

博士論文

生活行動の違いを考慮した
家庭における省エネルギーの可能性評価

東京大学大学院 新領域創成科学研究科

環境システム学専攻

小澤 暁人

目次

第1章	序論	15
1.1	研究背景	15
1.2	先行研究とその課題	38
1.3	研究目的と論文の構成	49
第2章	省エネルギーアドバイスを目的とした家庭電力需要データ分析	51
2.1	概要	51
2.2	家庭電力需要カーブの生成	53
2.3	電力需要カーブのクラスタ分析	57
2.4	結果・考察	72
2.5	まとめ	97
第3章	データ分析に基づく省エネアドバイス実証実験	99
3.1	概要	99
3.2	省エネアドバイスレポート	101
3.3	省エネアドバイスレポートの送付による家庭電力需要削減効果の評価	114
3.4	結果・考察	129
3.5	まとめ	173
第4章	アンケート調査に基づく家庭エネルギー需要の推計	174
4.1	概要	174
4.2	アンケート調査の実施	176
4.3	家庭エネルギー需要推計モデル	186
4.4	結果	206
4.5	まとめ	224
第5章	需要の不確実性を考慮した最適運転モデルによる燃料電池の性能評価	225
5.1	概要	225
5.2	家庭用燃料電池システム	226
5.3	最適運転モデルの計算手法	231
5.4	運転シミュレーション結果	245
5.5	家庭用燃料電池システムの経済性・環境性評価	250
5.6	まとめ	261
第6章	結論	262
6.1	結論	262
6.2	今後の課題	266

参考文献.....	268
謝辞.....	275
A 付録.....	276
(ア) 高速離散フーリエ変換による1週間の家庭電力需要カーブの周波数解析.....	276
(イ) 省エネアドバイザーレポートに関するアンケート.....	281
(ウ) アンケート調査による時間帯別の在室・行動割合.....	283
(エ) エネルギー需要カーブの推計結果.....	299
(オ) 家庭用燃料電池システムの運転シミュレーション結果.....	309

図目次

図 1-1	気候変動によるリスク・気温変化・CO ₂ 排出量の関係[1]	17
図 1-2	ベースラインシナリオと緩和シナリオにおける部門別の温室効果ガス直接排出量[1]	18
図 1-3	2030 年度の電力需給構造[6]	20
図 1-4	電力システムの連系線と送電容量[3]	21
図 1-5	電力会社 10 社の電気料金平均単価の推移[7]	21
図 1-6	部門別最終エネルギー消費量と実質 GDP の推移[7]	22
図 1-7	家庭部門における最終エネルギー消費量の要因分析[7]	23
図 1-8	日本の人口・世帯数の推移 (『日本の統計 2015』 [8]に基づいて作成)	24
図 1-9	世帯あたりの用途別エネルギー消費量の推移[7]	25
図 1-10	世帯あたりの種類別エネルギー消費量の推移[7]	26
図 1-11	家庭用炊事・掃除・洗濯機器の平均保有台数 (100 世帯あたり) の推移	27
図 1-12	家庭用空調・給湯機器の平均保有台数 (100 世帯あたり) の推移	28
図 1-13	家庭用映像・撮影・情報機器の平均保有台数 (100 世帯あたり) の推移	28
図 1-14	トップランナー対象家電製品の効率改善の推移	29
図 1-15	トップランナー対象ガス・石油製品の効率改善の推移	30
図 1-16	家庭部門におけるエネルギー消費と生活行動の関係性	31
図 1-17	発電方式別の発電コストの比較[16]	36
図 1-18	家庭用燃料電池システムのメーカー販売台数 (単年) の推移[18]	37
図 1-19	日本家庭におけるライフステージの進行による生活リズムの変化[35]	42
図 1-20	省エネアドバイスレポートにおけるストーリーの一例 (上側：夏, 下側：冬) [41][42]	44
図 1-21	省エネアドバイスレポートの一例[46]	45
図 1-22	家庭用燃料電池システムによる電力需給のシミュレーション結果[54]	47
図 1-23	本研究の構成	50
図 2-1	電力需要カーブの分析手順	52
図 2-2	居住地の構成	54
図 2-3	電力需要カーブの距離	58
図 2-4	k -平均法による 2 次元データのパターン分類 ($k = 3$) [58]	60
図 2-5	ファジィ c -平均法による 2 次元データのパターン分類 ($k = 3, f = 1.1$) [59]	62
図 2-6	ファジィ c -平均法による 2 次元データのパターン分類 ($k = 3, f = 1.5$) [59]	62
図 2-7	ファジィ c -平均法による 2 次元データのパターン分類 ($k = 3, f = 2.0$) [59]	63
図 2-8	階層型クラスタリング手法における入出力の例	64
図 2-9	階層型クラスタリング手法の手順例	65
図 2-10	樹形図のカット例	66
図 2-11	標準電力需要パターンの抽出方法	68
図 2-12	1 日電力需要量の平均	73
図 2-13	電力需要カーブの平均	73

図 2-14 DBI の平均・標準偏差.....	75
図 2-15 標準電力需要パターンの日数割合	76
図 2-16 標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの 1 日電力需要量の比較 (ケース 1)	77
図 2-17 標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの 1 日電力需要量の比較 (ケース 2)	78
図 2-18 全分析対象日と標準電力需要パターン・それ以外のパターンに含まれる日の休日割合	79
図 2-19 「普段の生活が省エネグループ」と「普段の生活が多消費グループ」の割合.....	81
図 2-20 1 日電力需要量の比較	82
図 2-21 標準電力需要パターンの日数割合 (普段の生活が省エネグループ)	83
図 2-22 標準電力需要パターンの日数割合 (普段の生活が多消費グループ)	83
図 2-23 標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの 1 日電力需要量の比較 (普段の生活が省エネグループ)	84
図 2-24 標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの 1 日電力需要量の比較 (普段の生活が多消費グループ)	85
図 2-25 全分析対象日と標準電力需要パターン・それ以外のパターンに含まれる日の休日割合 (普段の生活が省エネグループ)	86
図 2-26 全分析対象日と標準電力需要パターン・それ以外のパターンに含まれる日の休日割合 (普段の生活が多消費グループ)	87
図 2-27 標準以外のパターンの需要量比率と日数の分布 (2 月)	89
図 2-28 標準以外のパターンの需要量比率と日数の分布 (5 月)	90
図 2-29 標準以外のパターンの需要量比率と日数の分布 (8 月)	90
図 2-30 DBI の推移.....	91
図 2-31 標準以外の電力需要パターンのクラスタ分析によるパターン構成 (2 月)	94
図 2-32 標準以外の代表的な電力需要パターンの日数・休日数 (2 月)	94
図 2-33 標準以外の代表的な電力需要パターンと標準電力需要パターンでの電力需要カーブ (2 月)	94
図 2-34 標準以外の電力需要パターンのクラスタ分析によるパターン構成 (5 月)	95
図 2-35 標準以外の代表的な電力需要パターンの日数・休日数 (5 月)	95
図 2-36 標準以外の代表的な電力需要パターンと標準電力需要パターンでの電力需要カーブ (5 月)	95
図 2-37 標準以外の電力需要パターンのクラスタ分析によるパターン構成 (8 月)	96
図 2-38 標準以外の代表的な電力需要パターンの日数・休日数 (8 月)	96
図 2-39 標準以外の代表的な電力需要パターンと標準電力需要パターンでの電力需要カーブ (8 月)	96
図 3-1 実証実験の流れ	100
図 3-2 実証実験参加家庭のグループ分類フローチャート	103
図 3-3 省エネアドバイスレポートの例 (A 夜型生活タイプ)	104
図 3-4 省エネアドバイスレポートの例 (B 普段の生活が省エネタイプ)	105
図 3-5 省エネアドバイスレポートの例 (C その他タイプ)	105
図 3-6 他世帯との比較の例	106
図 3-7 1 日の電力の使いかたの例 (B 普段の生活が省エネタイプ)	109
図 3-8 1 日の電力の使いかたの例 (A 夜型生活タイプ)	110

図 3-9	1日の電力の使いかたの例 (C その他タイプ)	110
図 3-10	あなたへの省エネアドバイス例 (B 普段の生活が省エネタイプ)	111
図 3-11	あなたへの省エネアドバイス例 (A 夜型生活タイプ)	111
図 3-12	あなたへの省エネアドバイス例 (C その他タイプ)	112
図 3-13	パネルデータのデータ形式	115
図 3-14	性別の構成	129
図 3-15	年代の構成	130
図 3-16	世帯類型の構成	131
図 3-17	家族人数の構成	132
図 3-18	受電タイプの構成	133
図 3-19	給湯器の種類構成	134
図 3-20	省エネに対する意識の構成	135
図 3-21	省エネアドバイスレポートを読んだ日付について	136
図 3-22	省エネアドバイスレポートの有用性について	138
図 3-23	「他世帯との比較」の認識について	140
図 3-24	「1日の電力の使いかた」の認識について	140
図 3-25	「あなたへの省エネアドバイス」の実施について	142
図 3-26	省エネアドバイスレポートの定期無料送付サービスについて	145
図 3-27	省エネアドバイスレポートの送付方法について	146
図 3-28	レポート送付・未送付家庭での1日電力需要量の比較	147
図 4-1	第4章の構成	175
図 4-2	質問の流れ	179
図 4-3	居場所に関する質問フォーム	180
図 4-4	行動に関する質問フォーム	180
図 4-5	家電製品・給湯の使用状況に関する質問フォーム (例: ドライヤー)	180
図 4-6	居住地の構成	183
図 4-7	世帯類型の構成	183
図 4-8	家族人数の構成	184
図 4-9	世帯所得の構成	185
図 4-10	住居種類の構成	185
図 4-11	モデルによる家庭エネルギー需要の推計手順	186
図 4-12	家庭部門における世帯あたりの機器別電気使用量 (2009年) [75]	191
図 4-13	空調熱負荷計算の手順	194
図 4-14	部屋と隣室・屋外・外壁との熱のやり取り	196
図 4-15	住宅用標準問題	198
図 4-16	住宅建材の種類	199
図 4-17	外気温の変化による COP 補正係数	203
図 4-18	属性のバリエーション	205

図 4-19 属性別の平均在室時間	207
図 4-20 属性別の平均行動時間	207
図 4-21 アンケート調査と国民生活時間調査における平均行動時間の比較.....	208
図 4-22 属性別の平均家電製品使用時間.....	209
図 4-23 属性別の平均給湯使用時間	210
図 4-24 部屋別の空調機器使用率（冬）	211
図 4-25 部屋別の空調機器使用率（夏）	211
図 4-26 推計した電力・給湯需要カーブの例.....	212
図 4-27 平均気温・最低気温・最高気温の比較.....	213
図 4-28 1日の外気温の変化	213
図 4-29 1日の水平面前日射量の変化	213
図 4-30 冬における電力・給湯需要の平均と変動係数（推計結果）（サンプル数：平日 N=10, 休日 N=4）	215
図 4-31 夏における電力・給湯需要の平均と変動係数（推計結果）（サンプル数：平日 N=10, 休日 N=4）	217
図 4-32 1日の電力・給湯需要量（推計結果）	219
図 4-33 家族人数別の用途別二次エネルギー消費量.....	222
図 4-34 冬の平日における給湯需要の平均・変動係数（サンプル数：N=10）	223
図 5-1 家庭用燃料電池システムの構成.....	227
図 5-2 電源代替による追加的な CO ₂ 削減	229
図 5-3 電力・給湯需要発生確率（子小中学2・冬・平日）	233
図 5-4 運転計画の決定と運転シミュレーションのフローチャート.....	241
図 5-5 20年国債の平均利回りの推移[97].....	244
図 5-6 PEFCの運転シミュレーション結果（若年夫婦・冬・3日～5日）	245
図 5-7 PEFCの運転シミュレーション結果（若年夫婦・夏・3日～5日）	246
図 5-8 SOFCの運転シミュレーション結果（若年夫婦・冬・3日～5日）	248
図 5-9 SOFCの運転シミュレーション結果（若年夫婦・夏・3日～5日）	249
図 5-10 年間エネルギーコストの比較.....	250
図 5-11 従来型給湯器に対する年間エネルギーコスト節約額の比較.....	251
図 5-12 年間 CO ₂ 排出量の比較	252
図 5-13 従来型給湯器に対する年間 CO ₂ 排出削減量の比較.....	253
図 5-14 5つのケース.....	255
図 5-15 ライフステージの進行（ケース 2-1）	255
図 5-16 ライフステージの進行（ケース 2-2）	256
図 5-17 ライフステージの進行（ケース 2-3）	256
図 5-18 各ケースにおけるエネルギーコスト節約の割引現在価値の比較	257
図 5-19 家庭用燃料電池システムの使用年数によるエネルギーコスト節約の割引現在価値の変化（PEFC）	258

図 5-20 家庭用燃料電池システムの使用年数によるエネルギーコスト節約の割引現在価値の変化 (SOFC)	259
図 5-21 各ケースにおける総 CO ₂ 排出削減量の比較	260
図 6-1 モデル・分析手法の統合による発展性の例	267
図 A-1 周波数解析の例	277
図 A-2 代表周期別の世帯数 (2013 年 10 月第 1 週~2014 年 9 月第 4 週)	277
図 A-3 代表周期別の電力需要カーブ	278
図 A-4 省エネアドバイザーレポートに関するアンケート紙面 (表面)	281
図 A-5 省エネアドバイザーレポートに関するアンケート紙面 (裏面)	282
図 A-6 時間帯別の在室割合 (主婦・冬・平日)	283
図 A-7 時間帯別の在室割合 (主婦・冬・休日)	283
図 A-8 時間帯別の在室割合 (主婦・夏・平日)	284
図 A-9 時間帯別の在室割合 (主婦・夏・休日)	284
図 A-10 時間帯別の在室割合 (男性・冬・平日)	285
図 A-11 時間帯別の在室割合 (男性・冬・休日)	285
図 A-12 時間帯別の在室割合 (男性・夏・平日)	286
図 A-13 時間帯別の在室割合 (男性・夏・休日)	286
図 A-14 時間帯別の行動割合 (主婦・冬・平日)	287
図 A-15 時間帯別の行動割合 (主婦・冬・休日)	287
図 A-16 時間帯別の行動割合 (主婦・夏・平日)	288
図 A-17 時間帯別の行動割合 (主婦・夏・休日)	288
図 A-18 時間帯別の行動割合 (男性・冬・平日)	289
図 A-19 時間帯別の行動割合 (男性・冬・休日)	289
図 A-20 時間帯別の行動割合 (男性・夏・平日)	290
図 A-21 時間帯別の行動割合 (男性・夏・休日)	290
図 A-22 時間帯別の家電製品使用割合 (主婦・冬・平日)	291
図 A-23 時間帯別の家電製品使用割合 (主婦・冬・休日)	291
図 A-24 時間帯別の家電製品使用割合 (主婦・夏・平日)	292
図 A-25 時間帯別の家電製品使用割合 (主婦・夏・休日)	292
図 A-26 時間帯別の家電製品使用割合 (男性・冬・平日)	293
図 A-27 時間帯別の家電製品使用割合 (男性・冬・休日)	293
図 A-28 時間帯別の家電製品使用割合 (男性・夏・平日)	294
図 A-29 時間帯別の家電製品使用割合 (男性・夏・休日)	294
図 A-30 時間帯別の給湯使用割合 (主婦・冬・平日)	295
図 A-31 時間帯別の給湯使用割合 (主婦・冬・休日)	295
図 A-32 時間帯別の給湯使用割合 (主婦・夏・平日)	296
図 A-33 時間帯別の給湯使用割合 (主婦・夏・休日)	296
図 A-34 時間帯別の給湯使用割合 (男性・冬・平日)	297

図 A-35	時間帯別の給湯使用割合（男性・冬・休日）	297
図 A-36	時間帯別の給湯使用割合（男性・夏・平日）	298
図 A-37	時間帯別の給湯使用割合（男性・夏・休日）	298
図 A-38	電力・給湯需要の平均と変動係数（若年夫婦・冬）	299
図 A-39	電力・給湯需要の平均と変動係数（若年夫婦・夏）	299
図 A-40	電力・給湯需要の平均と変動係数（若年夫婦・中間期(冬寄り)）	299
図 A-41	電力・給湯需要の平均と変動係数（若年夫婦・中間期(夏寄り)）	299
図 A-42	電力・給湯需要の平均と変動係数（老年夫婦・冬）	300
図 A-43	電力・給湯需要の平均と変動係数（老年夫婦・夏）	300
図 A-44	電力・給湯需要の平均と変動係数（老年夫婦・中間期(冬寄り)）	300
図 A-45	電力・給湯需要の平均と変動係数（老年夫婦・中間期(夏寄り)）	300
図 A-46	電力・給湯需要の平均と変動係数（子未就学1・冬）	301
図 A-47	電力・給湯需要の平均と変動係数（子未就学1・夏）	301
図 A-48	電力・給湯需要の平均と変動係数（子未就学1・中間期(冬寄り)）	301
図 A-49	電力・給湯需要の平均と変動係数（子未就学1・中間期(夏寄り)）	301
図 A-50	電力・給湯需要の平均と変動係数（子小中学1・冬）	302
図 A-51	電力・給湯需要の平均と変動係数（子小中学1・夏）	302
図 A-52	電力・給湯需要の平均と変動係数（子小中学1・中間期(冬寄り)）	302
図 A-53	電力・給湯需要の平均と変動係数（子小中学1・中間期(夏寄り)）	302
図 A-54	電力・給湯需要の平均と変動係数（子高大学1・冬）	303
図 A-55	電力・給湯需要の平均と変動係数（子高大学1・夏）	303
図 A-56	電力・給湯需要の平均と変動係数（子高大学1・中間期(冬寄り)）	303
図 A-57	電力・給湯需要の平均と変動係数（子高大学1・中間期(夏寄り)）	303
図 A-58	電力・給湯需要の平均と変動係数（子社会人1・冬）	304
図 A-59	電力・給湯需要の平均と変動係数（子社会人1・夏）	304
図 A-60	電力・給湯需要の平均と変動係数（子社会人1・中間期(冬寄り)）	304
図 A-61	電力・給湯需要の平均と変動係数（子社会人1・中間期(夏寄り)）	304
図 A-62	電力・給湯需要の平均と変動係数（子未就学2・冬）	305
図 A-63	電力・給湯需要の平均と変動係数（子未就学2・夏）	305
図 A-64	電力・給湯需要の平均と変動係数（子未就学2・中間期(冬寄り)）	305
図 A-65	電力・給湯需要の平均と変動係数（子未就学2・中間期(夏寄り)）	305
図 A-66	電力・給湯需要の平均と変動係数（子小中学2・冬）	306
図 A-67	電力・給湯需要の平均と変動係数（子小中学2・夏）	306
図 A-68	電力・給湯需要の平均と変動係数（子小中学2・中間期(冬寄り)）	306
図 A-69	電力・給湯需要の平均と変動係数（子小中学2・中間期(夏寄り)）	306
図 A-70	電力・給湯需要の平均と変動係数（子高大学2・冬）	307
図 A-71	電力・給湯需要の平均と変動係数（子高大学2・夏）	307
図 A-72	電力・給湯需要の平均と変動係数（子高大学2・中間期(冬寄り)）	307

図 A-73	電力・給湯需要の平均と変動係数（子高大学2・中間期(夏寄り)）	307
図 A-74	電力・給湯需要の平均と変動係数（子社会人2・冬）	308
図 A-75	電力・給湯需要の平均と変動係数（子社会人2・夏）	308
図 A-76	電力・給湯需要の平均と変動係数（子社会人2・中間期(冬寄り)）	308
図 A-77	電力・給湯需要の平均と変動係数（子社会人2・中間期(夏寄り)）	308
図 A-78	PEFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・冬）	309
図 A-79	SOFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・冬）	309
図 A-80	PEFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・夏）	310
図 A-81	SOFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・夏）	310
図 A-82	PEFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・中間期(冬寄り)）	311
図 A-83	SOFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・中間期(冬寄り)）	311
図 A-84	PEFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・中間期(夏寄り)）	312
図 A-85	SOFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・中間期(夏寄り)）	312
図 A-86	PEFC の運転シミュレーション結果（老年夫婦・冬）	313
図 A-87	SOFC の運転シミュレーション結果（老年夫婦・冬）	313
図 A-88	PEFC の運転シミュレーション結果（老年夫婦・夏）	314
図 A-89	SOFC の運転シミュレーション結果（老年夫婦・夏）	314
図 A-90	PEFC の運転シミュレーション結果（老年夫婦・中間期(冬寄り)）	315
図 A-91	SOFC の運転シミュレーション結果（老年夫婦・中間期(冬寄り)）	315
図 A-92	PEFC の運転シミュレーション結果（老年夫婦・中間期(夏寄り)）	316
図 A-93	SOFC の運転シミュレーション結果（老年夫婦・中間期(夏寄り)）	316
図 A-94	PEFC の運転シミュレーション結果（子未就学1・冬）	317
図 A-95	SOFC の運転シミュレーション結果（子未就学1・冬）	317
図 A-96	PEFC の運転シミュレーション結果（子未就学1・夏）	318
図 A-97	SOFC の運転シミュレーション結果（子未就学1・夏）	318
図 A-98	PEFC の運転シミュレーション結果（子未就学1・中間期(冬寄り)）	319
図 A-99	SOFC の運転シミュレーション結果（子未就学1・中間期(冬寄り)）	319
図 A-100	PEFC の運転シミュレーション結果（子未就学1・中間期(夏寄り)）	320
図 A-101	SOFC の運転シミュレーション結果（子未就学1・中間期(夏寄り)）	320
図 A-102	PEFC の運転シミュレーション結果（子小中学1・冬）	321
図 A-103	SOFC の運転シミュレーション結果（子小中学1・冬）	321
図 A-104	PEFC の運転シミュレーション結果（子小中学1・夏）	322
図 A-105	SOFC の運転シミュレーション結果（子小中学1・夏）	322
図 A-106	PEFC の運転シミュレーション結果（子小中学1・中間期(冬寄り)）	323
図 A-107	SOFC の運転シミュレーション結果（子小中学1・中間期(冬寄り)）	323
図 A-108	PEFC の運転シミュレーション結果（子小中学1・中間期(夏寄り)）	324
図 A-109	SOFC の運転シミュレーション結果（子小中学1・中間期(夏寄り)）	324
図 A-110	PEFC の運転シミュレーション結果（子高大学1・冬）	325

図 A-111	SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 1・冬)	325
図 A-112	PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 1・夏)	326
図 A-113	SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 1・夏)	326
図 A-114	PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 1・中間期(冬寄り))	327
図 A-115	SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 1・中間期(冬寄り))	327
図 A-116	PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 1・中間期(夏寄り))	328
図 A-117	SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 1・中間期(夏寄り))	328
図 A-118	PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 1・冬)	329
図 A-119	SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 1・冬)	329
図 A-120	PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 1・夏)	330
図 A-121	SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 1・夏)	330
図 A-122	PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 1・中間期(冬寄り))	331
図 A-123	SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 1・中間期(冬寄り))	331
図 A-124	PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 1・中間期(夏寄り))	332
図 A-125	SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 1・中間期(夏寄り))	332
図 A-126	PEFC の運転シミュレーション結果 (子未就学 2・冬)	333
図 A-127	SOFC の運転シミュレーション結果 (子未就学 2・冬)	333
図 A-128	PEFC の運転シミュレーション結果 (子未就学 2・夏)	334
図 A-129	SOFC の運転シミュレーション結果 (子未就学 2・夏)	334
図 A-130	PEFC の運転シミュレーション結果 (子未就学 2・中間期(冬寄り))	335
図 A-131	SOFC の運転シミュレーション結果 (子未就学 2・中間期(冬寄り))	335
図 A-132	PEFC の運転シミュレーション結果 (子未就学 2・中間期(夏寄り))	336
図 A-133	SOFC の運転シミュレーション結果 (子未就学 2・中間期(夏寄り))	336
図 A-134	PEFC の運転シミュレーション結果 (子小中学 2・冬)	337
図 A-135	SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学 2・冬)	337
図 A-136	PEFC の運転シミュレーション結果 (子小中学 2・夏)	338
図 A-137	SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学 2・夏)	338
図 A-138	PEFC の運転シミュレーション結果 (子小中学 2・中間期(冬寄り))	339
図 A-139	SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学 2・中間期(冬寄り))	339
図 A-140	PEFC の運転シミュレーション結果 (子小中学 2・中間期(夏寄り))	340
図 A-141	SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学 2・中間期(夏寄り))	340
図 A-142	PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 2・冬)	341
図 A-143	SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 2・冬)	341
図 A-144	PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 2・夏)	342
図 A-145	SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 2・夏)	342
図 A-146	PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 2・中間期(冬寄り))	343
図 A-147	SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 2・中間期(冬寄り))	343
図 A-148	PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 2・中間期(夏寄り))	344

図 A-149 SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学 2・中間期(夏寄り))	344
図 A-150 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 2・冬)	345
図 A-151 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 2・冬)	345
図 A-152 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 2・夏)	346
図 A-153 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 2・夏)	346
図 A-154 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 2・中間期(冬寄り))	347
図 A-155 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 2・中間期(冬寄り))	347
図 A-156 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 2・中間期(夏寄り))	348
図 A-157 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人 2・中間期(夏寄り))	348

表目次

表 1-1	低圧部門におけるスマートメーターの導入開始時期と各年度導入計画台数（単位：万台） [12]	33
表 1-2	デマンドサイドマネジメントにおける電力需要制御策の種類	33
表 1-3	分散型エネルギー技術の種類	35
表 1-4	日本の生活時間調査	42
表 2-1	取得した家庭電力需要データ	53
表 2-2	月ごとの日数・データ欠損日数・分析対象日数・分析対象世帯数	56
表 2-3	祝日の一覧	71
表 2-4	日最高／最低気温と空調設定温度の温度差	74
表 2-5	「普段の生活が省エネグループ」・「普段の生活が多消費グループ」の電力需要の特徴	88
表 3-1	電力需要量の大小関係とアドバイスレポートの記述の対応関係	107
表 3-2	一括評価・種類別評価でのパネルデータの家庭数とその内訳	121
表 3-3	祝日の一覧	123
表 3-4	「1日の電力の使いかた」の認識と「あなたへの省エネアドバイス」の実施のクロス集計（A 夜型生活タイプ）	143
表 3-5	「1日の電力の使いかた」の認識と「あなたへの省エネアドバイス」の実施のクロス集計（B 普段の生活が省エネタイプ）	144
表 3-6	「1日の電力の使いかた」の認識と「あなたへの省エネアドバイス」の実施のクロス集計（C その他タイプ）	144
表 3-7	説明変数の相関係数（一括評価）	148
表 3-8	回帰分析結果（ $Xiteff$ なしモデル，一括評価）	149
表 3-9	回帰分析結果（ $Xiteff$ ありモデル，一括評価）	151
表 3-10	説明変数の相関係数（種類別評価 A）	152
表 3-11	回帰分析結果（固定効果・ $Xiteff$ なしモデル，種類別評価 A）	153
表 3-12	回帰分析結果（固定効果・ $Xiteff$ ありモデル，種類別評価 A）	153
表 3-13	説明変数の相関係数（種類別評価 B）	154
表 3-14	回帰分析結果（固定効果・ $Xiteff$ なしモデル，種類別評価 B）	155
表 3-15	回帰分析結果（固定効果・ $Xiteff$ ありモデル，種類別評価 B）	155
表 3-16	説明変数の相関係数（種類別評価 C）	156
表 3-17	回帰分析結果（固定効果・ $Xiteff$ なしモデル，種類別評価 C）	157
表 3-18	回帰分析結果（固定効果・ $Xiteff$ ありモデル，種類別評価 C）	157
表 3-19	種類別評価における β_{read} の推定量（ $Xiteff$ ありモデル）	158
表 3-20	種類別評価における β_{eff} の推定量（ $Xiteff$ ありモデル）	158
表 3-21	回帰分析結果（家庭別評価）	159
表 3-22	β_{readj} の推定量	160
表 3-23	説明変数の相関係数（レポートの感想に基づく回帰分析）	162
表 3-24	回帰分析結果（レポートの感想に基づく回帰分析）	162

