 排出量の季節変化と気温感応度の解析

Analysis of Seasonal Changes and Temperature Sensitivity of CO_2 Emissions in the Household Sector

平野勇二郎[*]・吉田友紀子[**]・吉田崇紘[***]・山形与志樹[****]

Yujiro Hirano　Yukiko Yoshida　Takahiro Yoshida　Yoshiki Yamagata

Abstract

This study analyzed CO_2 emissions due to energy consumption, using the statistical survey of CO_2 emissions in the household sector as basic data for considering measures to reduce CO_2 emissions in the household sector. In particular, this study clarified seasonal changes in CO_2 emissions by region and clarified the characteristics of temperature sensitivity by analyzing the relationship with regional temperature change patterns. The results of this study showed that CO_2 emissions per household are particularly high in winter in cold regions. On the other hand, no clear regional differences were observed in the temperature sensitivity of CO_2 emissions.

Key words : Residential CO_2 emission, Climatic condition, Temperature sensitivity, Seasonal variation pattern

1．はじめに

近年は地方自治体にも地域内の温室効果ガス削減の計画が求められる機会が増えており [1]，その基礎データとして地域条件に応じた温室効果ガス排出特性を把握することが重要となっている．とくに，民生部門のエネルギー消費は空調用エネルギーの割合が比較的高く，外気温の影響を受けやすいため，省エネルギーによる CO_2 排出削減策を適切に検討するためには地域の気候条件の影響を詳細に把握する必要がある．こうした問題意識から，著者らはすでに気温感応度の分析に基づき，気温変化が民生業務部門のエネルギー消費へ及ぼす影響について検討した [2]．一方，家庭部門においては，福島県新地町の戸建住宅における電力モニタリングデータを用いた解析を行ったものの，地域や対象が限定的であった [3]．また，デグリーデー法により全国の主要自治体を対象とした推計を行ったが [4]，既存の推定式 [5]に基づくため詳細な分析が困難であることや，推定式の元データの調査年がやや古いことなどの問題点があった．

こうした背景から，本研究は家庭部門の CO_2 排出実態統計調査を用いて地域の気温変化パターンと地域別 CO_2 排出量の分析し，その気温感応度の特性について検討した．なお，本研究は需要家側の特性に着目した分析であるため，電力会社の CO_2 排出原単位の差異が結果に影響することを避け，全サンプルの平均原単位を用いて電力消費による CO_2 排出を算出した．対象年度は，新型コロナウィルス感染拡大によるライフスタイル変化が結果に大きく影響することを避け，2017～2019 年度を選択した．

Corresponding author; Yujiro Hirano, E-mail: yhirano@nies.go.jp
[*] 国立環境研究所社会システム領域
〒305-8506　茨城県つくば市小野川 16-2
[**] 茨城大学大学院理工学研究科
[***] 東京大学空間情報科学研究センター
[****] 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科

2．地域別 CO_2 排出量の季節変化

まず，家庭 CO_2 統計の個票に記載された市区町村名の情報を用いて，月別 CO_2 排出量を省エネルギー基準地域区分集計した結果を図 1 に示す．この結果，冬季の暖房期，夏季の冷房期のそれぞれにピークが生じているものの，地域区分 8（沖縄）以外の全ての地域で夏季と比較し冬季の方が大きなピークとなっており，気候が寒冷な地域ほど冬季の CO_2 排出量が多い傾向が明確に生じた．寒冷地において CO_2 排出量が多い傾向は既往研究 [4] と一致する．