表 3-25	回帰分析結果（レポートの感想に基づく回帰分析 <i>Xjuse</i> モデル）	162
表 3-26	説明変数の相関係数（省エネ意識に基づく回帰分析）	163
表 3-27	回帰分析結果（省エネ意識に基づく回帰分析）	163
表 3-28	説明変数の相関係数（電力需要の特徴量に基づく回帰分析）	165
表 3-29	回帰分析結果（電力需要の特徴量に基づく回帰分析）	165
表 3-30	回帰分析結果（電力需要の特徴量に基づく回帰分析 <i>Dtypicalj</i> ・ <i>Dmostj</i> なしモデル）	165
表 3-31	回帰分析結果（電力需要の特徴量に基づく回帰分析 <i>Edaytypicalj</i> ・ <i>Edaymostj</i> ・ <i>Rj</i> モデル）	166
表 3-32	説明変数の相関係数（期間分割した種類別評価 A）	167
表 3-33	回帰分析結果（固定効果・ <i>Xiteff_within2w</i> ・ <i>Xiteff_after2w</i> ありモデル，期間分割した種類別評価 A）	168
表 3-34	説明変数の相関係数（期間分割した種類別評価 B）	169
表 3-35	回帰分析結果（固定効果・ <i>Xiteff_within2w</i> ・ <i>Xiteff_after2w</i> ありモデル，期間分割した種類別評価 B）	169
表 3-36	説明変数の相関係数（期間分割した種類別評価 C）	170
表 3-37	回帰分析結果（固定効果・ <i>Xiteff_within2w</i> ・ <i>Xiteff_after2w</i> ありモデル，期間分割した種類別評価 C）	170
表 3-38	期間分割した種類別評価における $\beta_{read_within2w}$ ・ $\beta_{read_after2w}$ の推定量（ <i>Xiteff_within2w</i> ・ <i>Xiteff_after2w</i> ありモデル）	171
表 3-39	期間分割した種類別評価における $\beta_{eff_within2w}$ ・ $\beta_{eff_after2w}$ の推定量（ <i>Xiteff_within2w</i> ・ <i>Xiteff_after2w</i> ありモデル）	172
表 4-1	アンケート調査の対象時期・回収数・有効回答数	176
表 4-2	行動類型と対応する家電製品・給湯の種類	179
表 4-3	家電の消費電力・使用時間・消費エネルギー単位	190
表 4-4	給湯の消費湯量・使用時間・消費エネルギー単位	192
表 4-5	照明の消費電力	193
表 4-6	材料の物性値	200
表 4-7	窓の性能	200
表 4-8	標準エアコンの定格 COP（設定値）	202
表 4-9	家族構成のバリエーション	205
表 4-10	断熱性能別の住宅ストック比率と空調負荷比率	221
表 5-1	燃料電池の種類とその原理・特徴	226
表 5-2	周辺装置の機能	227
表 5-3	ガス料金単価・発熱量，および CO ₂ 排出原単位（設定値）	228
表 5-4	燃料電池の性能（設定値）	229
表 5-5	系統電力・補助ヒータの利用単価・CO ₂ 排出原単位，および貯湯槽の放熱率（設定値）	230
表 5-6	電力・給湯需要の相関係数（子小中学 2・平日）	232
表 5-7	販売価格・補助金（設定値）と実質導入費用	244
表 A-1	代表周期別の 1 日電力需要量（2013 年 10 月第 1 週～2014 年 3 月第 5 週）	279

表 A-2 代表周期別の 1 日電力需要量 (2013 年 4 月第 1 週～2014 年 9 月第 4 週) 280

第1章 序論

1.1 研究背景

地球温暖化問題や東日本大震災を背景として、日本ではエネルギーをめぐる課題が顕在化し、特に省エネルギー化は日本のエネルギーシステムが抱える重要な課題となっている。部門別エネルギー消費の推移に目を向けると、日本では家庭部門におけるエネルギー消費量はここ40年間で倍増しており、その要因として核家族化・単身化による世帯数の増加や家庭生活の利便性・快適性追求による世帯あたりの機器保有台数の増加が挙げられる。このように、家庭での生活行動とエネルギー消費が密接に関係している点が、家庭部門の特徴といえる。

家庭部門の省エネルギー化のための技術は大きく2種類に分けることができる。1つ目は、エネルギー消費量を削減する一般的に「省エネ」と呼ばれるもので、これを果たすための方策が「デマンドサイドマネジメント」と呼ばれる技術である。2つ目は、低炭素・高効率なエネルギー技術の活用する「創エネ」と呼ばれるもので、特に家庭部門においては小規模なエネルギー源を需要家の近隣に設置する「分散型エネルギー」の活用が期待されている。

1.1.1 では、日本のエネルギーをめぐる課題である地球温暖化問題と東日本大震災について、その現状とそれが日本のエネルギー利用にどのように影響するかを述べる。1.1.2 では、日本の部門別最終エネルギー消費量の推移を確認し、なかでも家庭部門における最終エネルギー消費量が増加する要因を分析する。1.1.3 では、家庭部門における省エネルギー技術として、デマンドサイドマネジメントと分散型エネルギーの活用の現状と将来の展望・課題について述べる。

1.1.1 日本のエネルギーをめぐる課題

1.1.1.1 地球温暖化問題

地球環境問題のなかでも、地球温暖化は影響の甚大さと規模の広域さから考えて人類が直面する喫緊の課題であり、温暖化による被害を一定の範囲に抑えるためにはエネルギー供給部門のCO₂排出削減に向けた抜本的な対策が必要である。Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 気候変動に関する政府間パネル)が2014年に発表した第5次評価報告書 (AR5) の「政策決定者向け要約 (Summary for Policymakers, SPM)」[1]の概要を整理すると以下の通りである。

- 「観測された変化及びその要因 (第1章)」 地球の気候システムの温暖化には疑う余地がなく、1950年代以降に観測された変化の多くは数十年から数千年にわたり前例のないものである。人為起源の温室効果ガスの排出は二酸化炭素・メタン・一酸化二窒素の大気中濃度を少なくとも過去80万年で前例のない水準まで増加させ、その温室効果は20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な原因であった可能性が極めて高い。
- 「将来の気候変動、リスク、影響 (第2章)」 二酸化炭素の累積排出量によって21世紀後半及びそれ以降の世界平均の地表面の温暖化の大部分が決定づけられ、また地上気温は評価したすべてのシナリオにおいて21世紀にわたって上昇すると予測される。気候変動による影響については、気候変動によって人間=自然システムに対する既存リスクの増大と新たなリスクの発生が生じるだろう。
- 「適応、緩和、持続可能な開発に向けた将来経路 (第3章)」 適応だけでは21世紀末までの温暖化が、深刻で広範にわたる不可逆的な世界規模の影響に至るリスクが高い/非常に高いレベルに達するだろう。一方で緩和は、一定レベルの共同便益や負の副次効果によるリスクを伴うが、これらのリスクは気候変動による影響と同程度のリスクの可能性を伴うものではなく、近い将来において緩和努力による便益は増加する。
- 「適応及び緩和 (第4章)」 エネルギー使用及び最終消費部門における温室効果ガス排出強度の低減、エネルギー供給の脱炭素化、土地利用部門での正味の排出量の削減及び炭素吸収源の強化などの対策を組み合わせることで費用対効果が高くなり得る。また、効果的な適応および緩和は、国際レベルから地域レベルまで複数の規模にまたがった政策や対策に依存し、気候変動に向けた技術の開発・普及・移転や気候変動対応に向けた資金を支援する政策は適応および緩和を推進する政策の実効性を直接的に補完・向上し得る。

気候変動によるリスク・気温変化・CO₂排出量の関係をまとめたものを図1-1に示す。この図によると、追加的な緩和努力がないベースラインシナリオ (灰色で示される) では、世界平均気温が工業化以前の水準と比べて4℃以上も上昇し、気候変動によるリスクが高いあるいは非常に高いレベルまで達する可能性が高い。それに対して、世界全体で総計した影響や大規模な特異事象に関するリスクを中程度におさえるためには、世界平均気温の上昇を2℃未満に抑制することが必要である。それを高い可能性で達成するためのシナリオ (水色で示される) では、2050年における温室効果ガスの年間排出量を2010年の水準から40~70%削減し、2100年における温室効果ガスの大気濃度を430-480 ppm (CO₂換算) にする必要がある。

ベースラインシナリオ（追加的な緩和努力がない）と緩和シナリオ（温室効果ガスの大気濃度を 2100 年までに 450 ppm（CO₂換算）に抑える）における，部門別の温室効果ガス直接排出量の範囲を図 1-2 に示す。緩和目標を達成するための具体的な対策としてはエネルギー需要を削減するためのエネルギー利用効率向上・行動変化や発電部門の脱炭素化などが挙げられる。なかでも緩和シナリオにおいては，エネルギー供給部門での世界全体の CO₂ 排出量を，2040～2070 年の間に 2010 年の水準から 90 %以上の削減を要請する点が特徴である。

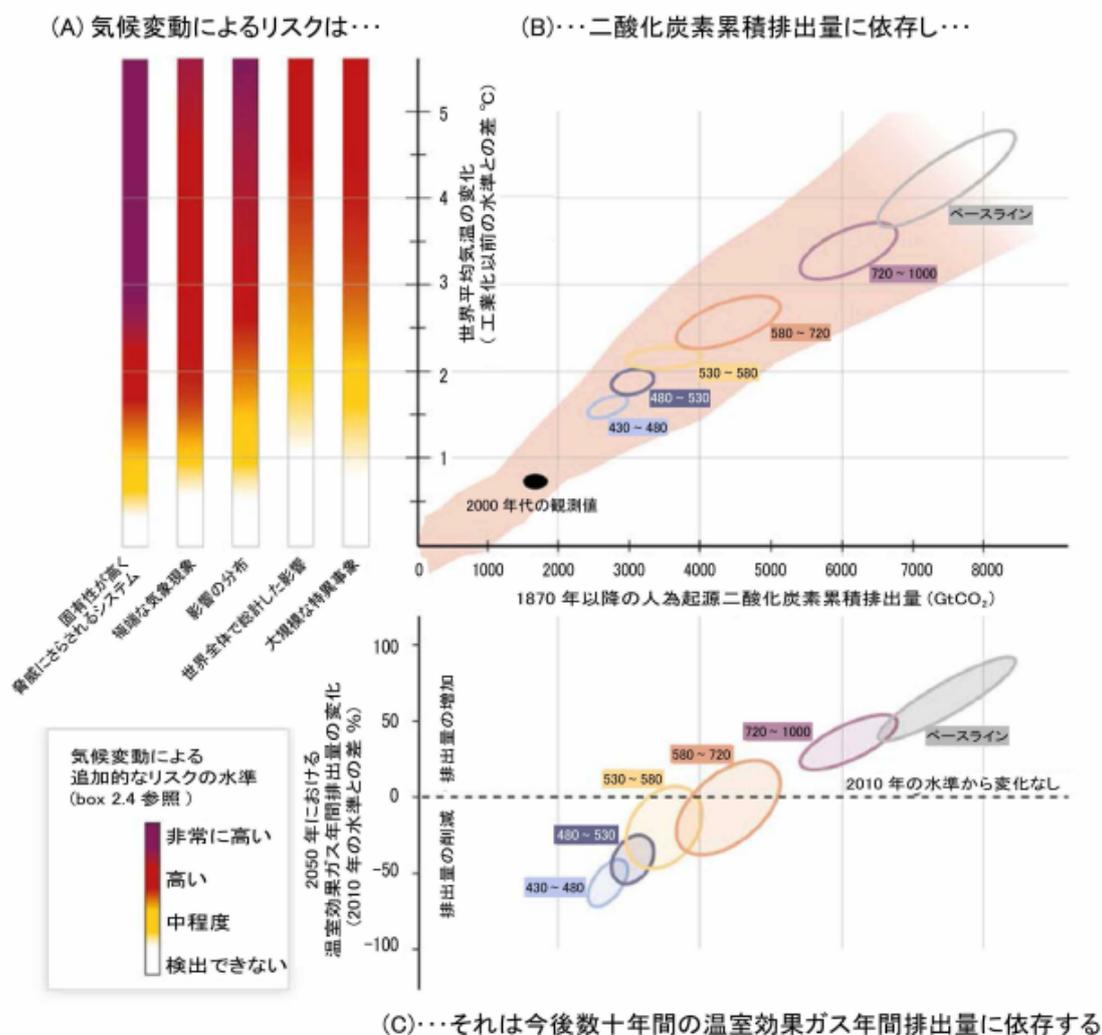


図 1-1 気候変動によるリスク・気温変化・CO₂ 排出量の関係[1]

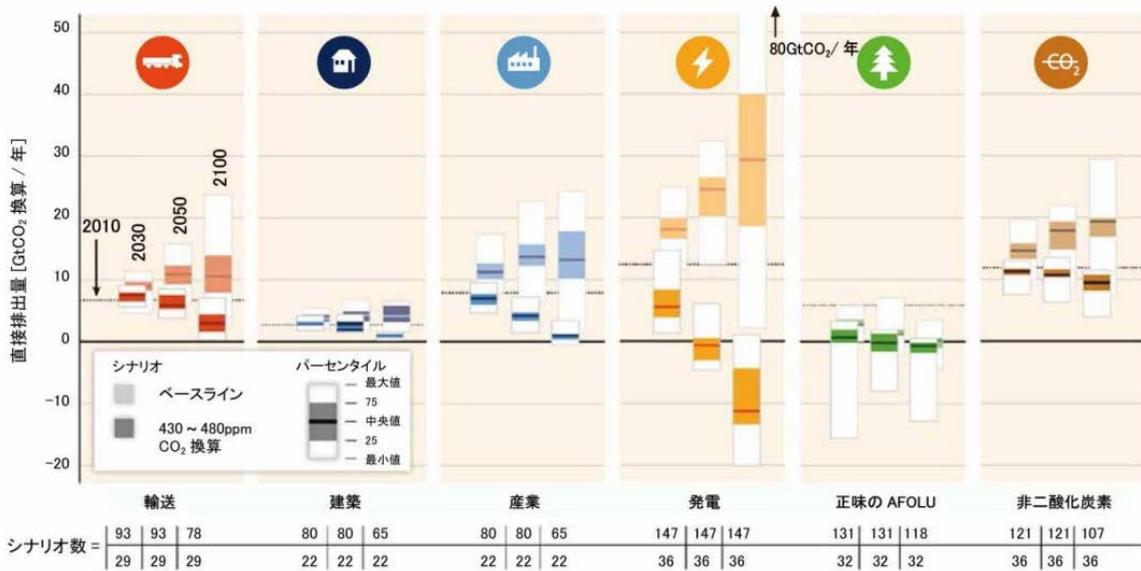


図 1-2 ベースラインシナリオと緩和シナリオにおける部門別の温室効果ガス直接排出量[1]

1.1.1.2 東日本大震災

地球温暖化問題という国際的な課題に加えて、日本のエネルギーシステム、特に電力システムに固有の問題点を浮かび上がらせたのが東日本大震災である。そもそも東日本大震災とは、2011年3月11日14時46分に三陸沖（北緯38度06.2分、東経142度51.6分）で発生したマグニチュード9.0の地震と、それに伴う津波及び余震による一連の大災害の総称である。警察庁の発表では、人的被害が死者15,893人および行方不明者2,565人、建物被害が全壊121,782戸および半壊278,049戸であり、いずれの被害も特に被災三県（岩手県・宮城県・福島県）に集中している（2015年12月10日時点）[2]。

このような直接的被害に加え、東日本大震災は多くの副次的な被害・影響をもたらした。その代表例が、東京電力福島第一原子力発電所事故と事故に伴う電力需給のひっ迫である。福島県双葉郡の東京電力福島第一原子力発電所1～4号機は津波によって非常用ディーゼル発電機・配電系統設備・直流電源などが水没し電力供給が得られない電源喪失状態となり、冷却機能を喪失して炉内温度が上昇したために炉心露出・損傷が生じ、1号機（3月12日15時36分）・3号機（14日11時01分）・4号機（15日6時00分ごろ）で立て続けに水素爆発が生じた。これに加えて大井（東京都）や鹿島（茨城県）などの火力発電所が地震の影響で停止したことによって東日本の電力供給力が大きく低下してしまった。具体的には、東京電力の供給力は約2,100万kW（全体の約40%）、東北電力の供給力は約500万kW（全体の約35%）低下した。そこで電力需要のピークカット・ピークシフトのために、計10日間（3月14～18日・22～25日・28日）にわたる延べ32回の計画停電や、工場による土日操業・平日休暇、鉄道会社による運行本数を削減する「間引き運転」などが実施され、経済・インフラ面に多大な影響を与えた。

東日本大震災を通じて明らかになった日本の電力システムの問題点とは、「原子力の安全性確保」「周波数変換所や連系線の容量不足」「電力需給逼迫の産業への影響回避」の3点である[3]。

1番目の原子力の安全性確保について、震災以前の2010年に策定された「第3次エネルギー基本計画」[4]では、原子力発電は「供給安定性・環境適合性・経済効率性を同時に満たす基幹エネルギー」として位置づけられていた。しかし震災後には、電力会社は全ての原子力発電所を一旦停止し、安全対策を施したうえで原子力規制委員会に再稼働申請を行なうか、それとも廃炉にするか、という判断をすることとなった。しかしながら再稼働申請には時間がかかり、日本国内にある原子力発電所48基の内、原子力規制委員会による新規規制基準の適合性審査を経て再稼働された原子力発電所は川内（鹿児島県）1号機・2号機の計2基、一方で各電力会社が廃炉を決定した原子力発電所は美浜（福井県）1号機・2号機、敦賀（福井県）1号機、島根（島根県）1号機、玄海（佐賀県）1号機の計5基（2015年10月現在）である。そのため、今後の電力システムにおいては、省エネルギーの推進と多種多様な発電方式の活用が求められてくる。震災以降に策定された「第4次エネルギー基本計画」[5]に基づく「長期エネルギー需給見通し」[6]における、2030年度の電力需給構造を図1-3に示す。ここではまず、2030年度に予想される総発電電力需要量12,780億kWh/年程度のうち、17%程度を省エネルギーによって削減する。残りの10,650億kWh/年程度の電力需要に対して、3%程度を石油火力、26%程度を石炭火力、27%程度をLNG火力、22～30%程度を原子力、22～24%程度を再生可能エネルギーによって供給する見通しとなっている。

2番目の周波数変換所や連系線の容量不足について、震災直後は西日本（中部電力から西に位置する電力会社）の電力供給力には比較的余力があったにもかかわらず、東日本と西日本で異なる電力周波数を

変換する「周波数変換所」や連系線の送電容量がボトルネックとなって西日本から東日本への十分な送電ができず、計画停電を実施するに至った。日本における電力システムの連系線とその送電容量を図 1-4 に示す[3]。東日本と西日本を結ぶ東京電力＝中部電力間の周波数変換所の容量は、新信濃（長野県）・佐久間（静岡県）・東清水（静岡県）の合計 100 万 kW であり、震災による供給力低下を補うには容量不足であった。また連系線の強化は、再生可能エネルギーを活用するうえでも重要である。北海道電力と東北電力を結ぶ北海道・本州間連系設備の送電容量は 60 万 kW しかなく、自然エネルギー源が豊富に賦存している北海道とエネルギー消費量の多い大都市が存在する本州の連系も今後の課題といえる。

3 番目の電力需給逼迫の産業への影響回避について、原子力発電停止による供給力低下を火力発電の焼き増しによって補ったことで発電にかかる燃料費が増加し、各電力会社は電気料金の値上げを進めている。電力会社 10 社における電気料金平均単価の推移を図 1-5 に示す[7]。震災後となる 2011 年度以降より電気料金は上昇に転じ、2014 年度の電気料金は震災前の 2010 年度と比べて電灯（家庭向け）で 25.2 %、電力（オフィス・工場向け）で 38.2 % 上昇して過去 20 年間で最も高額となった。このようなエネルギーコストの上昇が経済成長に障害をもたらすことを懸念して、緊急的なエネルギーコスト対策として「(1) 省エネルギー対策の強化」や「(2) 中小企業・小規模事業者支援」が取り組まれ、2014 年度補正予算では省エネルギー対策として 929.5 億円が計上されている[7]。

以上の内容を整理する。東日本大震災によって明らかになった日本の電力システムの問題点として「原子力の安全性確保」「周波数変換所や連系線の容量不足」「電力需給逼迫の産業への影響回避」の 3 つが挙げられる。このうち、「原子力の安全性確保」として震災以降に策定された「第 4 次エネルギー基本計画」では、2030 年度に予想される総発電電力需要量の 17% 程度を省エネルギーによって削減することが計画されている。また、「電力需給逼迫の産業への影響回避」のための緊急的なエネルギーコスト対策としても省エネルギー対策の強化が求められており、2014 年度補正予算では 929.5 億円が計上されている。

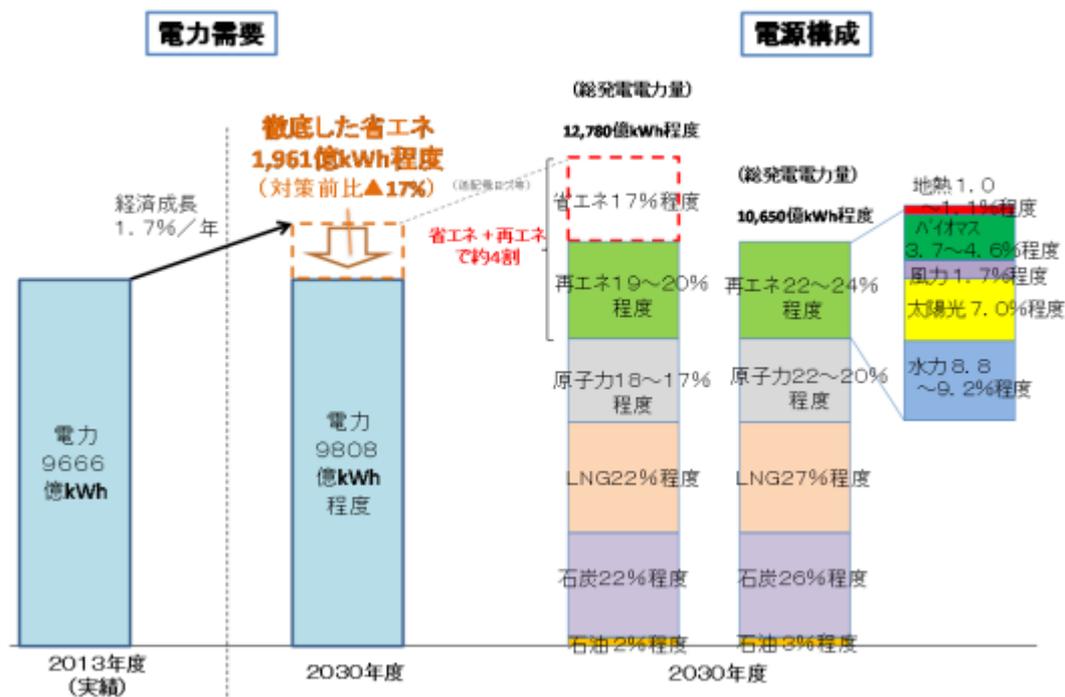


図 1-3 2030 年度の電力需給構造[6]

※平成19年度における会社間連系線の整備状況および連系線の運用容量
(最大電力(9社計):18,741万kW)

※四角内は運用容量制約要因
(熱容量、周波数、電圧、安定度)

※会社内の数値は、過去最大電力実績(発電端)

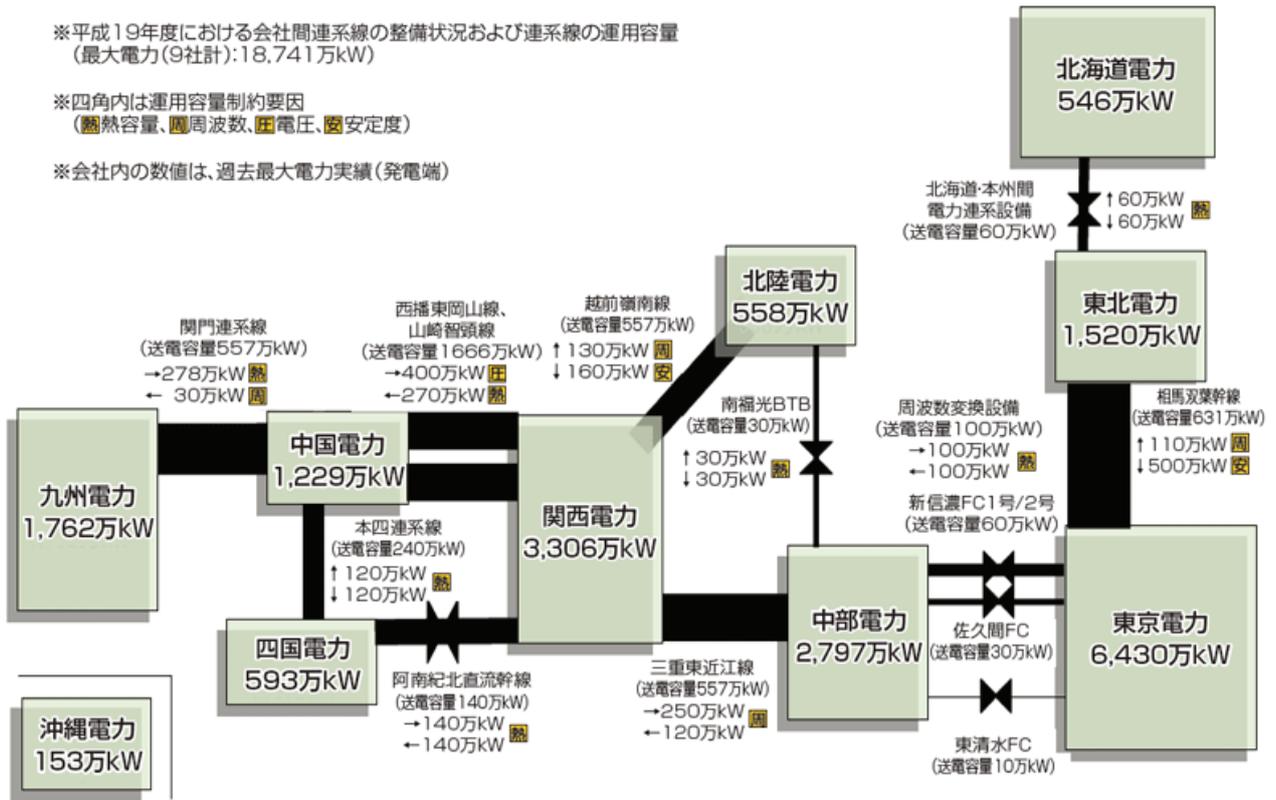


図 1-4 電力システムの連系線と送電容量[3]

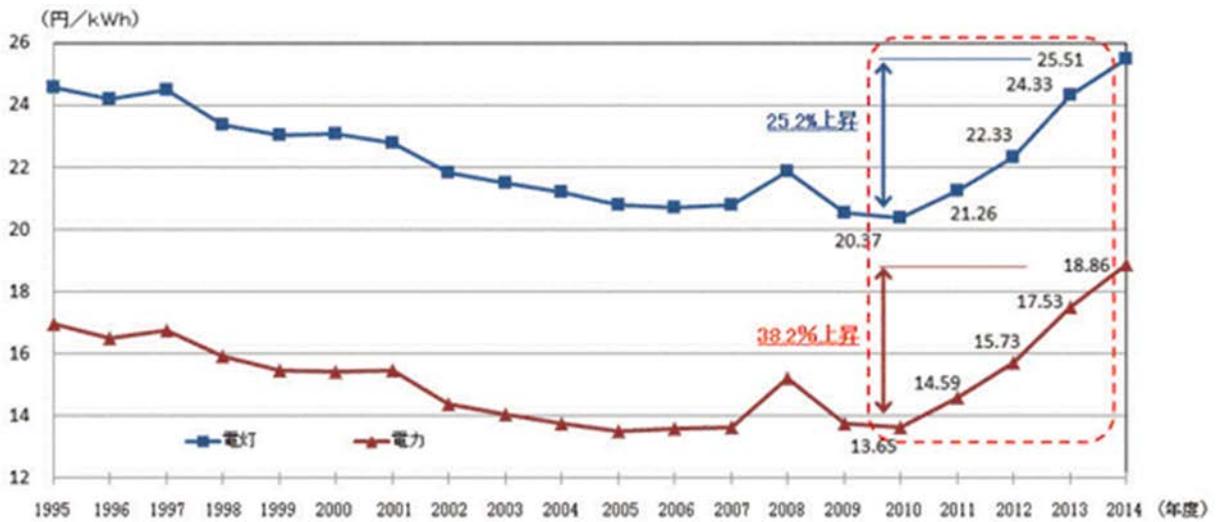


図 1-5 電力会社 10 社の電気料金平均単価の推移[7]

1.1.2 家庭部門におけるエネルギー消費

このように、地球温暖化問題を受けての CO2 排出量削減や、東日本大震災を契機に顕在化したエネルギーシステムの安全性・経済性の課題を背景として、日本のエネルギー消費の大幅削減が求められており、なかでも本研究では日本の家庭部門におけるエネルギー消費に着目する。まず部門別最終エネルギー消費量の推移から家庭部門における最終エネルギー消費量の推移を見たのちに、消費量増加の要因分解によって家庭部門におけるエネルギー消費と生活行動の関係性を確認する。

1.1.2.1 部門別最終エネルギー消費量

日本の部門別最終エネルギー消費量と実質 GDP の推移を図 1-6 に示す[7]。日本の最終エネルギー消費量は 11.10 EJ/年（1973 年）から 13.98 EJ/年（2013 年）と、40 年間で 1.3 倍程度に増加している（E（エクサ）は、 10^{18} を表す）。部門別に見ると産業部門における最終エネルギー消費量が最も大きいが、7.27 EJ/年（1973 年）から 6.21 EJ/年（2013 年）と 40 年間で 0.9 倍程度に減少している。産業部門においては収益性向上が重要命題であり、生産時のエネルギー効率を向上させることが燃料費の削減をもたらして企業の収益性を高めることに繋がるという点が、最終エネルギー消費量が削減された要因と考えられている。一方で家庭部門においては、0.99 EJ/年（1973 年）から 2.01 EJ/年（2013 年）と 40 年間で 2.0 倍程度に増加しており、増加率では業務他部門に次いで 2 番目である。家庭部門におけるエネルギー消費とは、私たちが家庭内で日常生活を過ごすときに家電製品や給湯機器を使用することで消費される電力・ガス・灯油などのエネルギー量であり、家庭での生活行動における利便性・快適性を追求することによってエネルギー消費量は増加してきた。