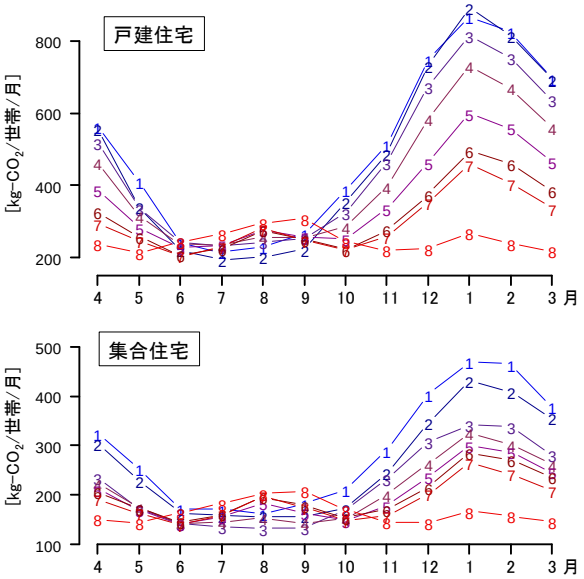


図 1 地域別 CO_2 排出量の季節変化パターン（図中の数値は地域区分を示す）

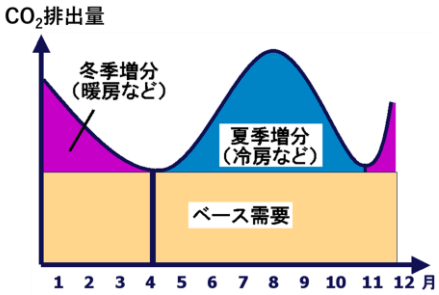


図 2　気温による変動成分の抽出方法

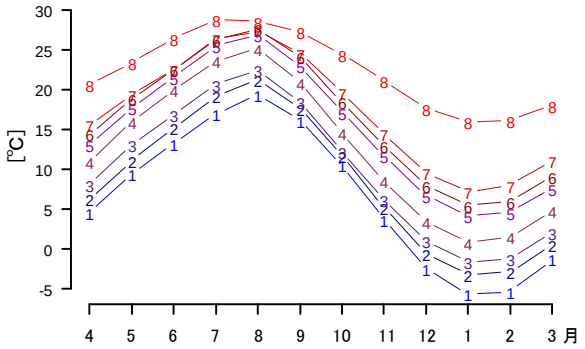


図 3　月平均気温（図中の数値は地域区分を示す）

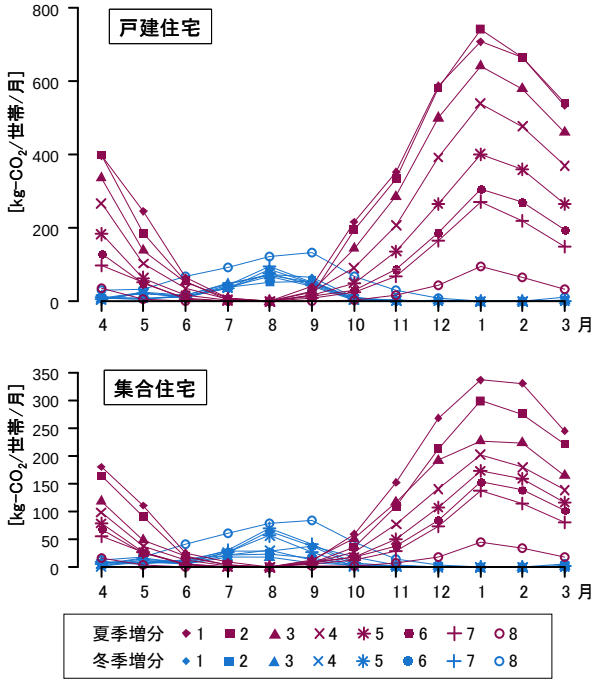


図 4　夏季増分，冬季増分への分解の結果（凡例の 1～8 は地域区分を示す）

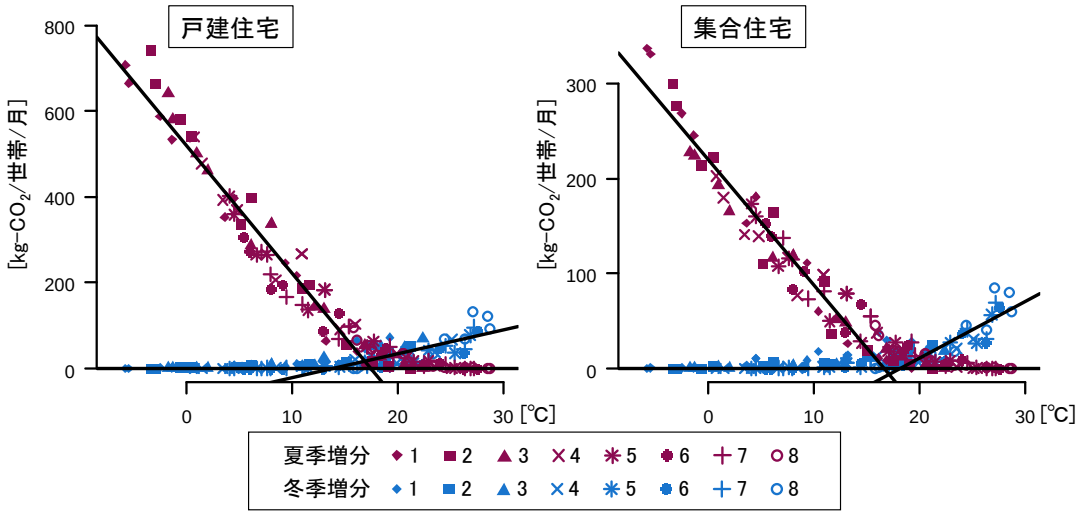


図 5　夏季増分，冬季増分と月別平均気温の関係（凡例の 1～8 は地域区分を示す）

次に前述の地域区分別 CO_2 排出量から季節変化成分を抽出するため，図 2 に示した模式図の通りに CO_2 排出の季節変化パターンに基づき夏季増分・冬季増分・ベース需要に分解した．本研究では，気温データは理科年表に掲載された主要観測点の平年値を気候区分別に集計した（図 3）．分解方法の詳細は文献 [2] を参照されたい．なお，季節変化成分のうち，夏季増分は冷房，冬季増分は暖房による CO_2 排出が主な要因であると考えられるが，給水温度に応じて季節変化する給湯による CO_2 排出を分解できていないため，ここでは冷房用・暖房用と表記することは避けた．この夏季増分・冬季増分への分解は個別サンプルごとに行ったが，サンプルによるばらつきが大きいため，分解後に図 1 と同様の地域区分別・月別に集計した（図 4）．この図から，夏季増分より冬季増分の方が大きく，結果として寒冷地ほど CO_2 排出が多い傾向がより明確化された．

3．CO_2 排出量の気温感応度解析

気温感応度の地域性について検討するため，図 3 に示した月別平均気温と，図 4 に示した夏季増分および冬季増分の関係を地域区分別にプロットした（図 5）．この図から，夏季増分，冬季増分はそれぞれ概ね一直線上に分布していることが分かる．もし地域により建物の断熱性や空調設備

に顕著な違いがある場合，図 5 において直線の位置や傾きの違いが生じることが予想されるが，そうした傾向はこの図からは読み取れない．したがって，気温感応度には明確な地域性があるとは言えず，より直接的な気温自体の地域による差異が CO_2 排出の地域性の主要因であると推察される．ただし，従前に著者らが行った気温感応度算定手法の相互比較の研究において，デグリーデー法により気温の地域分布から算定したエネルギー消費の気温感応度と，季節変化から算出したエネルギー消費の気温感応度を比較したところ，前者の方が傾きが小さい傾向にあった [6]．この差異は気候条件による建物の外皮や設備の違いを反映したものと推察していたが，今回の結果はこの既往研究の結果と一致しているとは言えないので，この点はより詳細な検討が必要である．

４．まとめ

本研究では地域の気温条件や気温感応度に着目し，家庭部門における CO_2 排出の特性について分析した．まず，地域区分別に月別 CO_2 排出量を算出したところ，地域区分 8（沖縄）以外の地域では家庭部門では気候が寒冷であるほど世帯あたり CO_2 排出量が多い傾向が明確に示された．次に地域区分別に CO_2 排出量の気温感応度を算出したところ明確な地域差は読み取れず，CO_2 排出量の地域性の要因として，気候条件に伴う断熱性や設備の差異の影響より，気温差による直接的な影響が大きいことを示唆する結果となった．

謝辞

本研究は，内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP) 第 3 期「スマートエネルギーマネジメントシステムの構築（JPJ012207）」（研究推進法人：JST），文部科学省 大学の力を結集した，地域の脱炭素化加速のための基盤研究開発 JPJ010039, および日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（B）23H01546 によって実施されました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 環境省　脱炭素地域づくりサイト；https://policies.env.go.jp/policy/roadmap/ (アクセス日 2023.11.30)
2) Y. Hirano, K. Gomi, S. Nakamura, Y. Yoshida, D. Narumi, T. Fujita; Analysis of the impact of regional temperature pattern on the energy consumption in the commercial sector in Japan. Energy and Buildings, 149(2017), pp.160-170.
3) 平野勇二郎，牧誠也，中村省吾，藤田壮; 福島県新地町における統合的エネルギーモニタリング解析と電力消費量推定手法の構築．地球環境, 27 (1) (2022) , pp.31-40.
4) Y. Hirano, T. Ihara, M. Hara, K. Honjo; Estimation of Direct and Indirect Household CO_2 Emissions in 49 Japanese Cities with Consideration of Regional Conditions, Sustainability, 12(11), (2020).
5) 澤地孝男，坊垣和明，吉野 博，鈴木憲三，赤林伸一，井上 隆，大野秀夫，松原斎樹，林 撤夫，森田 大; 用途別エネルギー消費原単位の算出と推定式の作成全国的調査に基づく住宅のエネルギー消費とライフスタイルに関する研究（第 1 報），日本建築学会計画系論文集, 462, (1994), pp.41-48.
6) 平野勇二郎，亀卦川幸浩，玄地　裕，近藤裕昭; 事務所および住宅における空調・給湯用エネルギー消費量の気温感応度算定に関する各種手法の相互比較，エネルギー・資源, 27(3)(2006), pp.218-224.