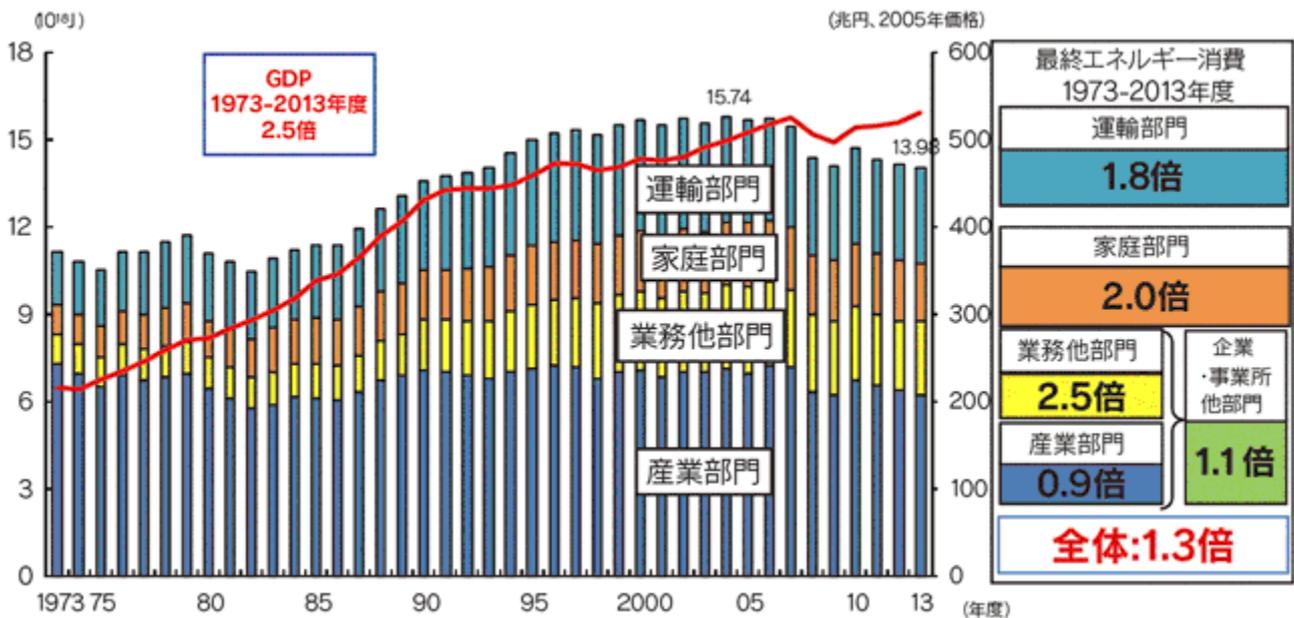


図 1-6 部門別最終エネルギー消費量と実質 GDP の推移[7]

このような家庭部門におけるエネルギー消費量と生活行動の関係性をより詳細に見ていくために、エ

エネルギー消費量を増加させる要因を分解する。家庭部門におけるエネルギー消費量は、「世帯数×世帯あたりエネルギー消費量」で表すことができる。そこで、最終エネルギー消費量の増加を「世帯数要因（世帯数の増減）」と「原単位要因（世帯あたりのエネルギー消費量の増減）」の2つに分けて、分析する。家庭部門における最終エネルギー消費量の要因分析を図1-7に示す[7]。家庭部門における最終エネルギー消費量は988 PJ/年（1973年）から1562 PJ/年（1985年）、2005 PJ/年（1995年）と単調に増加し、この間は世帯数要因・原単位要因がともにエネルギー消費の増加に寄与してきた（P（ペタ）は、 10^{15} を表す）。その後、2005年の消費量は2205 PJ/年となり、消費量増加は鈍化している。これは1995年から2005年にかけての10年間に於いて原単位要因が消費量を減少させる方向に働くようになったためである。さらに2005年から2013年までの8年間に於いて、原単位要因による影響が強まりエネルギー消費量は減少に転じつつある。つづいて、世帯数要因と原単位要因に関するより詳細な推移を確認する。

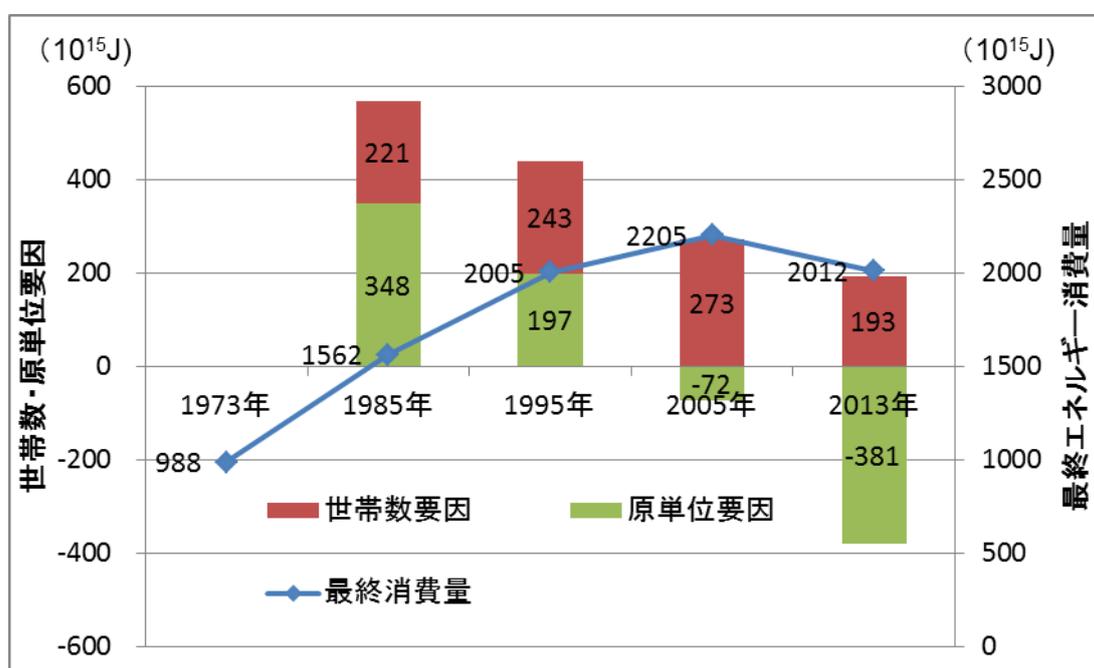


図 1-7 家庭部門における最終エネルギー消費量の要因分析[7]

1.1.2.2 世帯数要因

日本における人口と世帯数の推移を図 1-8 に示す。日本では少子化の影響で人口増加が停滞しており、11.70 億人（1980 年）から 12.81 億人（2010 年）と 30 年間で 1.09 倍程度の増加にとどまっている。その一方、世帯数は 3582 万世帯（1980 年）から 5184 万世帯（2010 年）と 30 年間で 1.45 倍程度に増加しており、人口よりも大きな増加率を示している。これは単身化・核家族化が進むことによる 1 世帯あたりの家族人数の減少によって説明することができる。核家族世帯（夫婦と子供の世帯・ひとり親と子供の世帯・夫婦のみの世帯の総称）は日本における典型的な家族形態であり、2159 万世帯（1980 年）から 2921 万世帯（2010 年）と 30 年間で 1.35 倍に増加している。また近年は単独世帯の増加も著しく、710 万世帯（1980 年）から 1678 万世帯（2010 年）と 30 年間で 2.37 倍に増加している。このように、親と子供と孫が同居する大家族から親と子供が同居する核家族あるいは一人暮らしへと家族形態が移行することによって、人口増加が停滞する昨今においても世帯数が増加し続けている。

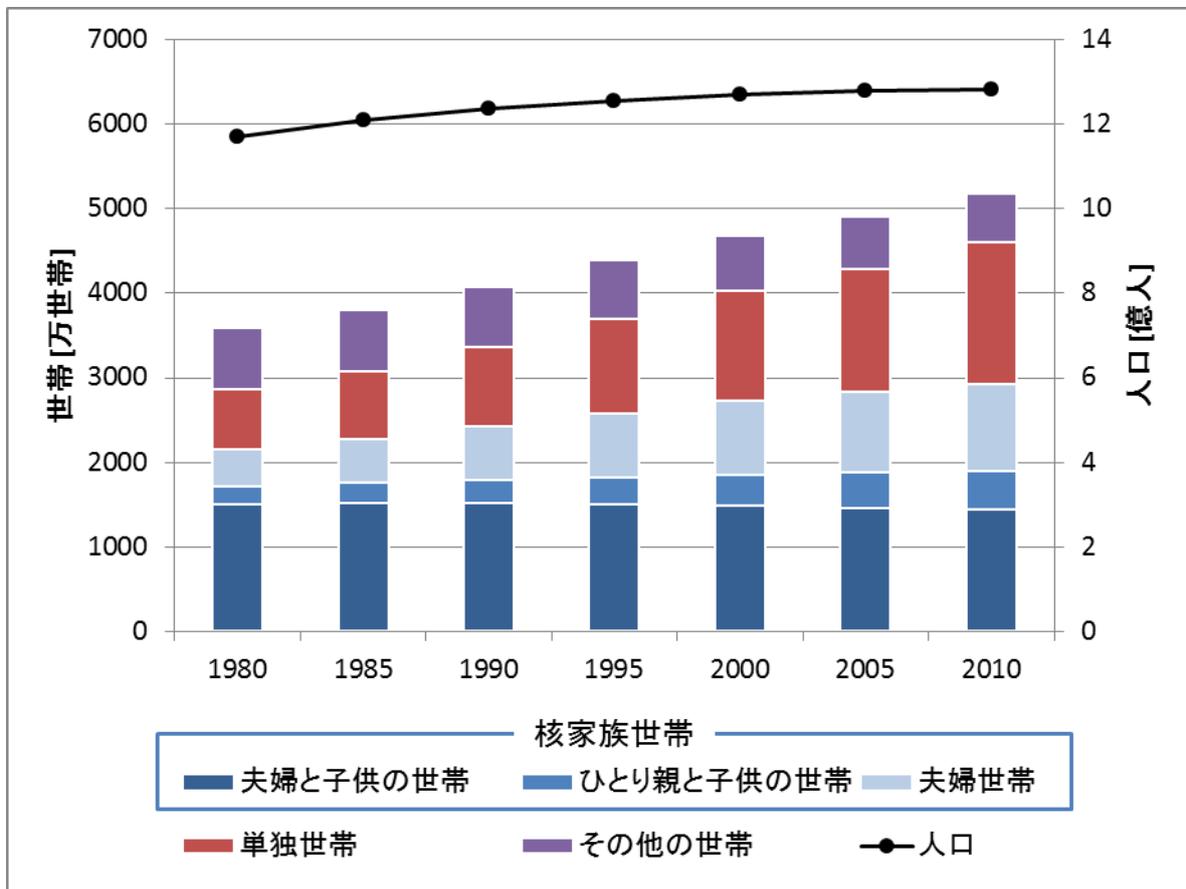


図 1-8 日本の人口・世帯数の推移（『日本の統計 2015』[8]に基づいて作成）

1.1.2.3 原単位要因

世帯あたりの用途別エネルギー消費量の推移を図 1-9 に示す. 1 世帯あたりのエネルギー消費原単位は 30,266 MJ/世帯 (1973 年) から 35,960 MJ/世帯 (2013 年) と, 40 年間でおよそ 1.2 倍に増加した. また用途別のシェアは 1973 年度には給湯 (31.7 %) > 暖房 (29.9 %) > 動力・照明他 (23.0 %) > ちゅう房 (14.1 %) > 冷房 (1.3 %) の順だったのが, 2013 年度には動力・照明他 (37.8 %) > 給湯 (27.8 %) > 暖房 (23.1 %) > ちゅう房 (8.7 %) > 冷房 (2.6 %) の順となり, 動力・照明他の割合が増加している.

また, 世帯あたりの種類別エネルギー消費量の推移を図 1-10 に示す. 家庭で消費されるエネルギー源のシェアは 1973 年度には灯油 (31.3 %) > 電気 (28.2 %) > LP ガス (17.4 %) > 都市ガス (17.0 %) > 石炭 (6.1 %) の順だったのが, 2013 年度には電気 (51.0 %) > 都市ガス (20.4 %) > 灯油 (16.7 %) > LP ガス (11.0 %) > 太陽熱他 (0.9 %) > 石炭 (0.0 %) の順となり, 電気・都市ガスの割合が増加し灯油・LP ガス・石炭の割合が減少している. この推移の要因として, 40 年間で家電製品の種類が増加したことと暖房・給湯機器の電化・ガス化が進んだことが考えられ, この点を踏まえて原単位要因をさらに要因分解していく.

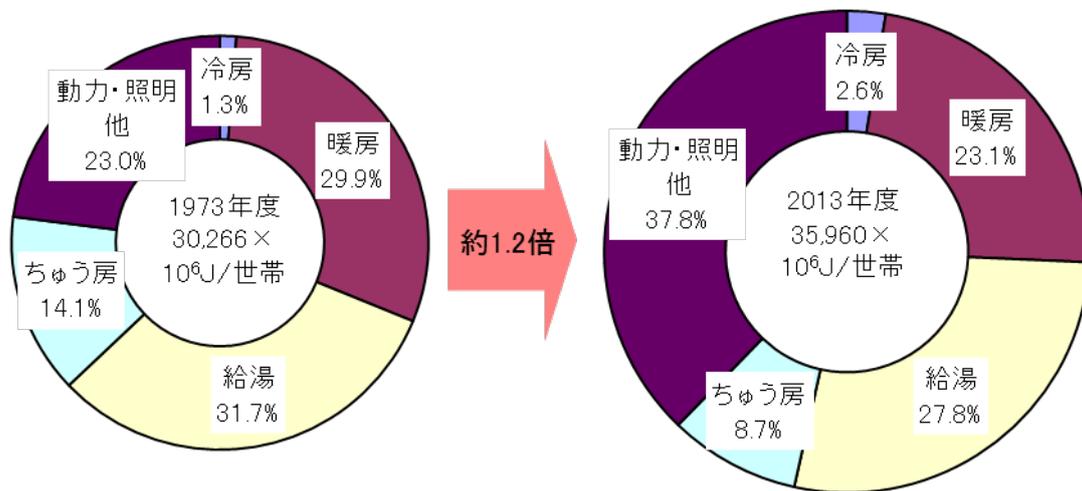


図 1-9 世帯あたりの用途別エネルギー消費量の推移[7]

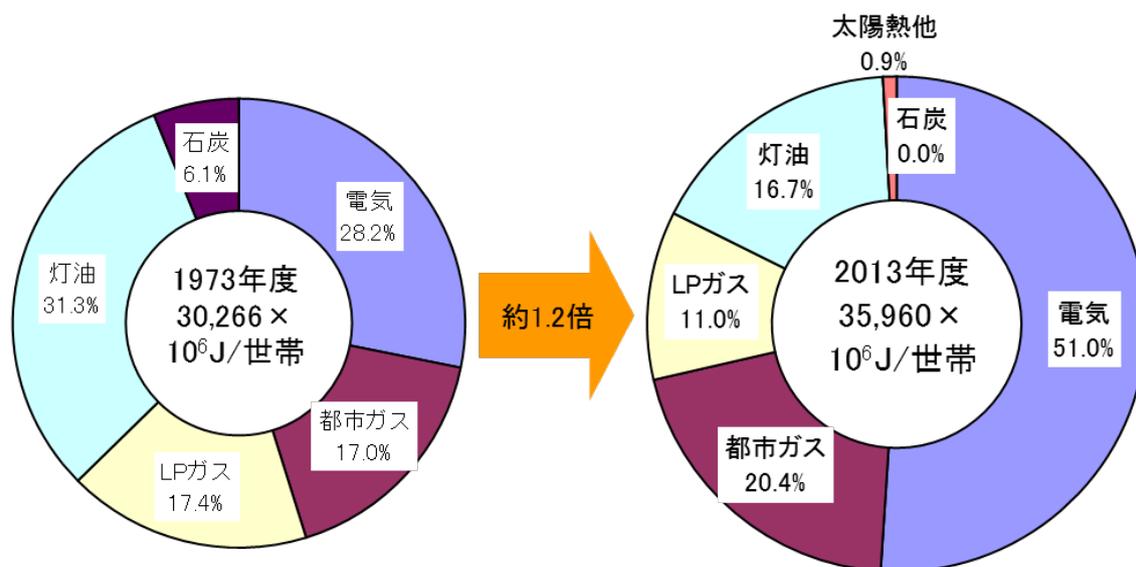


図 1-10 世帯あたりの種類別エネルギー消費量の推移[7]

原単位要因をさらに要因分解して、「世帯あたりの家庭用エネルギー機器の保有台数」と「家庭用エネルギー機器のエネルギー消費性能」の推移を確認する。

まずは、内閣府 消費動向調査[9]の「主要耐久消費財等の保有数量」に基づいて、100世帯あたりの家庭用エネルギー機器（家電製品およびガス・石油製品）の平均保有台数の推移を確認する。保有台数の調査開始時期・終了時期は機器によってまちまちであり、特に2004年から2005年の間で調査する主要耐久消費財等の項目の大幅な見直しが行われ、以下で挙げる家庭用エネルギー機器26種類のうち、11種類は2004年までで調査が終了した機器である。

100世帯あたりの家庭用炊事・掃除・洗濯機器の平均保有台数の推移を図1-11に示す。電気掃除機と1950年代に「三種の神器」と呼ばれた電気冷蔵庫・電気洗濯機は、1975年時点には保有台数が100台/100世帯を超えており、これらの機器は当時「一家に一台」の状態であったことが分かる。このうち電気冷蔵庫と電気掃除機の保有台数は増加を続けており、「複数台持ち」をする家庭が生じていることを表している。電子レンジは1975年以降に普及が進み、2001年時点で保有台数が100台/100世帯を超える。衣類乾燥機の保有台数は9.3台/100世帯（1985年）から72.7台/100世帯（2015年）と大幅に増加しており、特に2014年に保有台数が急増しているのは乾燥機能付き洗濯機が標準的なものとなったためと考えられる。食器洗い機の保有台数は他の炊事・掃除・洗濯機器と比べ少ないが、それでも21.9台/100世帯（2005年）から33.5台/100世帯（2015年）とここ10年で1.5倍に増加している。

100世帯あたりの家庭用空調・給湯機器の平均保有台数の推移を図1-12に示す。この中ではルームエアコンの保有台数の増加が特に顕著で、23.3台/100世帯（1975年）から274.7台/100世帯（2015年）と40年間で保有台数は11.8倍にまで増加している。それ以外の空調機器に関しては、ファンヒータ・温風ヒータ・電気カーペットの保有台数が増加する代わりに石油ストーブの保有台数が減少していて、暖房用燃料が石油から電気・ガスへと代替されていることが確認できる。温風暖房器・空気清浄器の保有台数は低調に推移している。給湯機器に関しては、ガス瞬間湯沸器の保有台数が減少する一方で温水器が増加しており、温水器には電力や太陽熱のものも含まれるので、ここでも燃料代替の傾向がみられる。

100世帯あたりの家庭用映像・撮影・情報機器の平均保有台数の推移を図 1-13 に示す。カラーテレビが「新・三種の神器」と呼ばれるようになったのは1960年代半ばであり、1975年時点にはカラーテレビの保有台数が100台/100世帯を超え、「一家に一台」の状態であった。その後もカラーテレビの保有台数は堅調に増加を続けるが、2005年の252.0台/100世帯をピークとして以降は減少に転じている。カラーテレビの保有台数がピークを迎える2000年以降に普及し始めたのが、パソコン・タブレット型端末・携帯電話といった情報通信端末である。カラーテレビの保有台数が減少し始めた2006年に、パソコンの保有台数は100台/100世帯を超える。またタブレット型端末もここ数年の間に普及が進み、現在(2015年)の保有台数は36.0台/100世帯である。さらに携帯電話の保有台数は2011年にテレビを超え、現在(2015年)には230.7台/100世帯に達している。2014年時点での1世帯あたりの平均家族人数(平均世帯人員)は2.49人/世帯[10]であるので、携帯電話の普及が「一人に一台」のレベルに達していることが分かる。DVDプレーヤー・ステレオ・CDプレーヤーもパソコンなどの情報端末に代替される可能性が考えられ、実際にDVDプレーヤーに関して2014年に保有台数の減少傾向がみられる。それ以外のファクシミリ・デジタルカメラ・ビデオカメラに関しては、保有台数の増加がいったん落ち着いている。

以上をまとめると、多くの家庭用エネルギー機器は1975年以降、100世帯あたりの保有台数が増加してきている。食洗器・携帯電話・タブレット型端末といった比較的新しい機器も保有台数は増えており、機器の種類も多様化しているようである。一部の機器については減少しているものもみられるが、それは他の代替機器が普及したためであると考えられ、全体的には家庭用エネルギー機器は増加傾向にある。

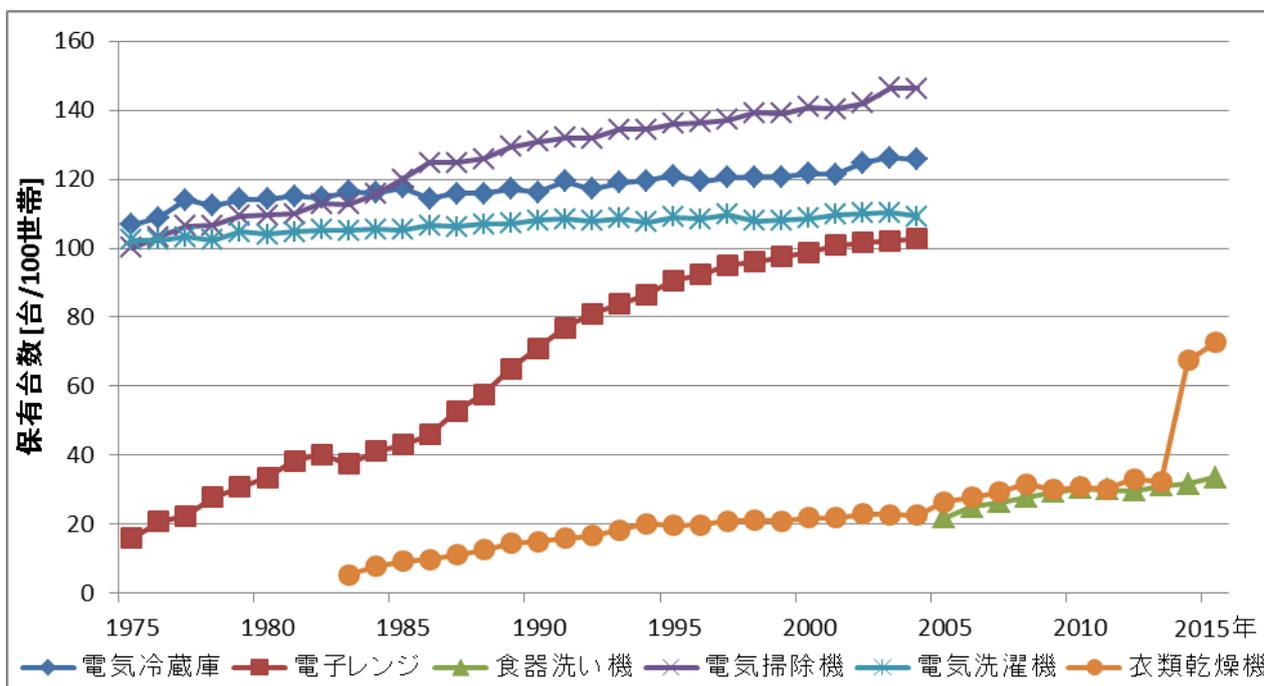


図 1-11 家庭用炊事・掃除・洗濯機器の平均保有台数 (100世帯あたり) の推移

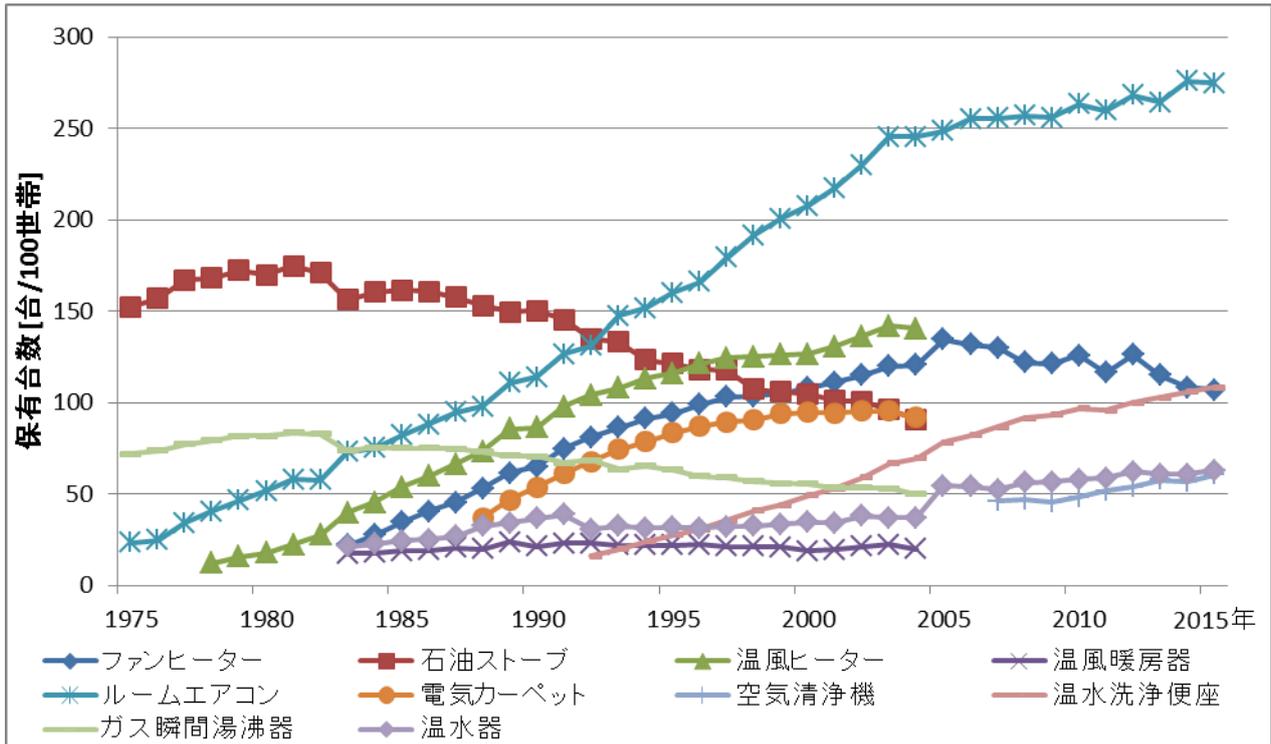


図 1-12 家庭用空調・給湯機器の平均保有台数（100 世帯あたり）の推移

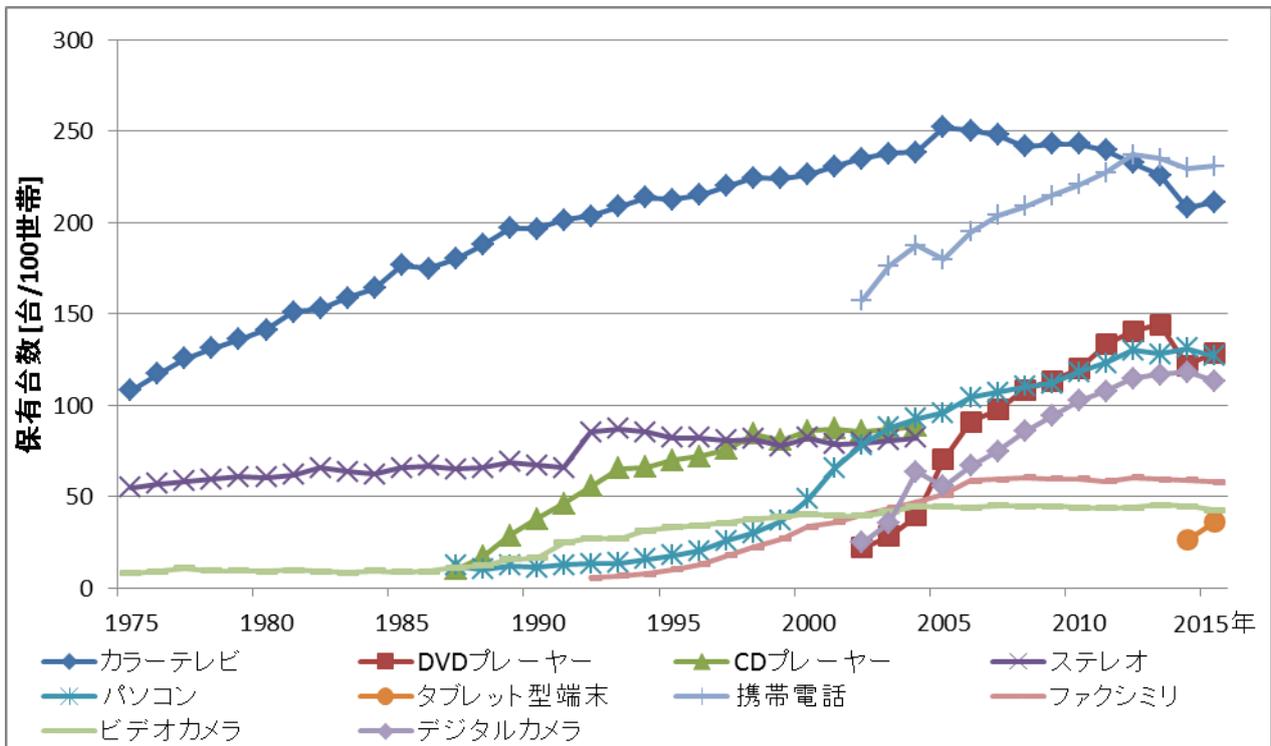


図 1-13 家庭用映像・撮影・情報機器の平均保有台数（100 世帯あたり）の推移

つづいて家庭用エネルギー機器のエネルギー消費性能について、トップランナー制度の対象機器に注目してエネルギー効率の推移を確認する。家庭用エネルギー機器の効率改善のためには、国が将来にお

けるエネルギー効率の基準値を設定して、業界団体に基準のクリアを課すことで技術開発を促す、という手法が取られる。トップランナー制度とは、この基準値設定の際に、現時点において市場に存在しているエネルギー機器の中で最もエネルギー効率の優れた製品の性能をベースとするものであり、改正省エネ法が施行された1998年より導入された制度である。トップランナー制度による効率改善について、家電製品の推移を図1-14に、ガス・石油製品の推移を図1-15に示す。基準値設定のベースとなるトップランナー対象機器の性能は年を経ることで向上しており、近年は家庭用エネルギー機器の効率が改善してきたことが分かる。特に、電気冷蔵庫の年間消費電力量は647 kWh/年(1998年)から290 kWh/年(2004年)と6年間で55%の改善、ルームエアコンのCOPは3.01(1997年)から5.05(2004年)と7年間で68%の改善が得られている。ただし、これらの数値は各年のトップランナー対象機器、すなわちその時点で市場に出回っている機器の中で最も性能の良いものの効率であり、家庭内に賦存している機器ストックの平均性能を表すものではない。また、ここで比較しているのは各年における「同サイズ」のトップランナー対象機器であり、機器を買い替える際に以前のものよりも大型の製品や高機能の製品(例えば、ハードディスク内蔵型の液晶テレビなど)を選択した場合には、性能改善効果は弱まる点に注意されたい。

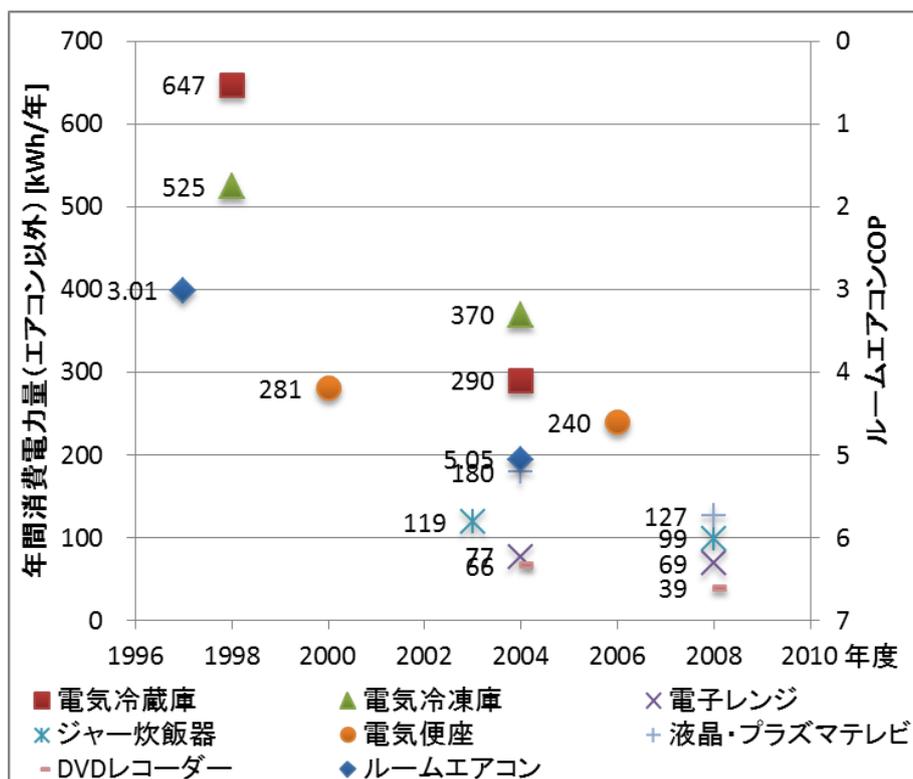


図 1-14 トップランナー対象家電製品の効率改善の推移

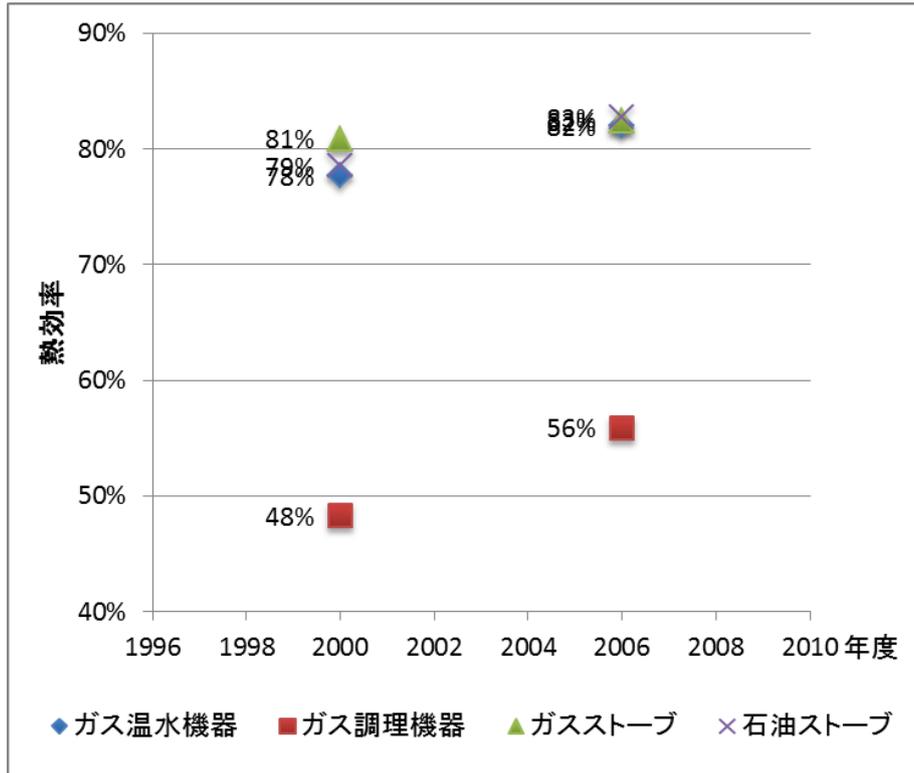


図 1-15 トップランナー対象ガス・石油製品の効率改善の推移

1.1.2.4 家庭部門における最終エネルギー消費量に影響する要因の総括

以上の内容を整理すると、家庭部門における最終エネルギー消費量には「(1)世帯数」「(2)世帯あたりの家庭用エネルギー機器の保有台数」「(3)家庭用エネルギー機器のエネルギー消費量」の3要因が影響されてきたことが分かる。各要因の推移を確認すると、(1)世帯数は核家族化・単身化の影響で増加、(2)世帯あたりの機器保有台数は家庭生活の利便性・快適性追求の影響で増加しており、一方で(3)機器のエネルギー消費量はトップランナー制度を背景とする技術開発の影響で低下している。(3)機器のエネルギー消費量低下の一要因であるトップランナー制度は1999年から開始され、その前後において原単位要因が増加から減少に転じている。このことから近年のエネルギー消費量の原単位要因が減少している要因として、技術開発による機器効率の向上が挙げられる。一方で、(1)世帯数の増加や(2)世帯あたりの家庭用エネルギー機器の保有台数の増加は世帯数要因を増加させ、原単位要因の減少を抑制する方向に寄与しているものと考えられる。家庭部門における最終エネルギー消費量の増加は、以上のような3要因が影響している。(1)世帯数の増加（核家族化・単身化）と(2)世帯あたりの家庭用エネルギー機器の保有台数の増加（家庭生活の利便性・快適性追求）はいずれも、日本人の家庭での生活行動のあり方が変化してきたことを意味する。ここから、家庭での生活行動が変化することによって家庭部門における最終エネルギー消費量も変化してきたことが分かる。家庭部門におけるエネルギー消費と生活行動の関係性を図1-16に示す。

以上の議論から、家庭部門におけるエネルギー消費は家庭での生活行動と密接に関係していることが分かる。ここまでで取り上げてきたのは、統計データから得られる生活行動のマクロな変化によるエネルギー消費での影響である。しかし、家庭での生活行動は統計データに反映されないミクロな変化を多く含み、このような生活行動のミクロな変化が家庭のエネルギー消費に与える影響を明らかにするのが本研究の位置づけである。本研究で検討する生活行動のミクロな変化については2種類あり、1つ目は日々の生活行動の違い、2つ目はライフステージの進行（子供の成長や勤め人の退職など）による生活行動の変化である。これらの詳細については後述する。

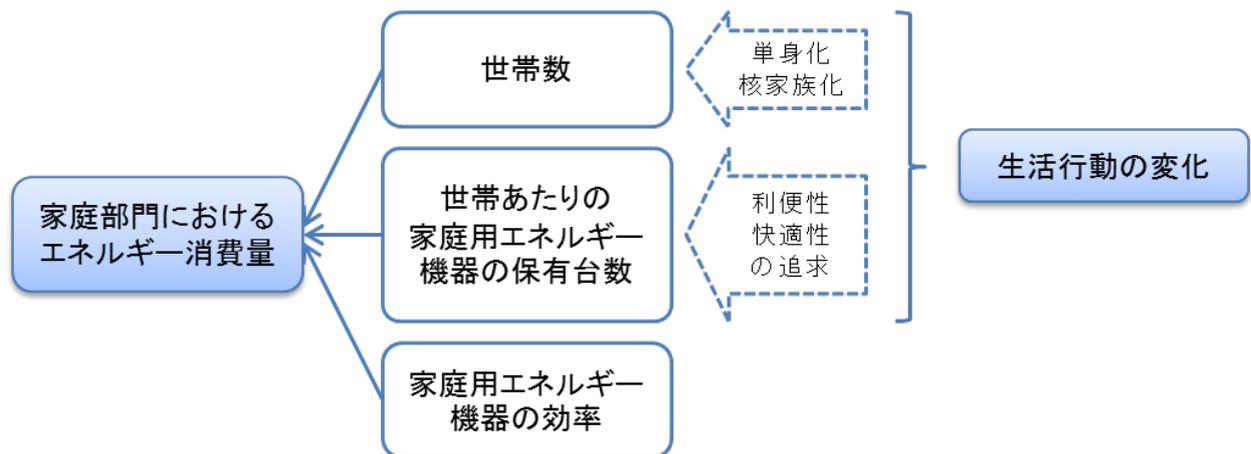


図 1-16 家庭部門におけるエネルギー消費と生活行動の関係性

1.1.3 家庭部門の省エネルギー技術

家庭部門の省エネルギー化のための技術は大きく2種類に分けることができる。1つ目は、エネルギー消費量を削減する、一般的に「省エネ」と呼ばれるものである。これからエネルギーシステムにおいては、エネルギー供給者である電力・ガス会社だけでなく、エネルギー需要者の調整能力も活用してシステム安定化に貢献することが重要となってきており、これを果たすための方策が「デマンドサイドマネジメント」と呼ばれる技術である。2つ目は、低炭素・高効率なエネルギー技術の活用であり、省エネと対比して「創エネ」と呼ばれるものである。特に家庭部門においては小規模なエネルギー源を需要家の近隣に設置する「分散型エネルギー」の活用が期待されている。

1.1.3.1 デマンドサイドマネジメント

デマンドサイドマネジメントとは、電力会社が個々の家庭における電力需要データを常に監視して、必要に応じて電力需要を制御するための方策を家庭に対して取ることで電力需給を協調させる技術のことである。

デマンドサイドマネジメントにおける電力需要データの監視を可能にするのが、スマートメーターの導入である。スマートメーターは、電力をデジタルで計測し、さらにデータの通信機能を持った電力量計である。スマートメーターの最も大きな役割は、家庭における時々刻々の電力使用量を計測しデータとして電力会社に通信する「遠隔検針機能」である。従来の電力量計では、電力会社が電力料金を請求する際に、訪問員が月1回程度の頻度で住宅外部に取り付けられた電力量計を目視で検針して電力使用量を確認する必要があった。スマートメーターの導入は、デマンドサイドマネジメントだけでなく、検針作業の効率化という意味においても重要となる。一般家庭が対象となる低圧部門における、スマートメーターの各年度導入計画台数を表1-1に示す[12]。日本でスマートメーターを最初に導入し始めたのは関西電力で、2012年4月に本格導入を開始している。次いで、東京電力が2014年7月に本格導入をスタートし、残り8社が後を追う形で2015年から2016年にかけて本格導入を開始する。スマートメーターの導入完了時期は2020年代前半を計画しており、むこう10年の間で大半の家庭にスマートメーターが導入されることとなる。

デマンドサイドマネジメントにおける電力需要制御の方策を表1-2に示す。デマンドサイドマネジメントは、経済的なインセンティブによって需要制御を図る「デマンドレスポンス(Demand Response; DR)」と、電力使用に関する情報提示によって需要制御を図る「省エネアドバイス」に分類することができる。デマンドレスポンスは主に電力需要のピークシフトを目的とし、需要のピークとなる時間帯に高い電力単価を課す「時間帯別料金」、真夏・真冬の電力需給が最も逼迫する日に限定してピークとなる時間帯の電力単価を引き上げる「ピーク時料金」、需要のピークとなる時間帯に外出を促すようなクーポンを配布する「節電クーポン」が挙げられる。省エネアドバイスは主に省エネルギーを目的とし、モニターに電力使用の現状や履歴に関する情報を表示する「見える化」、電力使用状況と家庭の省エネに向けたアドバイスをレポート形式で提供する「省エネアドバイスレポート」が挙げられる。

表 1-1 低圧部門におけるスマートメーターの導入開始時期と各年度導入計画台数（単位：万台）[12]

電力会社	本格導入 開始時期	2014 年度	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度
北海道電力	2015年4月		38	53	48	49	51	51	52	56	57	
東北電力	2015年1月	12	65	84	82	81	80	78	73	73	72	
東京電力	2014年7月	190	320	570	570	570	330	330				
中部電力	2015年7月	1	102	146	144	142	139	139	142	139		
北陸電力	2015年7月		15	25	25	23	23	22	19	19	16	
関西電力	2012年4月	160	170	170	170	150	130	130	120	110		
中国電力	2016年4月		24	56	61	61	61	61	61	61	61	
四国電力	2015年1月	3	15	31	31	31	31	31	31	31	30	
九州電力	2016年4月			80	85	85	109	101	100	89	79	
沖縄電力	2016年4月		1	10	10	10	10	10	10	9	9	9
合計		366	750	1225	1226	1202	964	953	608	587	324	9

表 1-2 デマンドサイドマネジメントにおける電力需要制御策の種類

電力需要制御策	アプローチ方法	制御の目的	具体例
デマンド レスポンス	家庭に対して経済的なインセンティブを提供したりすることで、節電に向けた取り組みを促す	ピークシフト	<ul style="list-style-type: none"> ● 時間帯別料金 ● ピーク時料金 ● 節電クーポン
省エネ アドバイス	家庭に対して電力使用に関する情報を提示して、節電に向けた取り組みを促す	省エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> ● 見える化 ● 省エネアドバイスレポート

1.1.3.2 分散型エネルギー

分散型エネルギーを活用する技術の種類を表 1-3 に示す。エネルギーシステムの中でも電力システムの課題として、従来は集中的に設置された出力 10 万～100 万 kW 程度の火力・水力・原子力発電所を主軸として電力供給がなされており、発電所が被災したり事故が発生したりした場合に広域にわたって停電が発生するリスクが存在していた。これに対して、電源を分散配置することによって、災害・事故による広域停電リスクを低減することができる。加えて、電力需要地の近くにエネルギー供給源を設置することができるので、送電中に熱変換されてしまう電力損失を少なくすることができる。また、地域熱供給システムによって工場や焼却場から発生する排熱を家庭の給湯・暖房エネルギーに活用したり、コジェネレーションシステム (cogeneration system ; CGS) によって熱電併給 (電力と熱を同時に供給すること) したりすることによって、エネルギーの高効率利用が可能となる。

分散型エネルギーの普及に向けた課題として挙げられるのが、エネルギーコストの高さである。各種発電方式の違いによる 1kWh あたりの発電コストの比較を図 1-17 に示す[16]。2010 年基準における住宅用太陽光発電の発電コストは 33.4～38.3 円/kWh、燃料電池の発電コスト (熱価値控除後) は 101.9 円/kWh であり、従来型大規模発電の代表例である火力・水力・原子力発電と比較して数倍～十数倍程度割高となっている。太陽光発電・燃料電池はいずれも発電コスト全体に対して資本費 (技術導入コスト) が占める割合が高く、普及が加速すれば生産規模拡大に伴って生産コストが低下するので、将来的にはより安価に利用することが期待される。

現時点では「再生可能エネルギー固定価格買取制度」や補助金によって技術普及が下支えされているが、家庭における分散型エネルギー導入の採算性に対する関心は高い。家庭用燃料電池システムのメーカー販売台数 (単年) の推移を図 1-18 に示す[18]。家庭用燃料電池システムは「エネファーム」を統一名称として 2009 年から各電機メーカーより発売された。2014 年度の販売台数は約 3.8 万台で、これまでの累計販売台数は 12.1 万台である。これまでは流行に敏感な「アーリーアダプター」層に対する販売がメインであったが、今後のさらなる普及拡大にむけては「様々な属性の家庭において、家庭用燃料電池システムがどの程度の性能を発揮するのか」ということをより詳細に評価する必要が求められている[17]。

表 1-3 分散型エネルギー技術の種類

分類	発電	熱利用
再生可能エネルギー (自然由来)	<ul style="list-style-type: none"> ● 太陽光発電 ● 風力発電 ● 地熱発電 ● 小水力発電 ● バイオマス発電 ● 波力・潮力・海流発電 	<ul style="list-style-type: none"> ● 太陽熱利用 ● 地中熱利用 ● 雪氷熱利用
未利用エネルギー (人工由来)	<ul style="list-style-type: none"> ● 廃棄物発電 	<ul style="list-style-type: none"> ● 排熱利用
エネルギー貯蔵	<ul style="list-style-type: none"> ● 蓄電池 ● フライホイール ● 超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) 	<ul style="list-style-type: none"> ● (蓄熱槽)
コージェネレーション システム	<ul style="list-style-type: none"> ● 内燃機関 (ディーゼル, ガスタービン, ガスエンジン) ● 燃料電池 	

日本電機工業会資料[13]・資源エネルギー庁資料[14]・新エネルギー財団 HP[15]を参考に作成

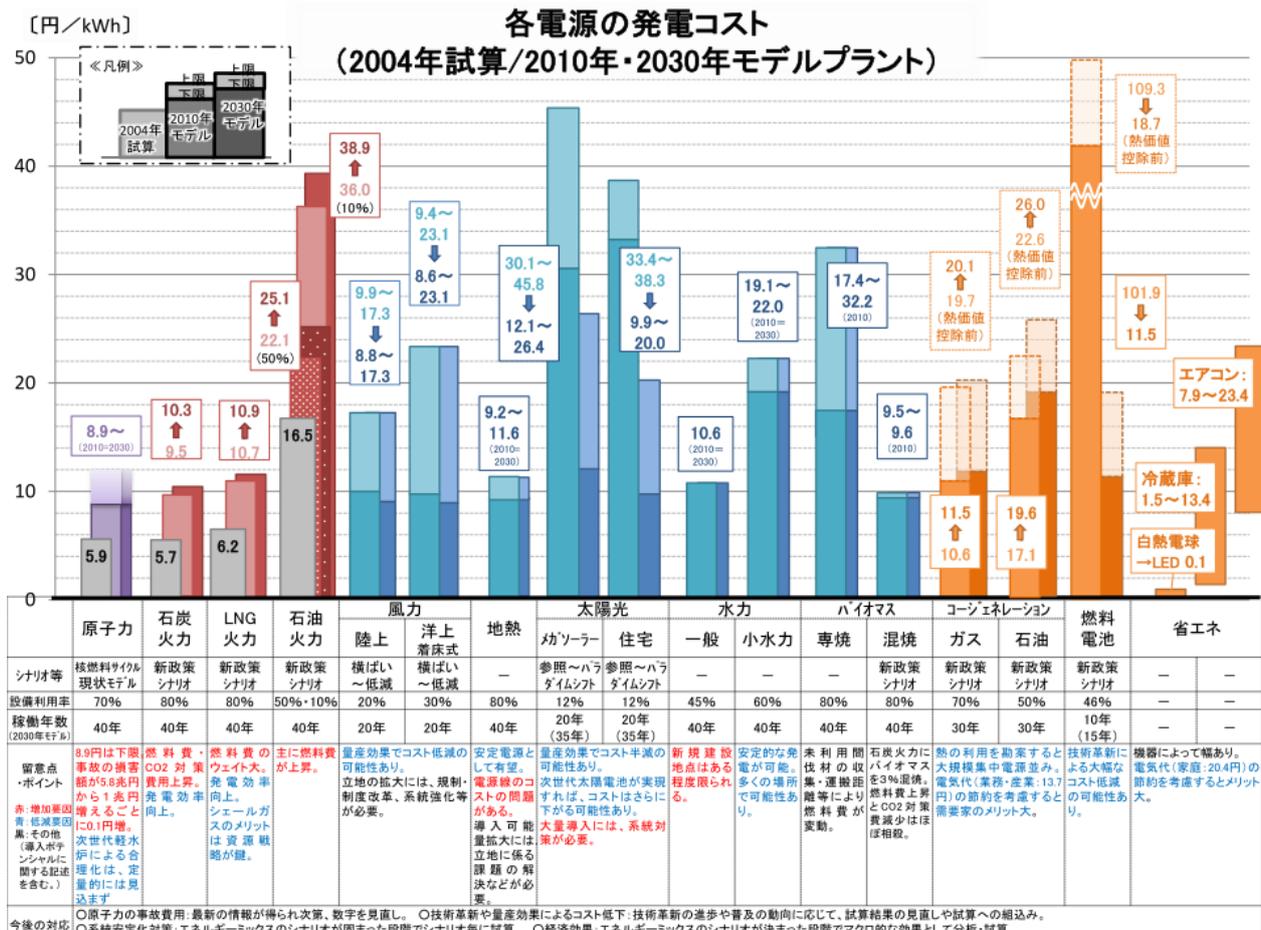


図 1-17 発電方式別の発電コストの比較[16]

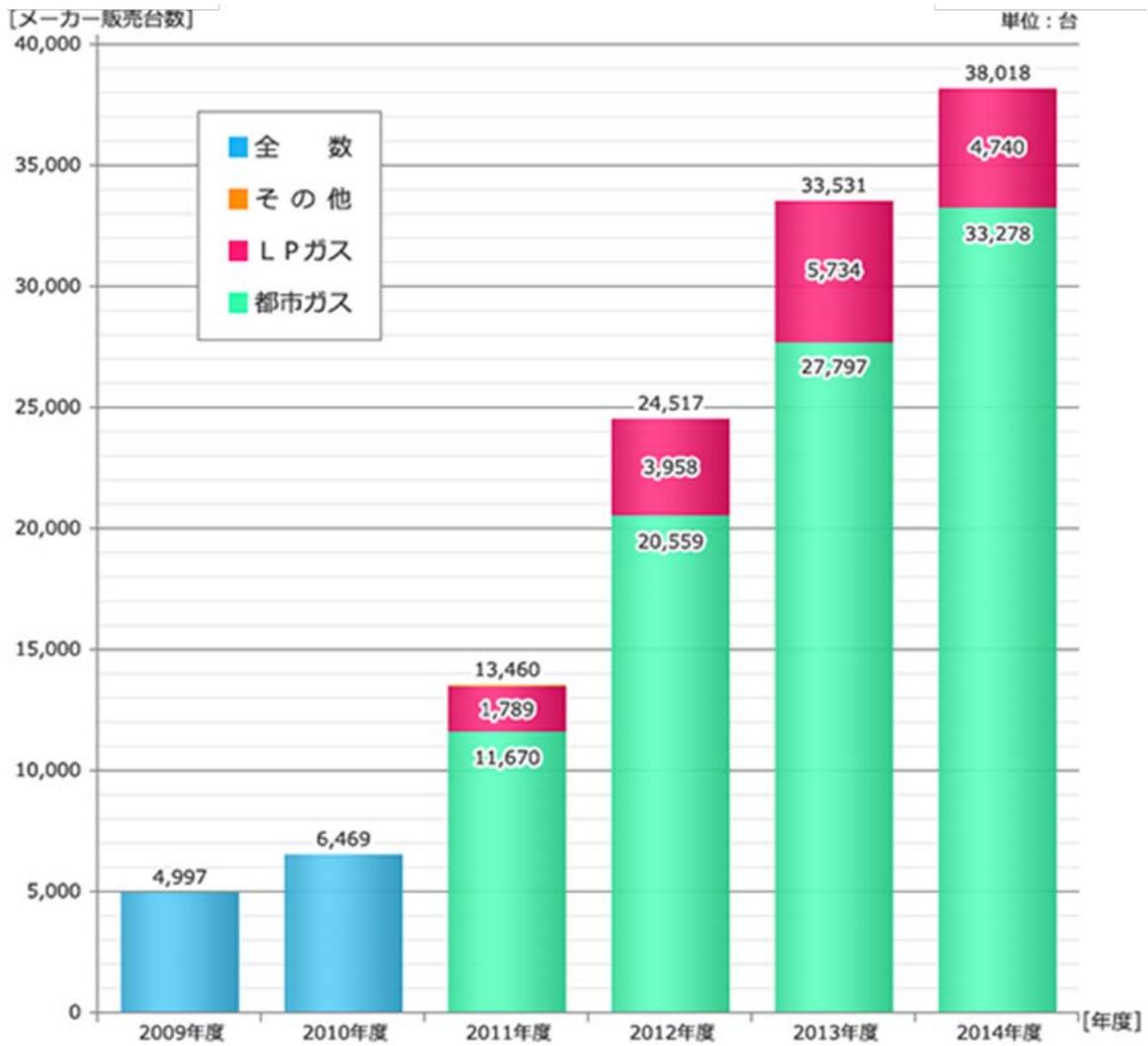


図 1-18 家庭用燃料電池システムのメーカー販売台数（単年）の推移[18]

1.2 先行研究とその課題

前節 1.1 で確認したように、家庭部門におけるエネルギー消費は居住者の生活行動と密接な関係性を持っており、この特徴が家庭部門における省エネルギー技術導入の難しさをもたらしている。家庭で消費されるエネルギーは、その家庭の生活行動の特徴を反映している。そのため、家庭の生活行動を無視して省エネルギー対策を取ると、対策による省エネルギー効果が十分に得られないだけでなく、場合によっては居住者の日常生活における自由意志を阻害する可能性を持つ。よって、家庭における省エネルギー技術の導入効果を評価するためには、エネルギー消費だけでなく、エネルギー消費を発生させる居住者の生活行動も考慮に入れることが重要となる。

このような視座に立ち、本研究では家庭における居住者の生活行動とエネルギー消費の関係性を分析し、またそこから生活行動の違いを考慮して家庭における省エネルギー技術を導入した時の効果を評価する。この節では関連する先行研究の内容と課題を取り上げる。

家庭での居住者の生活行動とエネルギー消費を分析するためには、「実消費データの分析」と「モデルによる推計」の2通りの研究アプローチが存在する。まず 1.2.1 では、実際の家庭における電力需要データの分析によって家庭の世帯属性や生活行動と電力消費の関係性を解明する先行研究を紹介する。つづいて 1.2.2 では、モデルによる居住者生活行動の再現によって家庭におけるエネルギー需要を推計する先行研究を紹介する。

家庭における省エネルギー技術として、本研究では省エネアドバイスと家庭用燃料電池に着目する。デマンドサイドマネジメントの中でも、電力利用の見える化や省エネアドバイスレポートといった省エネアドバイスによる需要制御は、家庭の省エネルギー化を主目的として居住者に経済的負担が少ない形で需要を制御するものであり、日本ではいくつかの実証実験が行われている。1.2.3 では、省エネアドバイスの実証実験に関する先行研究を紹介する。また 1.2.4 では、家庭用燃料電池をはじめとするコジェネレーションシステムの性能評価に必要となる運転シミュレーションモデルに関する先行研究を紹介する。

1.2.1 電力需要データの分析による、家庭の世帯属性・生活行動と電力消費の関係性の解明

家庭の世帯属性・生活行動と電力消費の関係性を明らかにする先行研究では、電力需要データの分析手法として主に回帰分析[19][20]・クラス分類[21]・クラスタ分析[22][23][24][25][26]が利用される。これらの研究は、主に電力需要データから類推した世帯属性・生活行動に基づいて将来の需要を予測する、あるいは家庭の特徴に合わせた情報提供（チラシ配布など）を行うことを目的としている。

電力需要データの回帰分析の研究[19][20]では主に電力需要と世帯属性との関係性を分析することに焦点を当て、あらかじめ電力需要データの特徴量抽出をしてから、特徴量と家庭の世帯属性に関する指標やダミー変数との相関を見る。例えば、Kavousian et al. [20]はアメリカの1628世帯における家庭電力需要データから特徴量として1日の平均値・最大値・最小値・最大値と最小値の差分を抽出し、これら電力需要の特徴量とその家庭の居住地・住宅構造・家族構成・保有家電・環境意識の相関分析を行なっている。Beckel et al. [21]も電力需要データからその家庭の世帯属性を明らかにすることを旨として、アイルランドの4232世帯における電力需要を分析している。この研究では、Kavousian et al. [20]などとは異なり、データ分析手法としてクラス分類の手法（k-近傍法、線形判別分析、サポートベクターマシンなど）を用いている。クラス分類は、データを数個のパターンに分類する点でクラスタ分析と似ているが、クラス分類は世帯属性が明らかになっている電力需要データを用いて事前学習を行うことでパターン分類の基準を作成する一方で、クラスタ分析はこのような事前学習を必要とせずデータ間の特徴の違いに応じて分類基準を作成する点が異なる。

一方で家庭における生活行動と電力需要の関係性を分析するためには電力需要カーブ全体の形状を分析する方がよく、そのためには事前に特徴量抽出を行う必要がないクラスタ分析が適している。クラスタ分析は特徴抽出を行うことなく電力需要カーブ全体を入力値とすることが可能で、またデータの非周期的な比較的短時間での電力需要の差異を判定するのに適しており、様々なクラスタ分析手法が電力需要データの分析のために用いられてきた。例えば、Chicco[27]は15種類のクラスタリング手法（k-平均法、ファジィ c-平均法、自己組織化マップ、階層型クラスタリングなど）を用いて、電力需要データの分析における妥当性の評価を行なっている。クラスタ分析を利用して家庭の電力需要と生活行動の関係性を解明する先行研究として、Rhodes et al. [24]はアメリカの103世帯における家庭電力需要データをクラスタ分析して、クラスタと家庭の在宅状況（週に20時間以上在宅勤務する居住者がいるかどうか）の傾向を分析した。またAbreu et al. [26]はポルトガルの15世帯における様々な季節の電力需要カーブをクラスタ分析して、各クラスタの電力需要カーブの特徴から生活行動の類推を行なった。これらの先行研究では異なる家庭における生活行動の違いに着目した分析を行っており、個々の家庭における日々の生活行動の違いに着目して電力需要データを分析する研究は例がない。

1.2.2 家庭エネルギー需要の推計モデル

家庭エネルギー需要の推計は、家庭用エネルギー技術の性能評価のための運転シミュレーション(1.2.4で後述する家庭用燃料電池の運転シミュレーションモデルもその一つである。)の入力値として利用するために、国内外において研究されてきた。近年ではスマートメーターの普及によって、実際の家庭におけるエネルギー消費を計測したデータも蓄積されつつあるが、これらの計測データは(1)多くの家庭で電力消費データのみが計測され、利用可能な給湯消費データは少ない点、(2)個人情報保護の理由で家庭の世帯属性(家族人数・家族構成など)が付随されたデータは限られている点、から今でも推計したデータの利用範囲は大きい。

家庭エネルギー需要のモデル化に際しては、居住者の行動に着目して需要を推計するというボトムアップ型の手法[28]が多く取られてきた。近年ではコンピュータシミュレーション技術が向上したことにより、生活時間調査(time use survey)から居住者の生活行動を仮想的に再現し、それに基づいて時間帯ごとの照明・空調・家電製品・給湯などの使用状況を特定、エネルギー需要を推計する研究[29][30][31][32][33][34]がなされている。生活時間調査とは主に生活行動の実態把握を目的として、1日24時間を一定の時間間隔で分割して、各時間帯にしていた行動をアンケート形式で調査するものである。先行研究のモデルをさらに発展させるためには、既存の生活時間調査では明らかにならない家庭における生活行動の詳細な実態を把握することが重要であり、以下の2点が課題として挙げられる。

(1) 家族構成員間の生活行動の関連性

これらの研究では、個人別に再現された生活行動を足し合わせることで家族全体の生活行動を再現する手法が取られる。ここでは、「家族一緒に食事をとる」や「順番にお風呂に入る」というような、家族の構成員の間で生じる生活行動の関連性をいかに考慮するかが重要である。これまでの研究では、家族構成員間の生活行動の関連性は「同時に複数人が入浴をしない」などの条件を当てはめるにとどまり、家族構成員間の生活行動の関連性の実態を調査してエネルギー需要の推計に反映するような研究は行われていない。

家族構成員間の生活行動の関連性は、ライフステージの進行(子供の成長や勤め人の退職など)によって変化することが知られていて、例えば同じ子持ち世帯でも子供が未就学児の場合と高校生の場合とでは家族の生活リズムの関連性は異なってくる[35]。日本の核家族世帯におけるライフステージの進行による生活リズムの変化を図1-19に示す。そのため、例え同じ子持ち夫婦(夫婦+子)の家庭であったとしても、子供の成長段階に応じて家族全体の生活リズムは異なるので、生活行動によって発生するエネルギー需要も異なってくるのが推察される。

(2) 生活行動と対応する個々の家電製品・給湯の使用状況

国内における家庭エネルギー需要のボトムアップ推計に関する研究[32][33][34]では、生活時間の入力データとしてNHK放送文化研究所の「国民生活時間調査」[36]を用いている。しかしながら、国民生活時間調査では炊事・掃除・洗濯が1つの行動分類として集計されているが、エネルギー消費の観点から見るとこれらの行動の違いは大きい。さらに炊事1つをとっても使用される家電製品の種類は多様で消費電力に幅があるが、国民生活時間調査はあくまで生活行動ベースの調査であり個々の家電製品の使用

状況に関しては不明である。このように、国民生活時間調査は生活行動に対応する家電製品・給湯の使用状況が不明であるので、エネルギー需要推計に適したデータとは必ずしもいえない。先行研究では、「炊事をしている時間帯に 20 %の確率で電子レンジが使用される」というような仮定をすることによって、生活行動と家電製品・給湯の使用状況の対応付けをしている。

以上の課題を解決するためには、独自のアンケート調査を実施して、家庭における生活行動の詳細な実態を把握する必要がある。本研究で実施した生活行動に関するアンケート調査の内容については 4.2 で詳述するが、調査を実施するにあたって重要となるのが生活行動を質問する時間間隔をどのように設定するかである。設定する時間間隔が長すぎると生活行動の細かな変化を把握することが困難になり、一方で間隔が短すぎると回答者の負担が増大してアンケートの回収率低下が懸念される。そこで、時間間隔を設定するために既存の生活時間調査を参考にするとし、日本国内を対象として行われている生活時間調査を表 1-4 にまとめる。国内の生活時間調査のなかで有名なものが、先述した NHK 放送文化研究所の国民生活時間調査と、総務省統計局が実施している「社会生活基本調査」[37]である。いずれの調査も日本人の生活行動実態の把握を目的としていて、10 歳以上の男女を対象として調査を行っている。それぞれの調査内容については、国民生活時間調査は行動類型が細かく設定されている一方、社会生活基本調査は各時間帯において一緒にいた人を質問する点が特徴である。対象者属性を絞った調査としては、ベネッセ教育総合研究所の「放課後の生活時間調査」[38]が挙げられる。この調査は、名称からも推察されるように、子供の生活行動実態の把握のために行われるものであり、遊び・部活動・習い事など子供がよく行う行動類型が細かく設定されている。特定の行動に着目した調査としては、総務省情報通信政策研究所の「情報通信メディアの利用時間と情報行動に関する調査」[39]やビデオリサーチの「個人視聴率調査」[40]があり、テレビ・インターネット・新聞などのメディア接触を行う時間を質問している。それぞれの調査の時間間隔設定は、個人視聴率調査が 5 分間隔、それ以外の調査が 15 分間隔で生活行動を質問することとなっている。時間間隔の短い個人視聴率調査に着目すると、この調査は主にマーケティングデータの収集を目的としており、300 世帯の家族構成員のうち 4 歳以上を対象として 5 分間隔の各時間帯においてテレビを視聴していたかどうかを質問する。視聴率データはテレビ局や広告会社が広告取引をする際に、各番組の広告効果を測るための指標となっている。テレビ CM は非常に高価であることから、細かい時間間隔で各局番組視聴者の割合や属性を把握することが求められている。一方で本研究は家庭エネルギー需要の推計を目的としており、テレビを例に取れば視聴率調査のような詳細な情報ではなく単純に「テレビを視聴しているかどうか」を把握することが求められる。このような研究目的を達成するためには、多くの既存調査と同様、時間間隔を 15 分に設定することが妥当と考えられる。

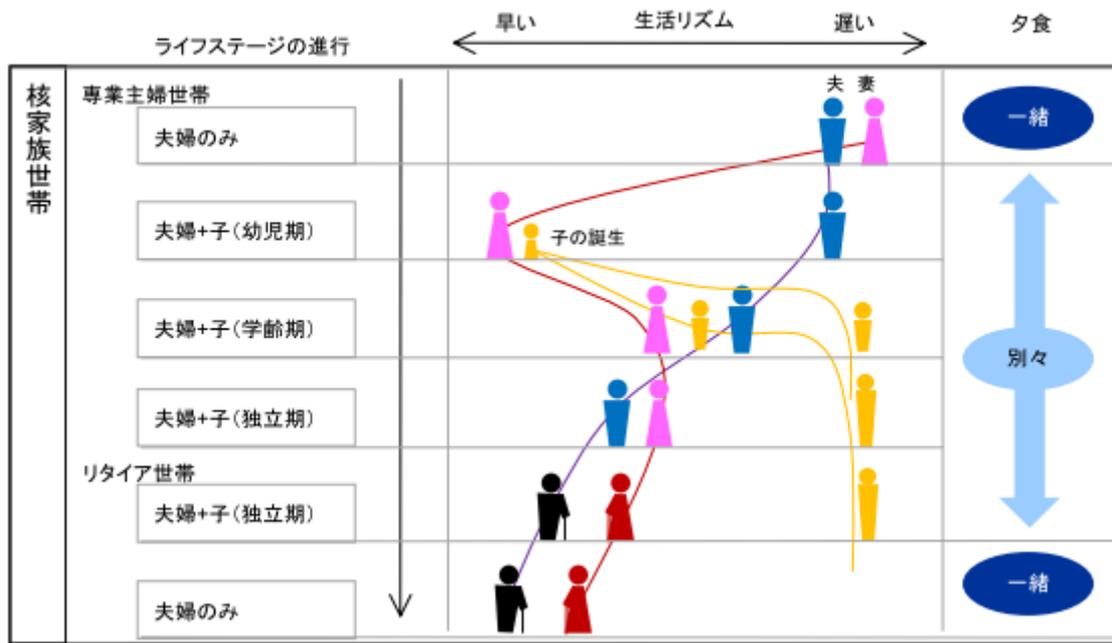


図 1-19 日本家庭におけるライフステージの進行による生活リズムの変化[35]

表 1-4 日本の生活時間調査

調査名	国民生活時間調査[36]	社会生活基本調査[37]	放課後の生活時間調査[38]	情報通信メディアの利用時間と情報行動に関する調査[39]	個人視聴率調査[40]
調査主体	NHK 放送文化研究所	総務省統計局	ベネッセ教育総合研究所	総務省情報通信政策研究所	ビデオリサーチ
調査目的	生活実態の把握	生活実態の把握	生活実態の把握	メディア利用実態の把握	マーケティングデータの収集
対象者属性	10 歳以上	10 歳以上	小学 5 年～高校 3 年	13 歳～69 歳	4 歳以上
対象者数	7200 人	約 20 万人	8100 人	1500 人	300 世帯の家族構成員
調査内容	生活行動全般在宅状況	生活行動全般一緒にいた人	生活行動全般	テレビ・インターネット等の利用	テレビの視聴
時間間隔	15 分	15 分	15 分	15 分	5 分

1.2.3 省エネアドバイザーの実証実験

国内での省エネアドバイザーの実証実験に関する先行研究として、向井らによる千葉県船橋市にある高圧一括受電マンションでの実証研究[41][42]や、京都府・関西文化学術研究都市（けいはんな学研都市）の「けいはんなエコシティ」での実証実験[43][44]が挙げられる。

向井らの研究では電力需要を制御する方策として、デマンドレスポンスと省エネアドバイザーの 2 種類を検討している。デマンドレスポンスとして、電力使用量が多くなるほど電力料金が上昇する料金体系を検討している。この料金体系では 30 分ごとの電力使用量別に 3 段階の電力料金単価が設定されており、(1)30 分の電力使用量が 200Wh 以下で約 0.024 円/Wh, (2)200~750kWh で約 0.029 円/Wh, (3)750Wh 以上で約 0.040 円/kWh として電気代を課金する仕組みとなっている。例えば、19:30~20:00 の 30 分間の電力使用量が 210Wh の場合、30 分間の電力料金は $200\text{Wh} \times \text{約 } 0.024 \text{ 円/Wh} + 10\text{Wh} \times \text{約 } 0.029 \text{ 円/Wh} = \text{約 } 5.09 \text{ 円}$ となる。省エネアドバイザーとして、宅内ディスプレイによる見える化システム・省エネアドバイザーレポート・省エネアラートを検討している。このうち省エネアドバイザーレポートにおいては、それぞれの家庭の電力需要に関する情報と省エネ対策の情報を順番に提示していくのが特色となっている。この研究では、順番に提示される情報を「ストーリー」と呼んでおり、ストーリーの一例を図 1-20 に示す。この例では、ストーリーの 1 番目に東京電力管内で電力需要がピークに達する時間帯（ピーク時間帯）を示す。つづいてストーリーの 2 番目に各家庭における過去 1 週間平均の電力需要カーブを示し、3 番目にピーク時間帯の電力需要を自分の家庭・平均的な家庭・省エネ型の家庭で比較する。最後に 4 番目に省エネルギーに向けたアドバイスを示す。省エネアドバイザーレポートで提示されるストーリーは数種類のバリエーションが用意され、前週の電力料金やピーク時間帯の電力消費量などを指標として条件分けして、省エネ効果が最も高いと予想されるストーリーを提示する[45]。

「けいはんなエコシティ」での実証実験でも電力需要を制御する方策として、デマンドレスポンスと省エネアドバイザーの 2 種類を検討している。デマンドレスポンスとしては、1.1.3.1 で挙げた「時間帯別料金（Time of Use ; TOU）」や「ピーク時料金（Critical Peak Pricing ; CPP）」の枠組みに基づく料金制度を検討している。省エネアドバイザーとして、タブレット端末による見える化システムと省エネコンサルを検討している。この実証実験で行われた「省エネコンサル」では、家庭ごとに省エネアドバイザーレポートを作成し、関西電力のスタッフを中心とする省エネアドバイザーが家庭に直接訪問して省エネルギーや節電の具体的な取り組みについてレポートをもとにアドバイスした。レポートでは各家庭の電力需要カーブの特徴を動物に例え 7 タイプに分類することで、楽しみながら電気の使われ方の特徴が理解できるように工夫がなされている。レポートの一例を図 1-21 に示す。この例では、各家庭における 8 月平日平均の電力需要カーブの特徴に基づいて、各世帯の分類を行っている。例えば、小まめに活動して省エネルギーである最も節約上手な家庭を「リス」、家族が多くベースの使用量が多い家庭を「ゾウ」、夜型生活の家庭を「フクロウ」、電力需要のピークが朝と昼の 2 つある家庭を「ラクダ」というように、電力使用状況と動物のイメージが対応づくように配慮されている。

以上のように、デマンドレスポンスや省エネアドバイザーに関する実証実験では、電力需要制御のための複数の手法を複合的に用いて実証が行われており、省エネアドバイザーレポート単独などというように

個々の手法に限定した省エネルギー効果の評価は十分には行われていない。また、これまでの省エネアドバイスでは1週間や1カ月平均での電力需要の特徴を他世帯と比較した結果に基づいてアドバイスがなされており、日々の生活行動の違いを考慮したアドバイスの提供はなされていない。これは、1.2.1で指摘したように、個々の家庭における日々の生活行動の違いに着目して電力需要データを分析する研究例がないことが起因していると考えられる。

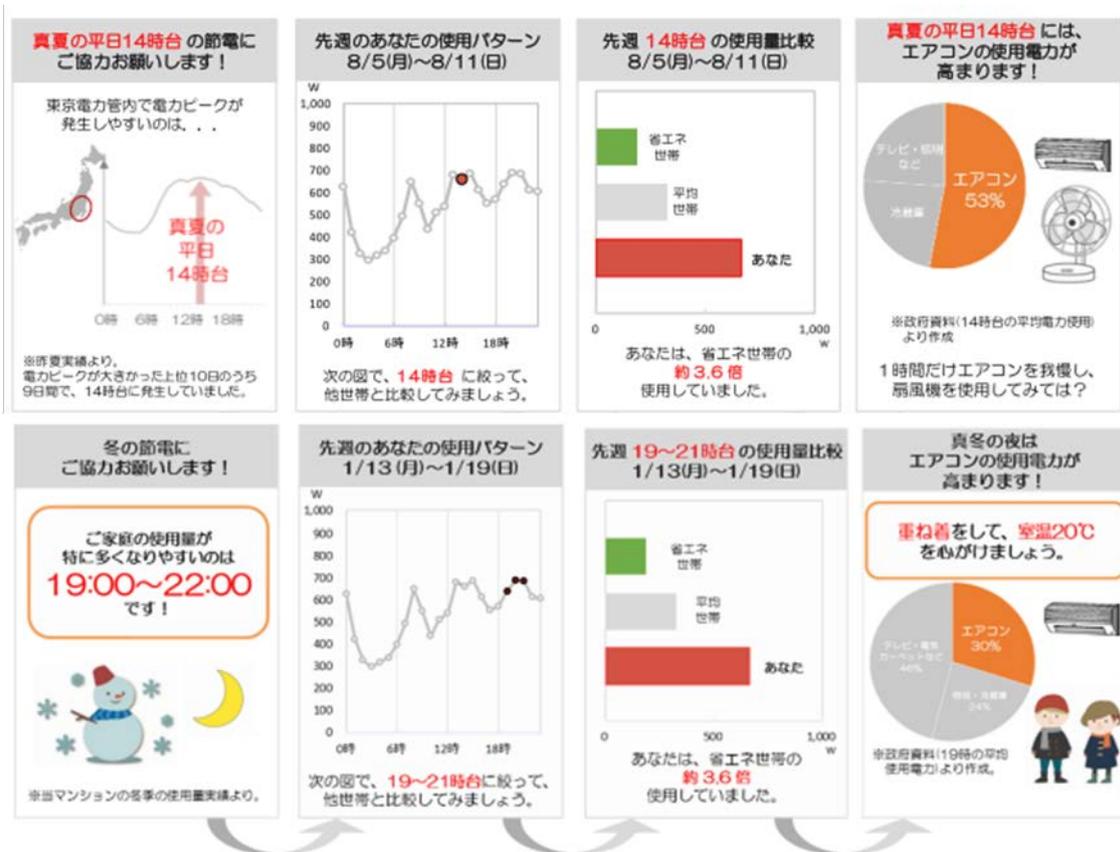


図 1-20 省エネアドバイスレポートにおけるストーリーの一例（上側：夏，下側：冬） [41][42]



あなたはリスさんタイプです。

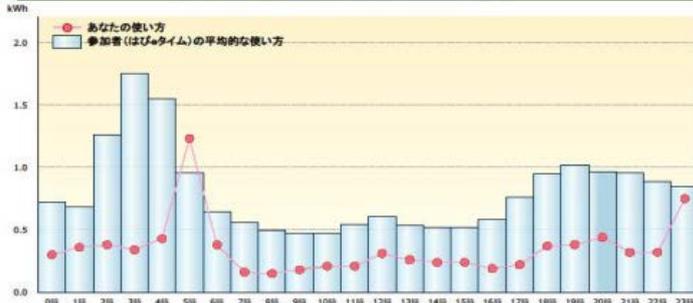
リスさんタイプのあなたは、ちょこちょこ小まめに活動的！？省エネだってセッセと実行。とても省エネが上手なタイプです。

- お客さま番号.....
- ご契約種別.....
- 2012年8月1日～31日のご使用量... 247kWh ※
- ご家族数..... 3名
- 住居形態..... 戸建住宅



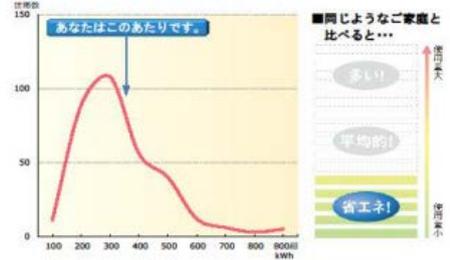
※2012年8月分の「はぴねる」や「電気ご使用量の節約」のご使用開始日は一致いたしません。

1日の電気の使い方(2012年8月1日～31日の平日平均)



ご使用量の比較(2012年8月1日～31日の平日)

- 2012年8月1日～31日の平日のご使用量は167kWhでした。
- 参加327世帯中、多いほうから270番目でした。



あなたへの省エネアドバイス

省エネにご協力いただき、ありがとうございます。これからも、環境に優しいご利用を続けてください！

■ “すだれ”や“よしず”などで窓からの日差しを和らげると省エネになります。グリーンカーテンも効果的です。

■ 冷蔵庫にはあまり物を詰め込みすぎないようにしましょう。熱いものは冷まして入れると庫内温度が上がらず省エネになります。

■ エアコンの控え過ぎによる熱中症などにご注意いただき、無理のない範囲で引き続き省エネにご協力をお願いいたします。

省エネまめ知識

- 給湯機の沸き上げモードは、各メーカーが推奨する省エネモードを使用することで省エネになります。
- 材質・形状・大きさなどIHクッキングヒーターに適した鍋を使用することで、さらに効率が高まり省エネになります。
- 電子レンジを使用する前に調理する食材の大きさや厚さをそろえることも、加熱ムラをなくするためには重要です。

図 1-21 省エネアドバイスレポートの一例[46]

1.2.4 コジェネレーションシステムの運転モデル

1.2.2 での議論に従って生活行動を 15 分間隔で調査すると仮定した場合、そこから推計される家庭エネルギー需要も同様に 15 分間隔のデータとなる。つづいては、この推計した家庭エネルギー需要を入力値とする、分散型エネルギー技術の運転シミュレーションについて検討していきたい。分散型エネルギー技術の例として、太陽光発電や太陽熱利用などの再生可能エネルギーがある。再生可能エネルギー導入時の課題として挙げられるのが「負荷周波数制御 (Load Frequency Control ; LFC)」であり、気象条件 (日射量, 風速など) の変動によって生じる数分~20 分周期での出力変動に対する調整能力をいかに確保するかである。本研究で推計する家庭エネルギー需要を 15 分間隔とした場合、この推計値をそのまま用いて負荷周波数制御を考慮するのは困難であり、推計した電力需要に対して変動成分を重ねあわせるといった工夫が必要と考えられる。そこで、本研究では推計した家庭エネルギー需要の利用に適している家庭用燃料電池システムに着目する。

燃料電池を始めとするコジェネレーションシステム (cogeneration system ; CGS) は電力・熱の 2 通りのエネルギーを同時に取り出すことが可能で、発電効率と熱回収効率を合算した総合エネルギー効率の高さから注目されている。CGS の運転は電力・給湯需要の量やタイミングに大きく影響されるため、効率的な CGS 運転を目的とする運転計画やシステム設計に関して多くの研究がなされている。運転計画に関して、伊東ら[47]や Ozawa and Yoshida[48]が混合整数計画法によってそれぞれガスタービンと家庭用燃料電池の CGS 最適運転計画モデルを提案し、小原・工藤[49]は燃料電池 CGS の運転計画を遺伝的アルゴリズムによる非線形モデルで解析している。システム設計に関して、岩田・森[50]は電力託送・熱輸送を考慮したときの CGS の最適規模・運転計画を求め、林ら[51]は燃料電池 CGS 導入時のステークホルダー (燃料電池の導入世帯・電力会社・ガス会社・その他の国民) の利害調整手段として電力託送料金や電気自動車カーシェアリングの導入を検討している。

家庭用燃料電池システムの運転の特徴を確認するために、Ozawa and Yoshida[48]で開発されたモデルに基づいた家庭用燃料電池システムによる電力需給のシミュレーション結果を図 1-22 に示す。標準的な家庭では、冷蔵庫など常時使用される家電製品があるために電力需要は終日発生し、特に家庭内での生活行動が活発になる朝と夜に多くの電力需要が生じる。対照的に、給湯需要は特定の時間帯に集中的に発生する。これは標準的な家庭では特定の行動をしている時間帯のみ給湯需要が発生するためであり、湯はりや入浴をする夕方から夜にかけて多くの給湯需要が発生し、炊事や洗顔をする朝や昼にも相対的に小さい需要が生じる。睡眠・食事・入浴などの行動時間は日によって多少変化することが考えられるが、生活行動の大まかなリズムは平日・休日によって変わらない。このような電力・給湯需要に対して、燃料電池は家庭の電力・ガス料金が最小となるように運転される。日中 (9 時~21 時) にかけて、家庭用燃料電池による発電出力 (図中の青色の部分) は電力需要と一致するように変動しており、燃料電池は負荷追従運転となっている。一方で夜間 (21 時~9 時) にかけて、燃料電池の発電出力は最小出力となる。日中にかけて稼働率が上昇するのは、夕方から夜にかけての給湯需要に向けて、効率的に貯湯するためである。大きな給湯需要が発生する時間帯を過ぎると、貯湯槽はいったん空になり、また翌日の給湯需要に向けて貯湯をし始める。このように家庭用燃料電池システムは、生活行動と同じ 1 日周期で電力・給湯需要が賄えるように貯湯槽容量などの設計最適化がなされるとともに、生活行動のリズムに応

じて変化する電力・給湯需要に対して出力を上げ下げすることで供給を達成する。そのため、燃料電池を効率的に利用するためには、1日の電力・給湯需要スケジュール（電力・給湯需要の発生するタイミングや量）を先読みして、将来の需要に合わせて事前に出力を変動させる必要がある。

これらの研究において、電力・給湯需要スケジュールは確定的とされているが、実際の家庭における時々刻々のエネルギー需要は日々の生活行動のばらつきによって不確実性を有する（以降、「需要の不確実性」と呼ぶ）。そのため、電力・給湯需要を予測しながら最適な CGS 運転計画を決定しなければならない。需要の不確実性を考慮した CGS の最適運転モデルは確率動的計画法によって再現可能で、これまでの研究では倉石ら[52]や田中・福島[53]が稼働・停止の2通りの状態の組み合わせとして CGS 運転計画を表現している。しかしながら、近年の家庭用燃料電池システムは24時間停止することなく運転できるように設計の最適化がなされている。24時間運転方式へと設計の最適化がなされた理由として、2つの要因を挙げるができる。第一の理由は「燃料電池の発電効率の向上」であり、実用レベルでのPEFCの発電効率が向上し、またPEFCよりも発電効率の高いSOFCが商業ベースに乗ったことによって、燃料電池を長時間運転しても給湯供給が余ることが少なくなったことが挙げられる。第二の理由は「セルの再加熱によるガス消費の回避」であり、従来では燃料電池を一旦停止するとセルは自然冷却し、再起動した際に運転温度まで再加熱が必要であったところを、24時間運転によってセル再加熱に必要な余計なガス消費を避けることができる点が挙げられる。このような24時間運転型の家庭用燃料電池システムについて、需要の不確実性を考慮した運転計画モデルは開発されていない。

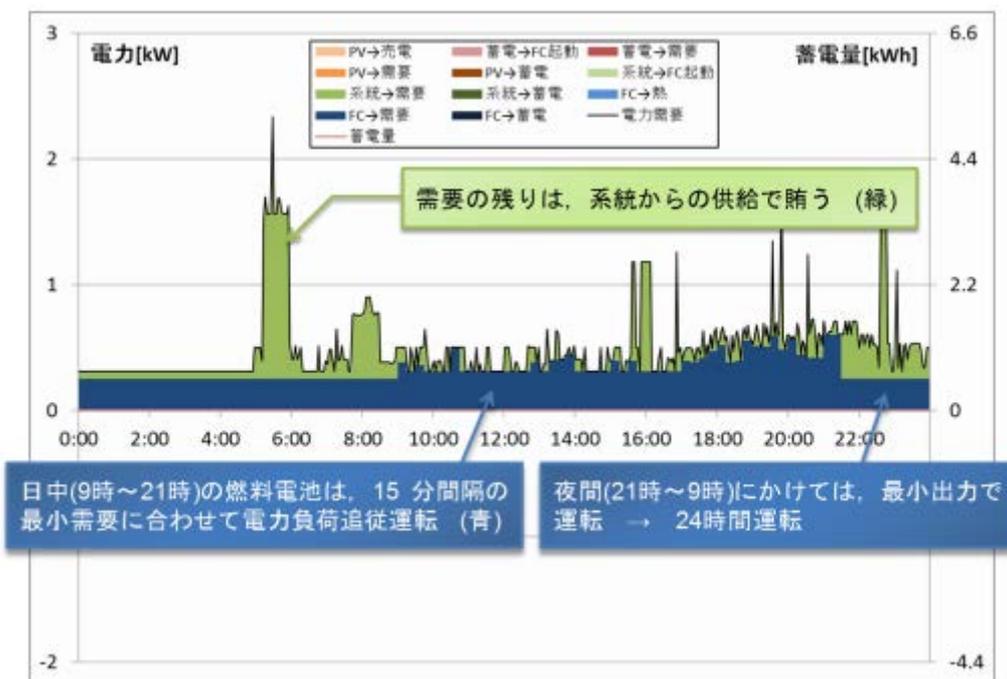


図 1-22 家庭用燃料電池システムによる電力需給のシミュレーション結果[54]

1.2.5 先行研究課題の総括

以上の先行研究における課題について、「居住者の生活行動とエネルギー消費の関係性の分析」と「生活行動の違いを考慮した家庭における省エネルギー技術評価」の2点から整理する。

まずは、生活行動とエネルギー消費の分析に関する先行研究の課題を整理する。実消費データを用いた分析では、個々の家庭における日々の生活行動の違いに着目して電力需要データを分析する研究は例がない。またモデルによる推計では、家族構成員間の生活行動の関連性や個々の家電製品・給湯の使用状況といった生活行動の実態を考慮した形で家庭エネルギー需要を推計する研究は行われてこなかった。

これらの生活行動とエネルギー消費の分析に関する研究課題に関連して、生活行動の違いを考慮した家庭における省エネルギー技術評価に関する先行研究にも課題が存在する。省エネアドバイスレポートの実証に関する先行研究では、1週間や1カ月平均での電力需要の特徴に基づくアドバイス提供がなされており、日々の生活行動の違いを考慮したアドバイスの提供はなされていない。これは個々の家庭における日々の生活行動の違いに着目して電力需要データを分析する研究例がないことが起因していると考えられる。またコジェネレーションシステムの性能評価のための運転モデルに関する先行研究では、24時間運転型の家庭用燃料電池システムを対象とした日々の生活行動の違いによる需要の不確実性を考慮した運転計画モデルは開発されていない。また運転シミュレーションの際の家庭エネルギー需要はモデルによる推計値を用いるが、エネルギー需要の推計モデルに関する先行研究ではライフステージごとの生活リズムの違いによるエネルギー需要への影響は十分に考慮されてこなかったため、子供の成長といったライフステージの進行が省エネルギー技術の性能に与える影響を評価できていない。

1.3 研究目的と論文の構成

本研究では、家庭における居住者の生活行動とエネルギー消費の関係性を分析し、また家庭の生活行動の違いを考慮したうえで、家庭における省エネルギー技術の導入効果を評価することによって、家庭部門における居住者負担の少ない形での効果的な省エネルギー化に寄与することを目指す。家庭における省エネルギー技術とは、具体的には 1.1.3 で挙げたように「デマンドサイドマネジメント」(省エネ)と「分散型エネルギー」(創エネ)に着目する。

第一に、個々の家庭における日々の生活行動の違いに着目した形でのデマンドサイドマネジメント手法を提案する。家庭における生活行動パターンと電力需要の関係性を電力需要データの分析によって明らかにし、さらに家庭に対してこの生活行動と電力需要に関する情報をフィードバックすることによる電力需要削減効果を検証する。第二に、より長期的な生活行動の変化、具体的にはライフステージの進行による生活リズムの変化が、家庭用分散型エネルギー技術の運転性能に与える影響を明らかにする。まず、家庭における生活行動の実態調査から様々な家族構成・生活様式における家庭エネルギー需要を推計し、さらに 24 時間運転型の家庭用燃料電池システムに着目して日々の生活行動の違いによる需要の不確実性を考慮した運転シミュレーションによって燃料電池導入の経済性・環境性を評価する。

本研究の構成を図 1-23 に示す。第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的および先行研究と本研究の位置づけについて述べる。

第 2 章から第 5 章にかけてが本論である。研究目的としては、第 2 章・第 3 章がデマンドサイドマネジメントの一種である省エネアドバイス活用の評価にむけた研究であり、第 4 章・第 5 章が分散型エネルギーの例として家庭用燃料電池システムの性能評価に向けた研究である。また研究内容としては、第 2 章・第 4 章が家庭における生活行動とエネルギー消費の分析に関する研究であり、第 3 章・第 5 章が第 2 章・第 4 章の知見に基づく、家庭の生活行動の違いを考慮した省エネルギー技術評価に関する研究である。

第 2 章にて、省エネルギーアドバイスを目的とした家庭電力需要データの分析について述べる。この分析では、個々の家庭において日々の生活行動の違うことによって生じる電力需要カーブの変化に着目する。電力需要カーブのクラスタ分析によって「普段の生活をしたときの電力需要カーブのパターン」と「それ以外のときの電力需要パターン」を分類・比較する手法を開発した。開発したデータ分析手法を用いて、家庭における生活行動パターンと電力需要量の関係について調べる。

第 3 章にて、データ分析に基づいて作成した省エネアドバイスレポートの実証実験について述べる。第 2 章で紹介した手法を用いた「普段の生活の日」と「電力需要量が多い日」の電力需要比較によって、日々の生活行動パターンと電力消費の関係性から省エネアドバイスを提案する省エネアドバイスレポートを作成・送付し、レポートによる電力需要削減効果を検証する。

第 4 章にて、アンケート調査に基づく家庭エネルギー需要の推計モデルについて述べる。先行研究では考慮されてこなかった「家族構成員間の生活行動の関連性」・「生活行動と対応する個々の家電製品・給湯の使用状況」の実態を把握するために、家庭における生活行動と家電製品・給湯の仕様に関するアンケート調査を実施する。そして、アンケート調査結果に基づいて家庭における時々刻々の電力・給湯

需要を推計するモデルを開発し、様々な家族構成・生活様式の家庭における電力・給湯需要スケジュールを季節別に推計する。

第5章にて、新たに開発した家庭用燃料電池システムの最適運転シミュレーションモデルによる家庭用燃料電池システムの性能評価について述べる。このモデルの特徴は、生活行動のばらつきによって生じる家庭エネルギー需要の不確実性を考慮して、電力・給湯需要を予測しながら24時間運転型の燃料電池について最適な運転計画を探索する点である。第4章で推計したエネルギー需要を用いてPEFC・SOFCの運転シミュレーションを行ない、様々な家族構成の家庭に対して燃料電池システムを導入した時の経済性・環境性を評価した。またライフステージの進行によって生活リズムが変わることによる燃料電池運転性能の変化を評価する。

第6章にて、本研究の結論と今後の課題について述べる

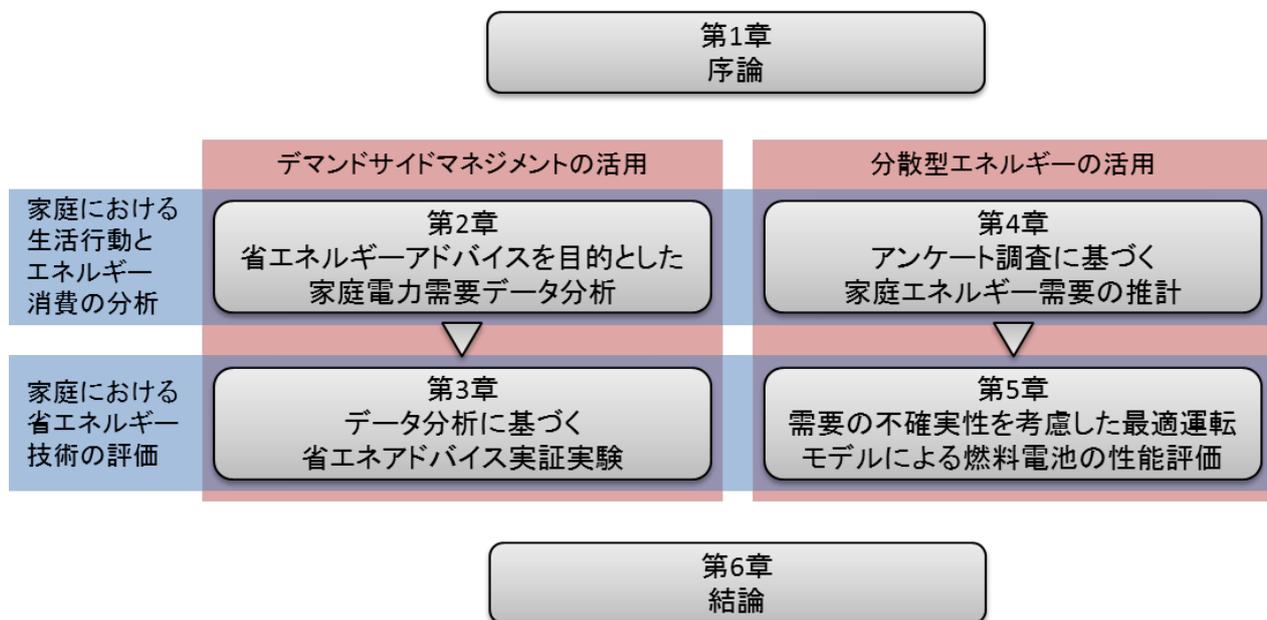


図 1-23 本研究の構成

第2章 省エネルギーアドバイスを目的とした家庭電力需要データ分析

2.1 概要

第2章では、省エネルギーアドバイスを目的とした家庭電力需要データの分析について述べる。本研究では、家庭に対して省エネルギーアドバイスを提供するために、その家庭において日々の生活行動が変化することによる電力需要カーブの違いに着目する。ここで電力需要カーブとは、1日を一定の時間間隔に分割し、分割された各時間において消費される電力需要の値を時系列データとしたものを指す。

たとえ同じ家庭の電力需要であっても、生活行動のパターンがその日その日で異なることによって電力需要カーブの形状には違いが生じる。この生活行動パターンの違いとは、例えば平日と休日の生活行動の違いで発生するものや、「週に2回は掃除をする」といった特定の行動に伴って生じるものなどが想定される。そのため、日々の電力需要カーブの差異は完全なランダムではなく、その日の生活行動によって数種類のパターンに分類することができる。もし電力需要カーブの分析によって類推される生活行動のパターンとそのときの電力需要に関係性があることすれば、この関係性に基づいて「どのような生活行動パターンの日が電力を使用する量が多いのか、あるいは少ないのか」という情報を家庭の居住者に提供することによって、省エネルギー化に向けた気づきを促すきっかけを与えることができると考えられる。

このような観点から、それぞれの家庭における日々の電力需要カーブを数パターンに分類し、ここから類推される生活行動パターンと電力需要の関係性を調べる。具体的な手法としては、それぞれの家庭の電力需要カーブ1か月分をクラスタ分析によって数パターンの電力需要カーブに分類する。そして、電力需要カーブのパターンの中で最も日数の多いものを「その家庭が1ヶ月間で最も普段の生活をしたときに発生する電力需要カーブのパターン」として「標準電力需要パターン」と名付ける。クラスタ分類を分析対象となる全ての家庭について各月について実施し、それぞれの世帯における1月から12月まで月ごとの標準電力需要パターンを抽出する。

クラスタ分析の際には、様々な分類アルゴリズムやパターンの数を検討し、クラスタ分析の妥当性を評価する指標に基づいて最適とされるアルゴリズム・パターン数を採用する。そして、採用されたクラスタ分析の結果に基づく標準電力需要パターンとそれ以外の電力需要パターンについて、日数の割合・1日の電力需要量・休日の割合の比較を行う。

第2章の構成について述べる。2.1（本節）では第2章の概要について述べる。2.2・2.3では家庭電力需要データ分析の手法について述べる。2.4では分析結果とその考察について述べる。2.2～2.4の詳細な内容について、分析の手順の概要とともに説明する。分析の手順の概要を図2-1に示す。まず、スマートメーターによって計測した家庭の電力需要データを取得し、この需要データから1日ごとの電力需要カーブを生成する。2.2では、電力需要データの取得、需要データから需要カーブの生成方法、分析対象日・世帯の選定方法について述べる。つづいて、個々の家庭における1か月間の電力需要カーブをクラスタ分析によって数パターンに分類し、その家庭の1か月間における標準電力需要パターンを抽出する。2.3では、検討したクラスタ分析手法、クラスタ分析の妥当性評価方法、標準電力需要パターンの抽出方

法について述べる。分析対象となる全家庭について各月の標準電力需要パターンを抽出し、各月の標準電力需要パターンとそれ以外のパターンの比較を行う。2.4では、比較結果と結果に対する考察を述べる。

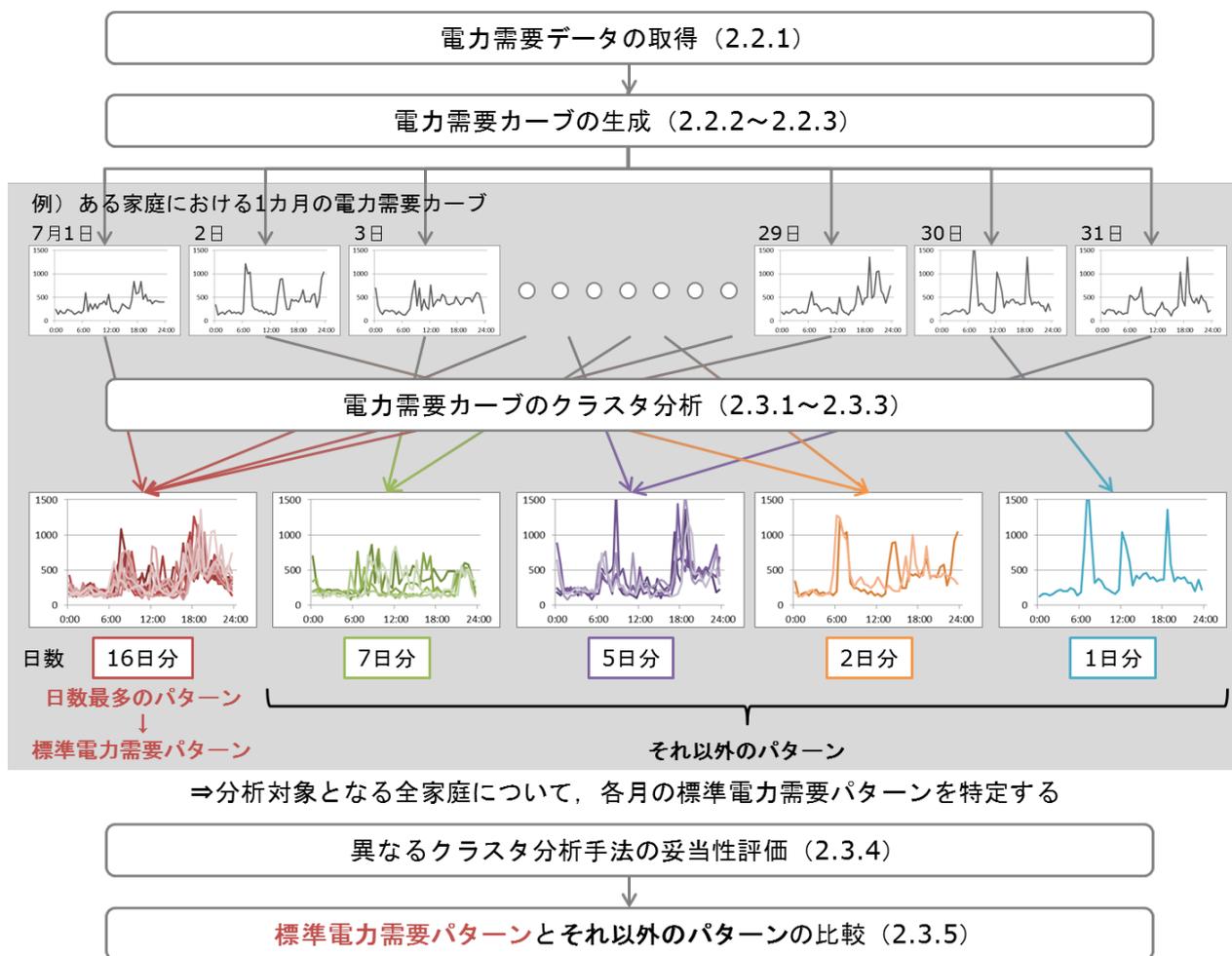


図 2-1 電力需要カーブの分析手順

2.2 家庭電力需要カーブの生成

2.2.1 家庭電力需要データの取得

まず、取得した家庭電力需要データの特徴を述べる。データの特徴を表 2-1 に示す。

本研究では、スマートメーターによって計測された戸建住宅 1070 世帯における 2013 年 10 月 1 日～2014 年 9 月 30 日にかけての家庭電力需要データを取得した。データの種類は、1 分間隔の電力需要量（積算値）を配電盤の回路別に 10 Wh 刻みで計測したものである。データ取得元であるスマートメーターは、国内の戸建住宅メーカーが自社で運営している HEMS（Home Energy Management System）サービスの加入世帯に対して取り付けたもので、本研究ではこの住宅メーカーから個人が特定されない範囲内でデータの提供を得た。この住宅メーカーが建設するのは戸建住宅であるため、データ元の家庭の住宅の建て方はすべて戸建住宅となっている。住宅の築年数は不明であるが、この住宅メーカーに対するヒアリングによる「HEMS サービスの営業としては、主に住宅の設計段階において家主に対して導入を提案するのがメインである」との情報から、データ取得した 1070 世帯の多くは HEMS サービスが本格導入され始めた 2011 年以降に建設された住宅であると考えられる。

データを取得した 1070 世帯の世帯属性を確認する。同居している家族の人数は平均 2.96 人/世帯で、平成 22 年国勢調査[55]の戸建住宅に住む世帯の平均家族人数（2.85 人/世帯）と近い。居住地の構成を図 2-2 に示す。分析対象世帯は全国に広く分布していることが分かる。平成 22 年国勢調査で調査した全世界帯の地域分布と比較すると、分析対象世帯は中日本の関東・甲信・東海地方に居住する世帯が相対的に多く、一方で本州の南北に位置する東北地方や関西・中国地方に居住する世帯が相対的に少ない傾向が見られる。

表 2-1 取得した家庭電力需要データ

データ	電力需要量（積算値）[Wh]
計測間隔	1 分間隔
期間	1 年間（2013 年 10 月 1 日～2014 年 9 月 30 日）
世帯数	全国 1070 世帯

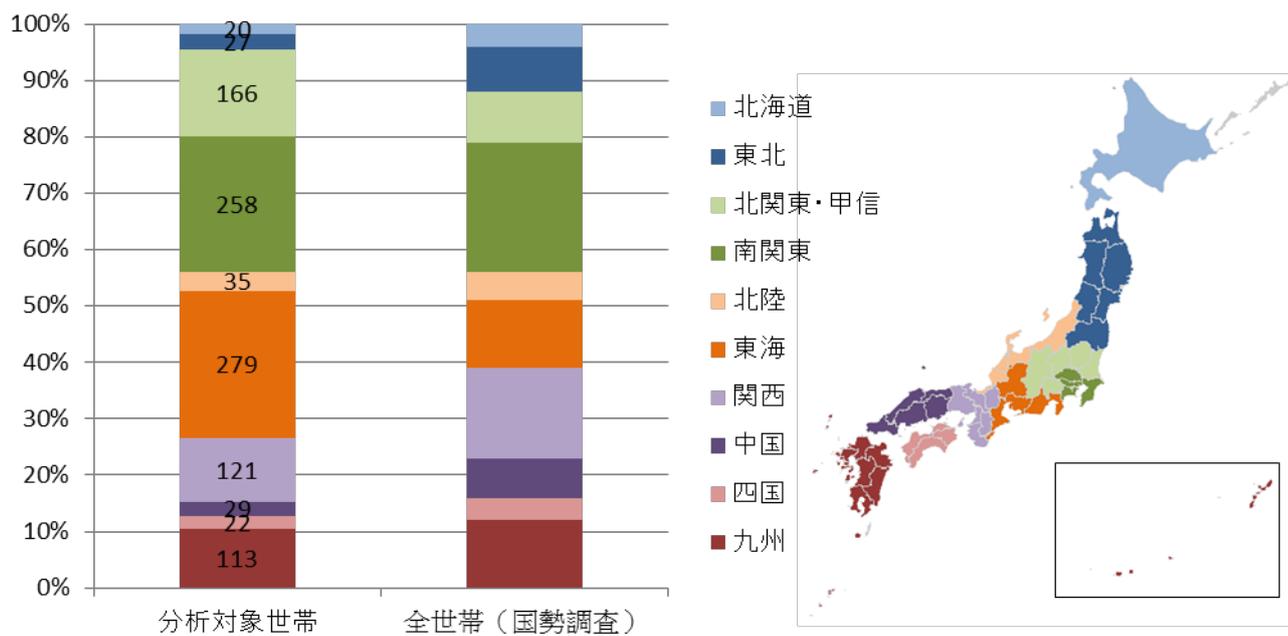


図 2-2 居住地の構成

2.2.2 需要カーブの生成

つづいて、取得した家庭電力需要データから、分析するための電力需要カーブを生成する方法について述べる。

前述のとおり、取得したデータは、1分間隔の電力需要量（積算値）を配電盤の回路別に10 Wh刻みで計測したものである。まずは、回路別の電力需要カーブの形状を確認し、深夜に矩形の大きな電力需要を発生する回路を特定し、その回路のデータを除外する。これらの回路には割安な深夜電力を活用するために自動的に運転される機器（電気温水器や蓄熱暖房など）が接続されていると推察され、生活行動のタイミングによらない電力需要である。「電力需要カーブの分析によって生活行動パターンと電力需要の関係性を調べる」という本研究の目的においては、生活行動のタイミングによらない電力需要はノイズとなるため、分析対象から除く。

残る回路での電力需要量を積算したうえで、1分間隔の電力需要量（積算値）[Wh]から、30分間隔の電力需要[W]に変換する。この30分間隔とは、日本で想定されているスマートメーターの標準仕様に合わせたものである[12]。

2.2.3 分析対象日・分析対象世帯の選定

つづいて、家庭電力需要カーブのクラスタ分析を行うにあたって、分析対象とする日および世帯の選定について述べる。前述のとおり、本研究では戸建住宅 1070 世帯における 2013 年 10 月 1 日～2014 年 9 月 30 日にかけての家庭電力需要データを取得したが、データ欠損があり分析できない日や世帯があるので、分析前に分析対象となる日・世帯を選定する必要がある。

まずは、分析対象日を選定する。取得したデータを確認したところ、データ取得した 365 日間のうちでデータが欠損している日が存在した。データ欠損の主な理由としては、データを格納しているサーバーの定期メンテナンスが挙げられる。そこで、365 日間のうちデータが欠損していた 18 日間（2013 年 11 月 19 日，2014 年 1 月 23 日，3 月 8～10・14 日，4 月 16・25 日，5 月 14 日，6 月 9・10・13・19・25・26 日，8 月 1・8・14 日）は分析対象から除外し，残りの 347 日間を分析対象日とする。

つづいて、分析対象世帯を選定する。分析対象日となる 347 日間においても一部の世帯ではデータ欠損が生じていた。このデータ欠損の主な理由としては、機器の誤作動や停電によるスマートメーター通信機能の一時停止が挙げられる。そこで、「月ごとの分析対象日において、データ欠損が生じていないこと」を条件として、データ取得した 1070 世帯の中から分析対象世帯を選定する。

2013 年 10 月から 2014 年 9 月にかけて、月ごとの日数・データ欠損日数・分析対象日数・分析対象世帯数を表 2-2 に示す。1 ヶ月間の分析対象日の日数は、最大が 31 日（2013 年 10・12 月，2014 年 7 月），最小が 24 日（2014 年 6 月）で，平均すると 28.9 日である。また分析対象世帯数は，最大が 338 世帯（2014 年 1 月），最小が 111 世帯（2014 年 3 月）で，平均すると 287.8 世帯である。

表 2-2 月ごとの日数・データ欠損日数・分析対象日数・分析対象世帯数

年	2013			2014								
月	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 ヶ月の日数	31	30	31	31	28	31	30	31	30	31	31	30
データ欠損日数	0	-1	0	-1	0	-4	-2	-1	-6	0	-3	0
分析対象日数	31	29	31	30	28	27	28	30	24	31	28	30
分析対象世帯数	317	293	283	338	308	111	327	239	324	327	260	327

2.3 電力需要カーブのクラスタ分析

2.3.1 クラスタ分析の概要

クラスタ分析とはパターン認識の手法の一つであり、ビッグデータや雑多な情報を持つデータの中から意味を持つデータ集合（パターン）に分類して、データの特徴量を抽出する（データの次元を下げる）処理のことを指す[56].

パターン認識の手法は、事前に分類パターンを与えるか否かで2つにカテゴライズすることができる。データ分類をするときに、事前に分類パターンが明らかになっているデータを用意して、このデータに従ってデータ分類基準を構築する作業（事前学習）を行なったうえで、分類パターンが未知のデータを処理していく手法のことを「教師あり学習（supervised learning）」と呼ぶ。教師あり学習の例としては判別分析・ロジスティック回帰・密度推定が挙げられ、手紙の住所を読み取って配達エリアごとに分類する際に利用する「手書き文字認識」の処理などに応用されている。一方で、データの分類パターンが全く不明であって、全データから試行錯誤して分類基準となる特徴を抽出してデータ分類する手法を「教師なし学習（unsupervised learning）」と呼ぶ。クラスタ分析はこれらの教師なし学習に該当する手法である[56].

家庭電力需要データに対して教師なし学習手法のクラスタ分析を利用する理由として、電力需要が各家庭に固有の特徴を持っていることが挙げられる。教師あり学習手法を行なうためには、データ分類の特徴がある程度分かっている分類パターンが明示されたデータ（教師データ）を用意する必要がある。しかし家庭電力需要データの場合、電力需要は各家庭の家族人数・居住地・所有している家電製品・生活様式に応じて固有の特徴を持っている。そのため、どの家庭にも当てはまる電力需要データの特徴を見極めることは困難である。そのため、試行錯誤してデータの特徴を見極める教師なし学習手法の方が、家庭電力需要データの分類には適していると考えられる。

さて、クラスタ分析は、データ間の距離を定義し距離の近さに応じてデータをいくつかのパターンに分類する。距離が近いデータ同士は同じパターンに分類され、距離が遠いデータ同士はそれぞれ異なるパターンに分類される。今回の分類では、データ間の距離 $d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ はユークリッド距離（時々刻々の消費電力 \mathbf{x}_i の差の二乗和の平方根）を用いる（式 2-1）。

$$d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \sqrt{\sum_{t=1}^T (x_{it} - x_{jt})^2} \quad \text{式 2-1}$$

また、このときの電力需要カーブの距離のイメージを図 2-3 に示す。異なる日における 30 分間隔の電力需要データ（青線・赤線）に対して、同時間帯における両データの差（黒線の長さ）の二乗和の平方根が距離となる。

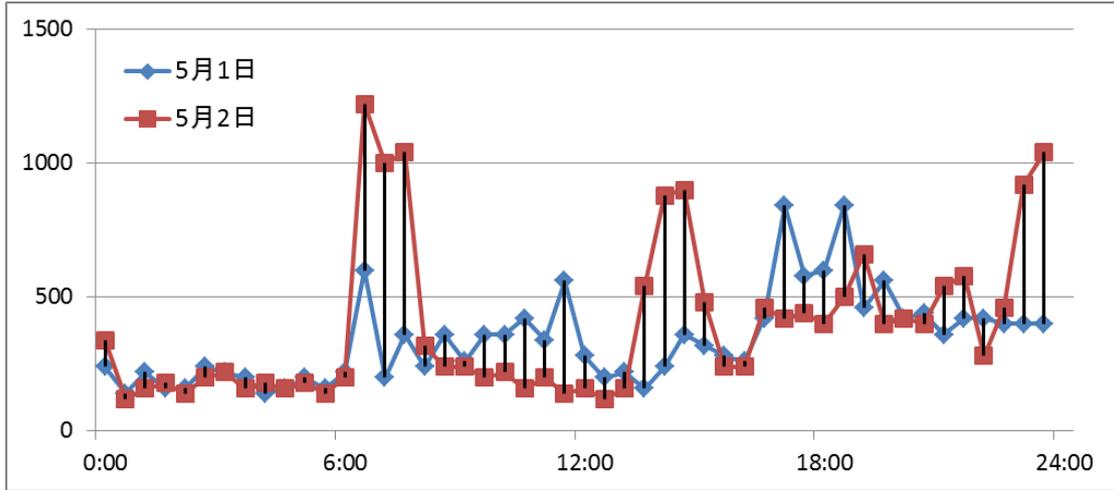


図 2-3 電力需要カーブの距離

2.3.2 クラスタ分析手法

クラスタ分析におけるデータのパターン分類アルゴリズムはいくつかの種類があるが、本研究では 2 種類の非階層型クラスタリング手法 (k-平均法, ファジィ c-平均法) と 2 種類の階層型クラスタリング手法 (最長距離法, ウォード法) を用いる。

2.3.2.1 k-平均法

k-平均法は非階層型クラスタリング手法の 1 つであり、簡単なアルゴリズムで計算できることからビッグデータの分析に広く利用されている。

N 個のデータを k 個のクラスタに分類する場合を考える。まず、 N 個のデータ $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_N$ の中から k 個の代表ベクトル $\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_l, \dots, \mathbf{c}_k$ を選ぶ。つづいて、最も近い代表ベクトルに従ってデータを k 個のクラスタ $C_1, C_2, \dots, C_l, \dots, C_k$ に分類する。任意のデータ \mathbf{x}_i に最も近い代表ベクトルが \mathbf{c}_l の場合、 \mathbf{x}_i はクラスタ C_l に組み入れられる。すべてのデータの分類が終わったあと、各クラスタ C_l に含まれるデータの重心を計算し (式 2-2)、 k 個の重心を新しい代表ベクトルとして配置する。

$$\mathbf{c}_l = \frac{1}{|C_l|} \sum_{\mathbf{x}_i \in C_l} \mathbf{x}_i \quad \text{式 2-2}$$

以上の手順をクラスタの分類が収束するまで繰り返す。k-平均法における最適な代表ベクトルは、次の評価関数 $L(\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_k)$ を最小化することで得られる (式 2-3)。

$$L(\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_k) = \sum_{\mathbf{x}_i \in C_l} \min_{l=1, \dots, k} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{c}_l\|^2 \quad \text{式 2-3}$$

k-平均法によるパターン分類の例として、2次元データを3つのクラスタに分類した場合の分析結果を図 2-4 に示す[58]。なお、入力データは分かりやすさのために2次元データとしているが、k-平均法は任意の次元のデータを対象として分析することができる。すべてのデータ点は赤・緑・黒のいずれかの色に塗られており、同じ色のデータは同じクラスタに属していることを示している。黄色い大きな点は各クラスタの重心を示している。この図から分かる通り、クラスタ間の境界は直線となっており、より具体的に言うと両側のクラスタの重心のちょうど中間を通る位置に存在している。

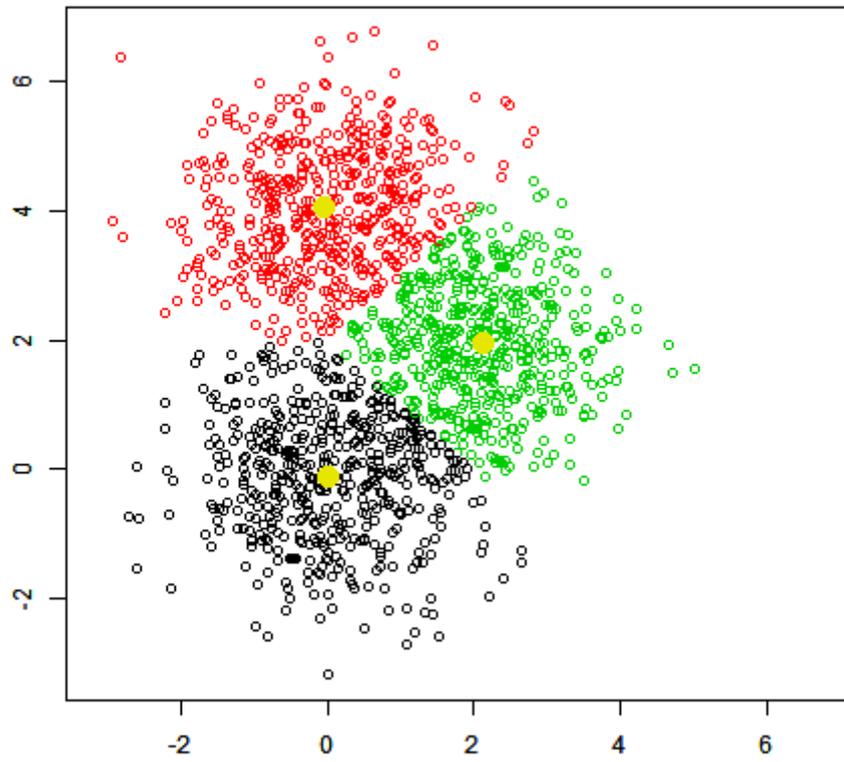


図 2-4 k -平均法による 2 次元データのパターン分類 ($k = 3$) [58]

2.3.2.2 ファジィ c-平均法

ファジィ c-平均法は上記の k-平均法を改良したアルゴリズムで、クラスタ分類に「曖昧さ（ファジィネス, fuzziness）」を含んでいる．具体的に説明すると、k-平均法は「任意のデータ \mathbf{x}_i は k 個のクラスタ $C_1, C_2, \dots, C_l, \dots, C_k$ の内のどれか 1 つのみに属し、複数のクラスタに属することはない」という排他的な分類手法であるのに対して、ファジィ c-平均法は「個々のデータが同時に複数のクラスタに属する」ことができる．すなわち、ファジィ c-平均法における「曖昧さ」とは、データの属するクラスタ間の境界の曖昧さを意味する．

先程と同様に、 N 個のデータを k 個のクラスタに分類する場合を考える．ファジィ c-平均法では、データの個々のクラスタに対する帰属の度合いは、 $k \times N$ 個の係数 u_{li} ($1 \leq l \leq k, 1 \leq i \leq N$) によって記述される．最初に u_{li} の初期値をランダムに選び、それに従って各クラスタの重心 μ_l を計算する (式 2-4)．ここで $f > 1$ は分類の曖昧さを決めるパラメタである．

$$\mu_l = \frac{\sum_{i=1}^N (u_{li})^f \mathbf{x}_i}{\sum_{i=1}^N (u_{li})^f} \quad \text{式 2-4}$$

つづいて、重心から u_{li} を再計算する (式 2-5)．

$$u_{li} = \left[\sum_{j=1}^k \left(\frac{\|\mathbf{x}_i - \mu_l\|}{\|\mathbf{x}_i - \mu_j\|} \right)^{\frac{2}{f-1}} \right]^{-1} \quad \text{式 2-5}$$

以上の手順を u_{li} と μ_l が収束するまで繰り返す．ファジィ c-平均法における最適な代表ベクトルは、次の評価関数 $L(\{u_{li}\}, \{\mu_l\})$ を最小化することで得られる (式 2-6)．

$$L(\{u_{li}\}, \{\mu_l\}) = \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^N (u_{li})^f \|\mathbf{x}_i - \mu_l\|^2 \quad \text{式 2-6}$$

k-平均法のときと同じ 2 次元データをファジィ c-平均法によって分析した結果を図 2-5・図 2-6・図 2-7 に示す[59]．3 つの分析結果はいずれも 3 個のクラスタに分類しているが、分類の曖昧さを決めるパラメタは $f = 1.1$ (図 2-5) $\rightarrow f = 1.5$ (図 2-6) $\rightarrow f = 2.0$ (図 2-7) という順番で大きくなっている．データ点の色が滲んでいる部分は複数のクラスタに属している「曖昧さ」を意味している．一連の結果を見ると、 $f = 1.1$ (図 2-5) のときは k-平均法による結果とさほど変わらないのに対して $f = 2.0$ (図 2-7) のときはクラスタ間の境界がかなり不明確になっており、パラメタが大きくなるにつれて分類の曖昧さが際立ってくる傾向を示している．

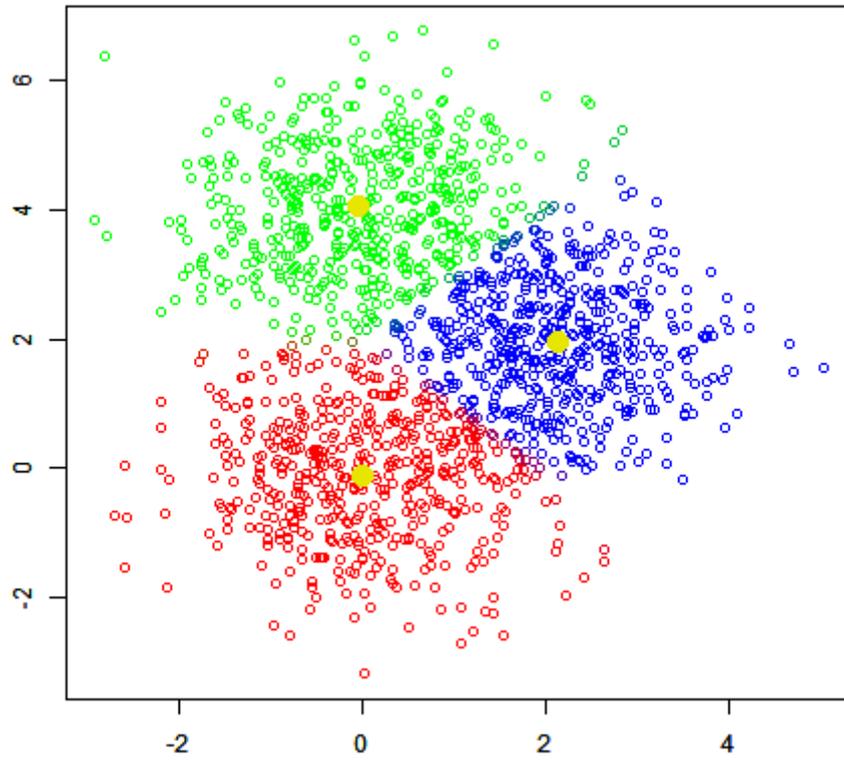


図 2-5 ファジィ c-平均法による 2 次元データのパターン分類 ($k = 3, f = 1.1$) [59]

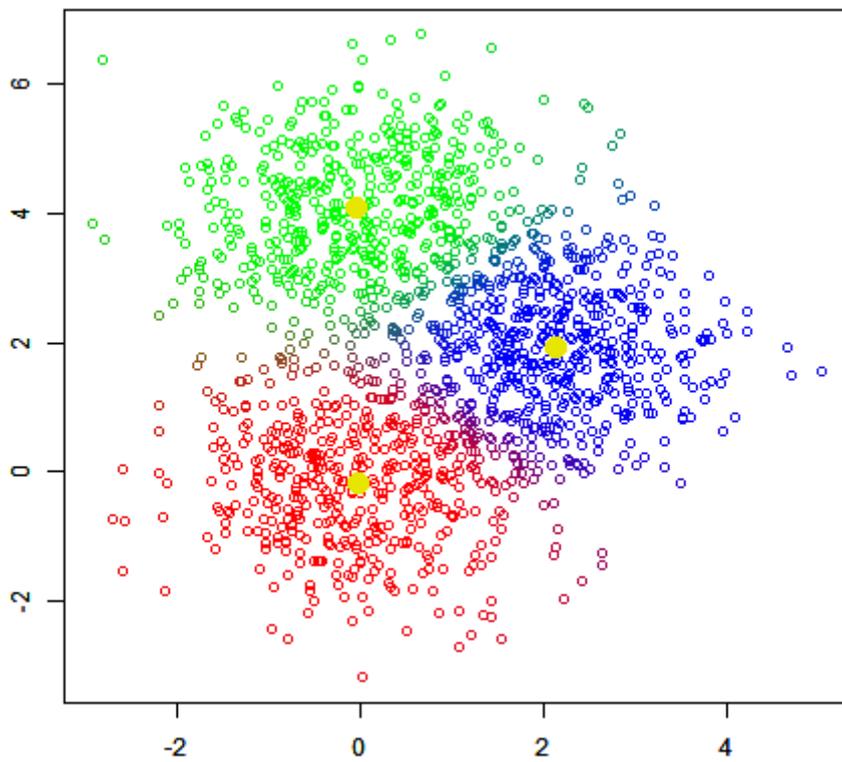


図 2-6 ファジィ c-平均法による 2 次元データのパターン分類 ($k = 3, f = 1.5$) [59]

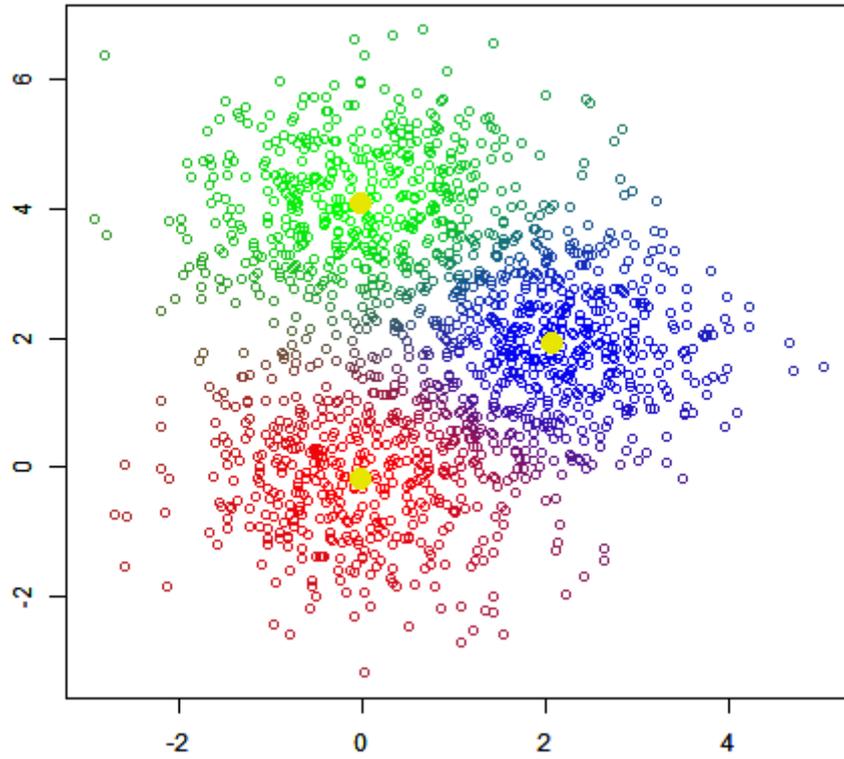


図 2-7 ファジィ c-平均法による 2 次元データのパターン分類 ($k = 3, f = 2.0$) [59]

2.3.2.3 階層型クラスタリング手法

階層型クラスタリング手法における入力・出力の例を図 2-8 に示す。データを階層型クラスタリングによって分析したとき、図 2-8 の右側で示すような樹形図を出力として得ることができる。なお、図 2-8 の左側で示している入力データは分かりやすさのために 2 次元データとしているが、階層型クラスタリングは任意の次元のデータを対象として分析することができる。

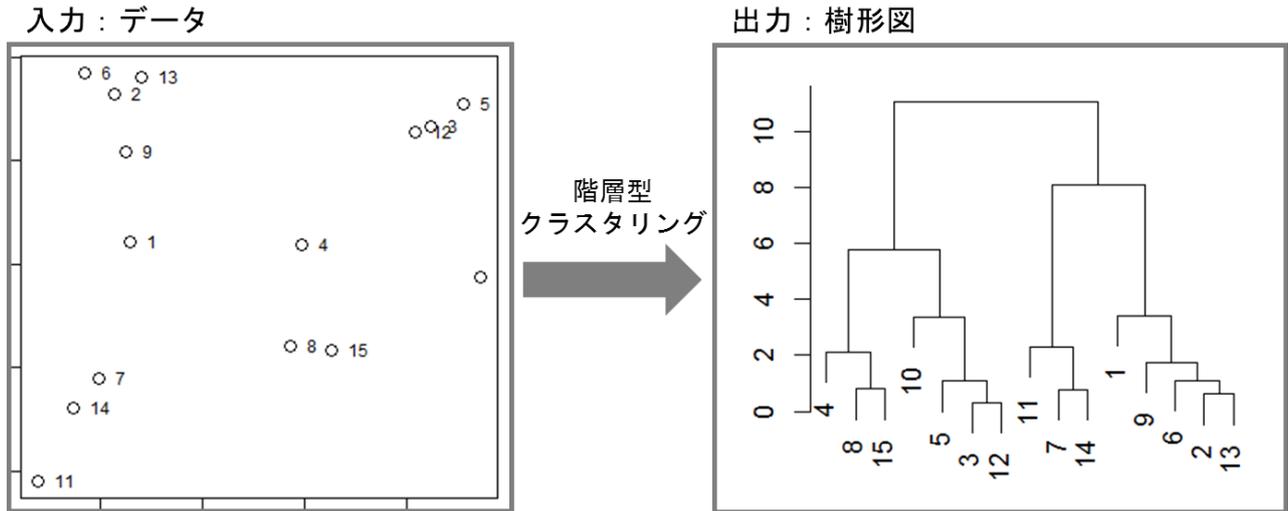


図 2-8 階層型クラスタリング手法における入出力の例

階層型クラスタリング手法において、第一の手順は N 個の T 次元データ $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$ ($x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{it}, \dots, x_{iT}\}$) を、 N 個のクラスタ $C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_N$ にそれぞれ 1 個ずつ分配する。つづいてクラスタ間の距離 $d(C_i, C_m)$ を総当りで計算し、最も近いクラスタのペアを 1 つのクラスタに統合する。

階層型クラスタリング手法の手順の例を図 2-9 に示す。図 2-9 の左側を見ると、この例で一番近いデータは青い丸で囲まれた 2 点であり (①番)、最初にこの 2 点を 1 つのクラスタに統合する。左側でのクラスタの統合と右側の樹形図は互いに対応しており、樹形図でも青い線 (①番) が一番低いところで枝分かれしている。クラスタの統合を繰り返していき、赤い丸 (②番) → 緑の丸 (③番) → 紫の丸 (④番) → オレンジの丸 (⑤番) → 水色の丸 (⑥番) → … と近いクラスタから順番に統合されていく。右側の樹形図も同様に、赤い線 (②番) → 緑の線 (③番) → 紫の線 (④番) → オレンジの線 (⑤番) → 水色の線 (⑥番) → … と、順番に低いところで枝分かれしている。全てのデータが 1 つの大きなクラスタにまとまるまでクラスタの統合を繰り返していき、樹形図も 1 本の大きな樹のようにつながっていく。

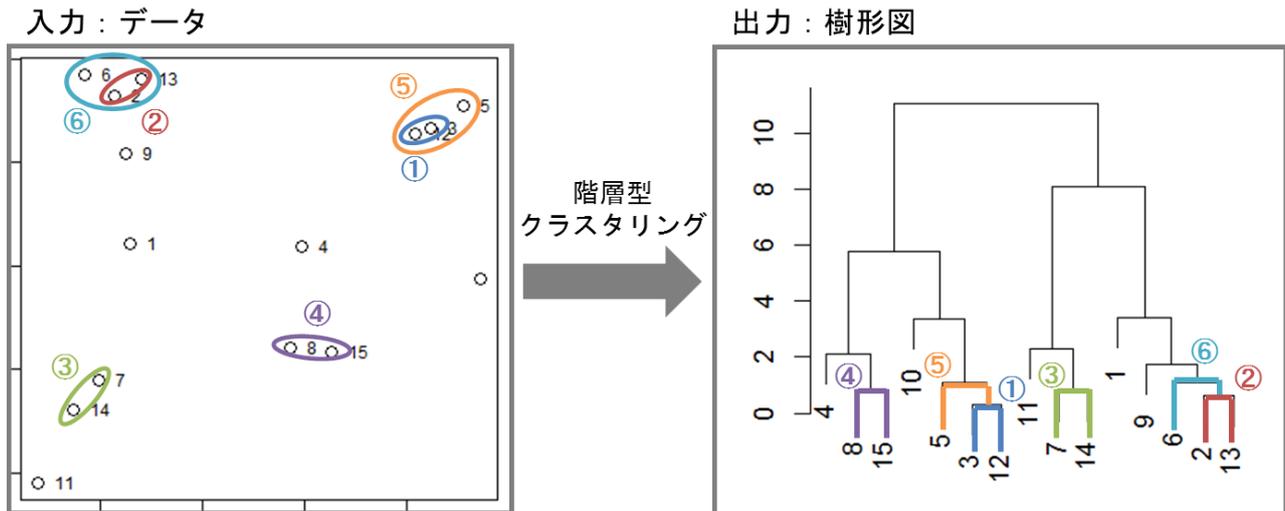


図 2-9 階層型クラスタリング手法の手順例

ここで距離の計算手法はいくつかの種類があり，本研究では最長距離法・ウォード法を適用する[60]. 最長距離法では，異なる 2 つのクラスタに属する 2 点のうち最も遠い点の距離を用いる (式 2-7).

$$d(C_l, C_m) = \max_{x_i \in C_l, x_j \in C_m} d(x_i, x_j) \quad \text{式 2-7}$$

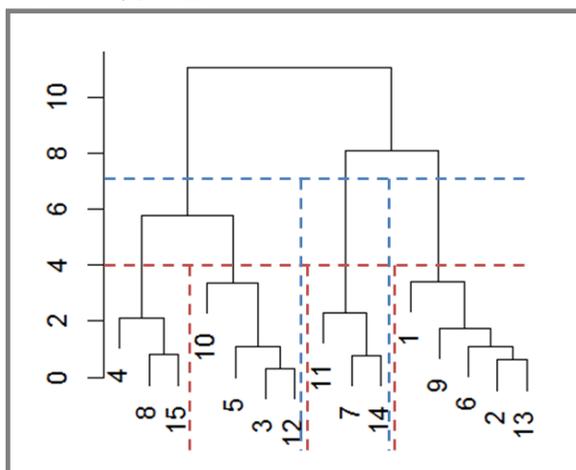
ウォード法では，クラスタに属するデータとその重心のユークリッド距離を用いて，距離計算をする．具体的には，2 つのクラスタを統合した後のデータと重心の距離と，2 つのクラスタを統合する前のそれぞれのデータと重心の距離の差を用いる (式 2-8・式 2-9).

$$d(C_l, C_m) = E(C_l \cup C_m) - E(C_l) - E(C_m) \quad \text{式 2-8}$$

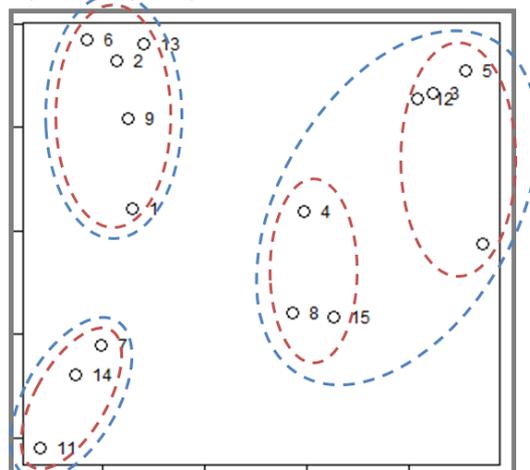
$$E(C_l) = \sum_{x_i \in C_l} (d(x_i, c_l))^2 \quad \text{式 2-9}$$

樹形図が完成したら，これを適当な高さでカットする (切る) ことによって，任意のパターン数にデータを分類することができる．樹形図のカットの例を図 2-10 に示す．例えば，図 2-10 の左側の樹形図を青い破線で示した高さでカットすると樹形図は 3 つの部分に分割される．これを右側のデータに対応させると，データは青い破線で囲んだ 3 つのクラスタに分類される．さらに，樹形図を赤い破線で示した高さでカットすると 4 つの部分に分割され，データは赤い破線で囲んだ 4 つのクラスタに分類される．

出力：樹形図



入力：データ



樹形図の
カット
→

図 2-10 樹形図のカット例

2.3.3 クラスタ分析による標準電力需要パターンの抽出

2.3.2 で紹介した様々なクラスタ分析手法を用いて、各家庭を対象に1か月間における標準電力需要パターンの抽出を行う。標準電力需要パターンの定義についてもう一度確認すると、「クラスタ分析で分類された電力需要カーブのパターンのうち最も日数が多い電力需要パターン」であり、すなわち「その家庭が1か月間で最も普段の生活をしたときに発生する電力需要カーブのパターン」である。標準電力需要パターンの抽出方法を図 2-11 に示す。

まず、特定の家庭について1か月分の電力需要カーブを用意する。図 2-11 の例では7月1日～31日の電力需要カーブ計31日分を用意している。次にクラスタ分析によって、1か月分の電力需要カーブを2～10個のパターンに分類する（図 2-11 の例では5パターンに分類）。そして各パターンに含まれる日数を確認し、日数が最も多い電力需要パターンを「標準電力需要パターン」と定義する。図 2-11 の例では、赤の電力需要パターンが16日分の電力需要カーブを含んでいて最多であるため、この赤のパターンが分析家庭における7月の標準電力需要パターンとなる。以上の手順を繰り返して、2013年10月から2014年9月の月ごとの分析対象世帯を対象にクラスタ分析を行い、12か月分の標準電力需要パターンを抽出する。

クラスタ分析の結果、日数が最も多い電力需要パターンが複数個存在する（例えば、電力需要カーブ31日分を5パターンに分類したとき、各パターンの日数が10日・10日・6日・3日・2日となる場合）場合も生じうる。この場合には、複数の日数最多の電力需要パターンのうちどれか1つを標準電力需要パターンに選択する必要がある。ここでどのパターンを選択するかは、クラスタ分析の妥当性評価（2.3.4で後述）には影響しないが、標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日電力需要量の比較（2.3.5で後述）の結果には影響を与える。そこで、日数最多の電力需要パターンが複数あった場合、1日の電力需要量が少ないパターンを標準電力需要パターンとする場合（ケース1）と、多いパターンを標準電力需要パターンとする場合（ケース2）の2通りを検討し、標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日電力需要量の比較ではこの2通りの結果を示す。

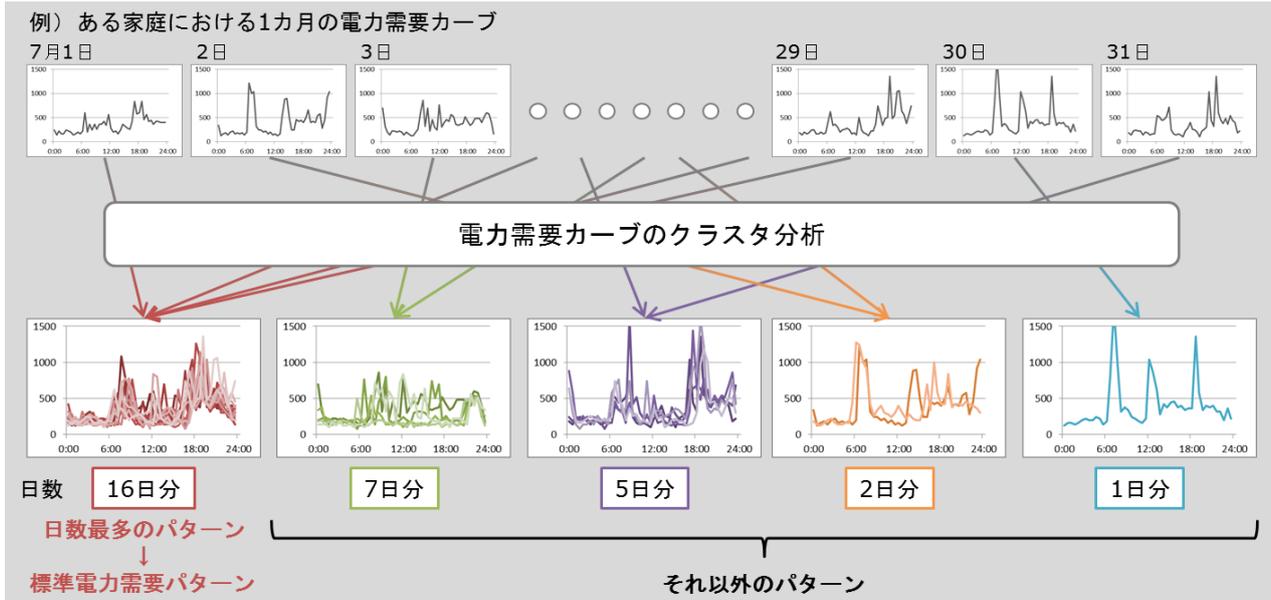


図 2-11 標準電力需要パターンの抽出方法

2.3.4 異なるクラスタ分析手法・パターン数の妥当性評価

本研究では、2.3.2 で挙げた様々なクラスタ分析の分類アルゴリズム (k-平均法, ファジィ c-平均法 ($f = 1.5, 2.0, 3.0$), 最長距離法, ウォード法) を検討し, また 2.3.3 で記述したように様々なパターン数 (2 個 ~ 10 個) を設定して家庭電力需要カーブの分類を行う. このような様々なクラスタ分析手法およびパターン数のバリエーションの中から最適なクラスタ分析手法とパターン数を選択するために, 指標に基づいてクラスタ分析の妥当性を評価する.

事前に分類パターンの特徴を与えてデータ分類基準を構築する「教師あり学習」の場合は, 事前に与えたパターンの特徴とパターン認識をした結果のパターンの特徴が似ているかどうかで妥当性の評価をすることができる. しかし, クラスタ分析のように, データの分類パターンが事前には明らかになっていない「教師なし学習」の場合は, 教師あり学習と異なる手法で妥当性の評価をすることが求められる. そこで, 「教師なし学習」の場合はパターン内のデータの近似度やパターン間のデータの相違度を定量化した指標に基づいて分類の妥当性を評価するのが一般的で, この指標の一つが Davies–Bouldin 指標 (Davies–Bouldin index ; DBI) である[61].

DBI は「パターン内のまとまり具合」と「パターン間の離れ具合」を定量化した指標で, 式 2-10 のように記述される. ここで, k は分類するクラスタ数, $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ は分類されるデータ, $\mathbf{c}_l, \mathbf{c}_m$ は代表ベクトル, d はデータや代表ベクトル同士の距離, C_l, C_m はクラスタを表す. 具体的に言うと, 同じパターンに属するデータ同士の距離 $(\frac{\sum_{\mathbf{x}_i \in C_l} (d(\mathbf{x}_i, \mathbf{c}_l))^2}{|C_l|} + \frac{\sum_{\mathbf{x}_j \in C_m} (d(\mathbf{x}_j, \mathbf{c}_m))^2}{|C_m|})$ が小さく, 異なるパターン同士の距離 $(d(\mathbf{c}_l, \mathbf{c}_m))$ が大きくなるほど, DBI は小さくなる. よって DBI が小さい値を取るほど, そのクラスタ分析手法とパターン数が適していることを意味する.

$$DBI = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k \max_{l \neq m} \frac{\frac{\sum_{\mathbf{x}_i \in C_l} (d(\mathbf{x}_i, \mathbf{c}_l))^2}{|C_l|} + \frac{\sum_{\mathbf{x}_j \in C_m} (d(\mathbf{x}_j, \mathbf{c}_m))^2}{|C_m|}}{d(\mathbf{c}_l, \mathbf{c}_m)} \quad \text{式 2-10}$$

標準電力需要パターン抽出のためのクラスタ分析は各家庭・各月の電力需要カーブに対して別々に行い, それぞれの分析について DBI が計算される. そこで今回は全ての分析対象世帯と月のクラスタ分析において同じクラスタ分析手法とパターン数を適用するものとして, 各手法とパターン数における DBI の平均と標準偏差を比較することで, どれだけ効果的かつ安定的にクラスタ分析が行えているかを評価する.

2.3.5 標準電力需要パターンとそれ以外のパターンの比較

クラスタ分析によって抽出した各家庭・各月の標準電力需要パターンとそれ以外のパターンを比較して、標準電力需要パターンとそれ以外のパターンの特徴、すなわちクラスタ分析によって類推される「各家庭が1ヶ月間で普段の生活をした日」や「普段通りでない生活をした日」がどのような日であるかを確認する。

標準電力需要パターンの特徴を確認するために、比較する項目は次のとおりである。まず、「普段の生活をした日」がどの程度の頻度で発生するかを調べるために、分析対象日数のなかで標準電力需要パターンに含まれる日数の割合を確認する。つづいて、「普段の生活をした日」が電力需要の多い日か、それとも少ない日かを調べるために、標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日の電力需要量を比較する。さらに、「普段の生活をした日」が平日よりの生活行動パターンか、それとも休日よりの生活行動パターンかを調べるために、標準電力需要パターンとそれ以外のパターンに含まれる日の休日の割合を比較する。ここで休日は土曜・日曜・祝日であるとし、祝日の一覧を表2-3に示す。まず、月ごとの全ての分析対象世帯の平均を比較して、標準電力需要パターンの平均的な特徴を確認する。つづいて、標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日の電力需要量の大小関係に応じて2つのグループに分類して、グループごとに標準電力需要パターンとそれ以外のパターンを比較する。世帯の分類は、標準電力需要パターンの1日電力需要量がそれ以外のパターンよりも少ない家庭を「普段の生活が省エネグループ」、標準電力需要パターンの1日電力需要量がそれ以外のパターンよりも多い家庭を「普段の生活が多消費グループ」とする。

つづいて、標準以外の個々の電力需要パターンにおける1日電力需要量・電力需要カーブの特徴を調べる。まず1日電力需要量の特徴を確認するために、「需要量比率」を定義する。需要量比率とは、標準電力需要パターンでの1日電力需要量を1.0とした時の、それ以外のパターンでの1日電力需要量の比率を意味し、標準以外のパターンでの1日の電力需要量が標準と比べてどの程度乖離しているかを数値化したものである。月ごとの標準以外のパターンに含まれる日数と需要量比率の分布を示して、標準電力需要パターンとそれ以外のパターンの乖離の度合いを調べる。

さらに標準以外の個々の電力需要パターンにおける代表的な電力需要カーブの特徴を調べるために、電力需要パターンのクラスタ分析を行う。標準電力需要パターンを抽出するためのクラスタ分析(2.3.3)では個々の家庭における電力需要カーブ1ヶ月分をパターン分類したが、ここでは異なる家庭の電力需要パターンをまとめてパターン分類して、共通する特徴があるかを調べる。

表 2-3 祝日の一覧

日付	祝日名
2013年10月14日	体育の日
2013年11月4日	文化の日の振替休日
2013年11月23日	勤労感謝の日
2013年12月23日	天皇誕生日
2013年12月29日 ～2014年1月3日	正月休み
2014年1月13日	成人の日
2014年2月11日	建国記念の日
2014年3月21日	春分の日
2014年4月29日	昭和の日
2014年5月3日	憲法記念日
2014年5月5日	こどもの日
2014年5月6日	みどりの日の振替休日
2014年7月21日	海の日
2014年9月15日	敬老の日
2014年9月23日	秋分の日

2.4 結果・考察

2.4.1 1日電力需要量および電力需要カーブの平均

クラスタ分析による結果を述べる前に、まずは1070世帯平均での1日の電力需要量と電力需要カーブの形状を確認する。

月別の1日電力需要量の平均を図2-12に示す。電力需要量は暖房需要の増加する冬2月にピークの18 kWh/日に達する。気温が穏やかになる春5・6月と秋9・10月には、電力需要量は10 kWh/日程度にまで減少する。夏7・8月は冷房需要の増加によって電力需要量は12 kWh/日まで増加するが、冬の需要量ほどではない。

12カ月を4季節（春夏秋冬）に分けて、通年と季節別での電力需要カーブの平均を図2-13に示す。通年での平均で見ると、電力需要カーブは2つのピークを持ち、1つ目のピークは朝7時ごろに700 Wに達し、2つ目のピークは夜19～21時ごろに750 Wに達する。一方で需要カーブのボトムは、深夜3時ごろに300 W、昼14～15時ごろの400 Wに達する。このような通年平均で電力需要カーブの特徴は家庭における1日の生活リズムに対応している。朝に起床してから出勤・登校するまでの時間帯と夕方に帰宅してから夜に睡眠するまでの時間帯には電力需要が多くなり、逆に睡眠中の深夜や不在がちな日中には電力需要が少なくなる。

つづいて季節別に見ると、春（4～6月）の電力需要カーブと秋（9～11月）の電力需要カーブは非常に似ており、朝7時ごろと夜19時ごろにピークに達し、深夜3時ごろと昼14時ごろにボトムを迎える。春・秋と比べて、夏（7～8月）は午後の電力需要が増加している。電力需要カーブは夜19～21時ごろに700 Wのピークに達し、朝の顕著なピークはなくなっている。冬（12～3月）は、1日を通して電力需要が大きく、朝7時ごろと夜19～21時ごろに1000 Wのピークに達する。このような季節別の電力需要カーブの特徴に違いが生じる原因として、(1) 家庭における1日の生活行動と気温変化の関係、(2) 気温と空調設定温度の温度差の違い、の2点が考えられる。

(1) 家庭における1日の生活行動と気温変化の関係：

前述した家庭における1日の生活リズムを考えると、朝の時間帯と夕方から夜にかけての時間帯には家庭内で生活する人数が多い。また冬の1日の中で暖房を最も使用しうる時間帯は、気温が低下する夕方から朝にかけての時間帯である。以上のように、家庭内の在宅者の多い時間帯と暖房需要が生じる時間帯とが重なるため、冬の朝と夕方から夜にかけての時間帯に電力需要が顕著に増加する。

一方で、また夏の1日の中で冷房を最も使用しうる時間帯は、気温が上昇する日中であるが、これらの時間帯は不在がちである。そのため夏の電力需要は、日中の気温上昇が影響する午後には電力需要が増加するが、夜間の冷え込みが残る午前には電力需要は増加しない。

(2) 気温と空調設定温度の温度差の違い

日本の標準的な気象条件を示す東京を例に、月ごとの日最高／最低気温の平年値[57]と空調設定温度の温度差を表2-4に示す。冬（12～3月）の日最低気温は0.9～4.4℃であり、暖房の設定温度を20.0℃とすると日最低気温から暖房を使い始めた場合には温度を15.6～19.1℃上げることになる。一方で夏（7～8

月) の日最高気温は 29.2~30.8℃であり、冷房の設定温度を 27.0℃とすると日最高気温から冷房を使い始めた場合には温度を 2.2~3.8℃下げることになる。

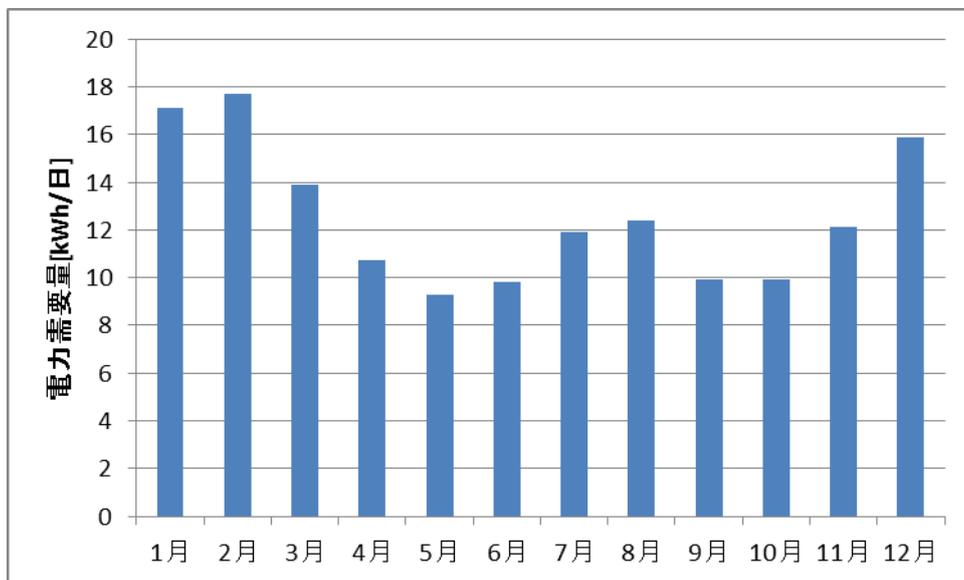


図 2-12 1日電力需要量の平均

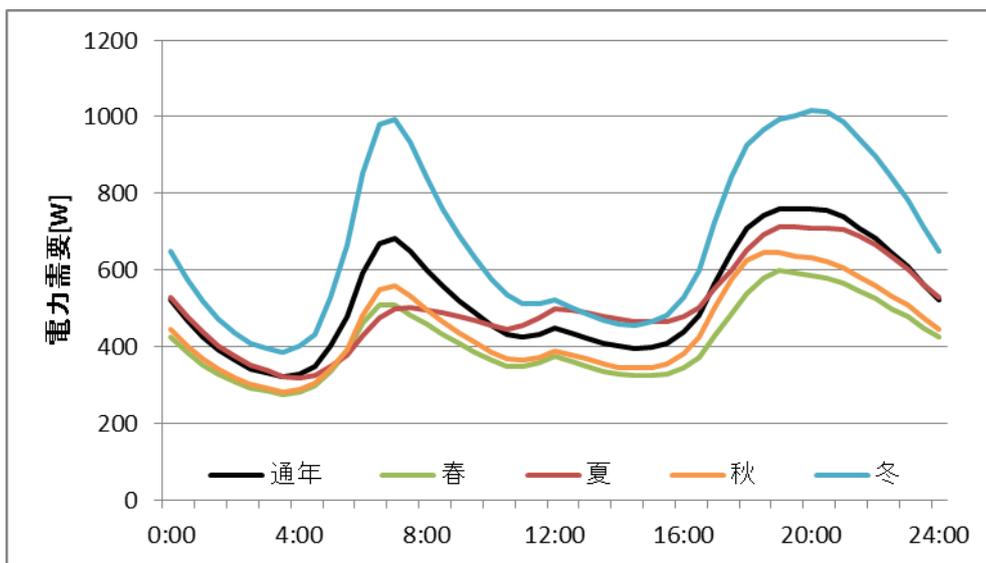


図 2-13 電力需要カーブの平均

表 2-4 日最高／最低気温と空調設定温度の温度差

	夏		冬			
	7月	8月	12月	1月	2月	3月
東京の日最高気温（平年値）[°C]	29.2	30.8	11.9	9.6	10.4	13.6
東京の日最低気温（平年値）[°C]	21.8	23.0	3.5	0.9	1.7	4.4
冷房設定温度(27.0°C)－最高気温[°C]（夏） 暖房設定温度(20.0°C)－最低気温[°C]（冬）	-2.2	-3.8	+16.5	+19.1	+18.3	+15.6

2.4.2 分類アルゴリズム・パターン数の選択

異なる分類アルゴリズム (k-平均法, ファジィ c-平均法 ($f = 1.5, 2.0, 3.0$), 最長距離法, ウォード法) と様々なパターン数 (2 個~10 個) の場合における DBI を計算し, 各アルゴリズムおよびパターン数における分類の妥当性を評価する. DBI の平均と標準偏差を図 2-14 に示す.

まず DBI の平均に着目する. 全体的な傾向としてパターン数が多くなるほど DBI は遞減する. 分類アルゴリズム同士で比較すると, 非階層型クラスタリング手法である k-平均法とファジィ c-平均法の DBI は相対的に大きな値をとっている. ファジィ c-平均法については, 曖昧さを決めるパラメタ f に異なる値を設定した場合でも DBI の違いは小さく, 曖昧さの度合いによるクラスタ分析の良し悪しへの影響は確認できない. 一方で, 階層型クラスタリング手法の最長距離法・ウォード法の DBI は安定して小さい値を取り, 特に最長距離法は全てのパターン数において DBI が最も小さい. パターン数が多くなるほど DBI は減少していくが, パターン数が 5 以上になる辺りから減り幅が緩やかになる傾向が見られる.

つづいて DBI の標準偏差を見ると, パターン数の変化による影響は最長距離法の場合が最も大きく, パターン数が 6 以上の場合において DBI の標準偏差が 4 種類のアルゴリズムの中で最も小さくなる. 一方で, k-平均法ではパターン数を大きくしても DBI の標準偏差はさほど変化せず, ファジィ c-平均法ではパターン数を多くすることで DBI の標準偏差は逆に増加する傾向を示している.

以上の結果から分類アルゴリズムについては, DBI の平均がどのパターン数でも最小となる階層型クラスタリング手法の最長距離法を用いて分類するのがよいと判断できる. パターン数については, 数を多くするほど良い分類であるという傾向が見られるが, 一方でパターン数が多すぎる分類は逆に分類の解釈をしづらくするという問題が生じてくる. そこで, DBI の平均の減り幅がだんだん減少する点に着目して, 5 個のパターン数を選択する. 以降の分析では, 最長距離法を用いて家庭電力需要カーブを 5 パターンに分類することとする.

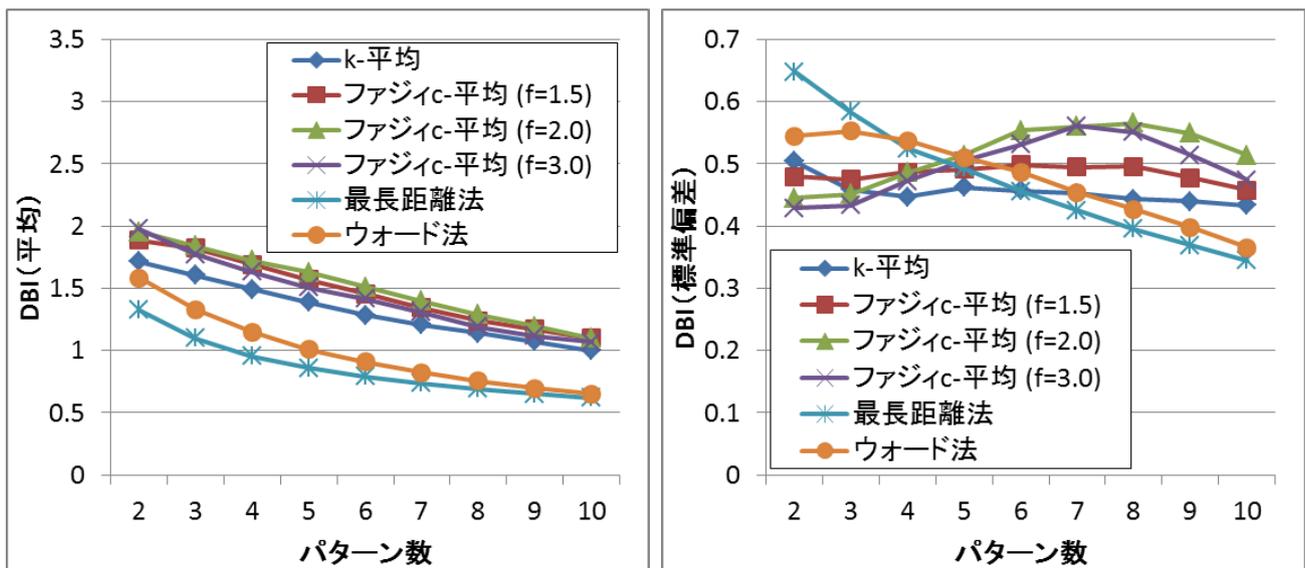


図 2-14 DBI の平均・標準偏差

2.4.3 標準電力需要パターンの平均的な特徴

各月・各世帯について抽出された標準電力需要パターンの平均から、標準電力需要パターンの平均的な特徴を確認する。

2.4.3.1 標準電力需要パターンの日数割合

月ごとの分析対象日数のなかで標準電力需要パターンに含まれる日数の平均割合を図 2-15 に示す。標準電力需要パターンに含まれる日数の割合は 12 カ月平均で 53 % とおよそ半分である。つまり、例えば分析対象日数を 30 日とすると、平均的には標準電力需要パターンに含まれる日が 15 日、それ以外のパターンに含まれる日が 15 日に分類されることになる。また季節変化としては春・秋に割合が増加し夏・冬に減少する傾向が見られるが変化の度合いは小さい。

これらの結果から、「標準電力需要パターンとは、およそ 2 日に 1 日の頻度で現れる電力需要カーブである」ことが分かる。

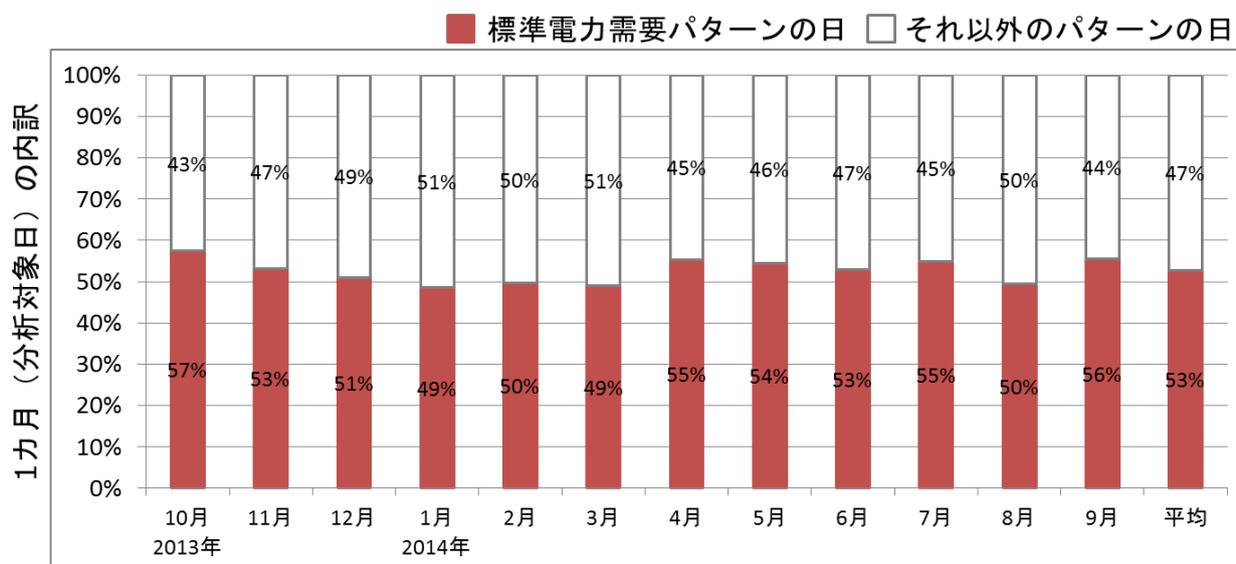


図 2-15 標準電力需要パターンの日数割合

2.4.3.2 標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日電力需要量の比較

つづいて、平均的な家庭における標準電力需要パターンでの1日電力需要量 $E_{day_{typical}}$ [kWh/日]とそれ以外のパターンでの1日電力需要量 $E_{day_{others}}$ [kWh/日]を比較する。月別に $E_{day_{typical}}$ と $E_{day_{others}}$ の平均を比較したものを図 2-16・図 2-17 に示す。ここでは、日数が最も多い電力需要パターンが複数あった場合の標準電力需要パターンの選び方について2通りの方法を検討した。ケース1とは、日数最多のパターンのうち1日の電力需要量が少ないパターンを標準電力需要パターンとした場合であり、ケース2とは1日の電力需要量が多いパターンを標準電力需要パターンとした場合である。このような日数が最も多い電力需要パターンが複数あるような結果の発生頻度は約3%である。

すべての季節において、標準電力需要パターンの方がそれ以外のパターンよりも1日の電力需要量が小さく、ケース1では $E_{day_{typical}}$ の全月平均が11.6 kWh/日であるのに対し $E_{day_{others}}$ の全月平均が13.6 kWh/日であり差は2.0 kWh/日である。この差の有意性を示すP値(両側t検定)はいずれも1%未満であり、有意水準1%で標準電力需要パターンでの1日の電力需要量はそれ以外のパターンよりも少ない。

またケース1とケース2を比較すると、標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日電力需要量はほとんど変わらない。これは、仮に日数が最も多い電力需要パターンが複数あった場合に電力需要量の少ない方を標準にした場合と多い方を標準にした場合とで、標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日電力需要量の大小関係は影響されないことを意味する。

以上の結果より、普段の生活を過ごした日の方がそうでない日に比べ1日の電力需要量が2.0 kWh/日ほど少ないということが分かる。以降の結果では、ケース1(日数が最も多い電力需要パターンが複数あった場合に1日の電力需要量が少ないパターンを標準電力需要パターンとした場合)での結果を示す。

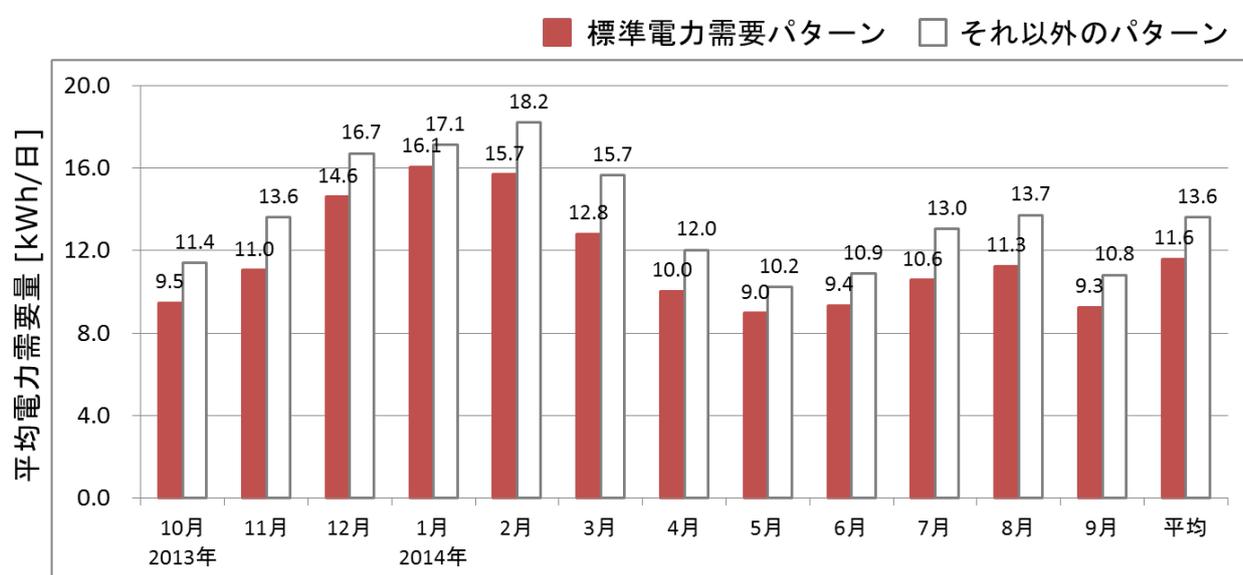


図 2-16 標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日電力需要量の比較 (ケース1)

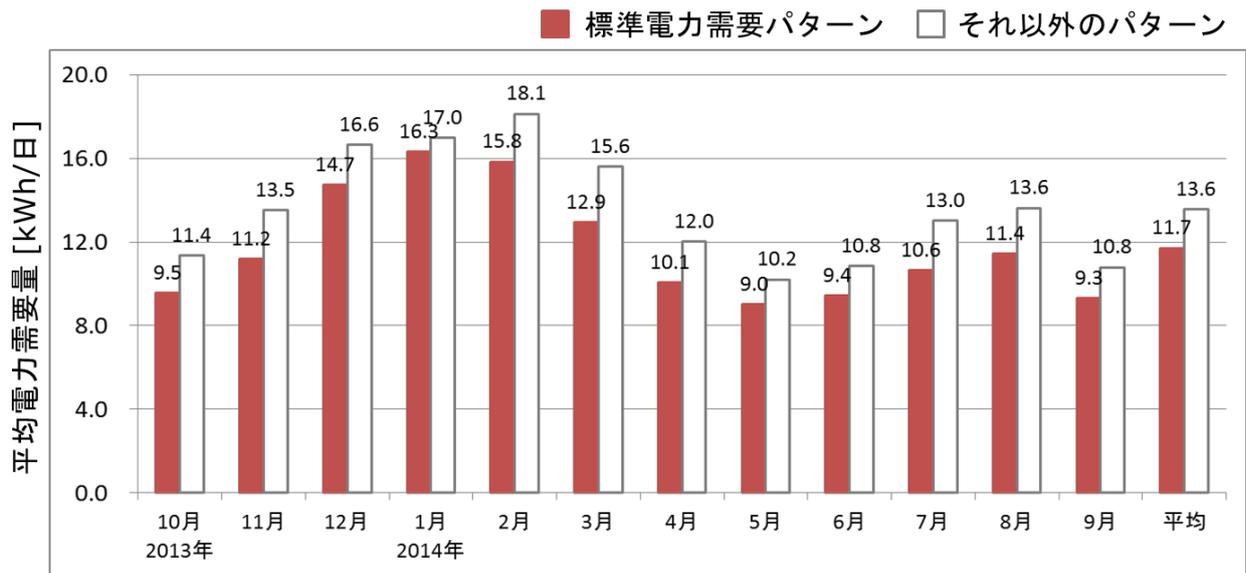


図 2-17 標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの 1 日電力需要量の比較 (ケース 2)

2.4.3.3 休日の割合の比較

月ごとの全分析対象日・標準電力需要パターンに含まれる日・それ以外のパターンに含まれる日における休日の割合を図 2-18 に示す。全分析対象日の平均では休日の割合が 35 %であるのに対し、標準電力需要パターンに含まれる日の休日割合は 28 %，それ以外のパターンに含まれる日の休日割合は 43 %となり、標準電力需要パターンの方が休日の割合が 15 ポイント (= 43 % - 28 %) 少ない。この休日割合を日数に変換するために、2.4.3.1 で例示したのと同様に標準電力需要パターンに含まれる日が 15 日、それ以外のパターンに含まれる日が 15 日に分類された場合で考える。この場合、標準電力需要パターンに含まれる休日は 15 日中 4.2 日、それ以外のパターンに含まれる休日は 15 日中 6.5 日となり、標準電力需要パターンでは含まれる休日が 2.3 日少ない。

月別に見ると、11月・3月は標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの休日割合の差が小さく、さらに8月は大小関係が逆転して標準電力需要パターンの方が休日の割合が僅かに多い。一方で、11月・3月・8月を除いた9ヶ月間においては標準電力需要パターンの方が休日の割合が少なく、標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの休日割合に有意水準 1 % で有意な差があることを確認した。なかでも12月・1月・6月は、標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの休日割合の差が大きく、それ以外のパターンに含まれる日の休日割合は 50 % を超えている。

以上、月ごとに標準電力需要パターンに含まれる日とそれ以外のパターンに含まれる日での休日割合の差に違いが生じているが、明確な季節的傾向は見られない。

以上の結果から、相対的には、標準電力需要パターンに含まれる日は平日の割合が多く、それ以外のパターンに含まれる日は休日の割合が多いことが分かる。ただし、この差は「標準電力需要パターンに含まれる日=平日、それ以外のパターンに含まれる日=休日」というような明確なものではない。また標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの休日割合の差は月ごとに異なるが、季節的な傾向は確認できなかった。

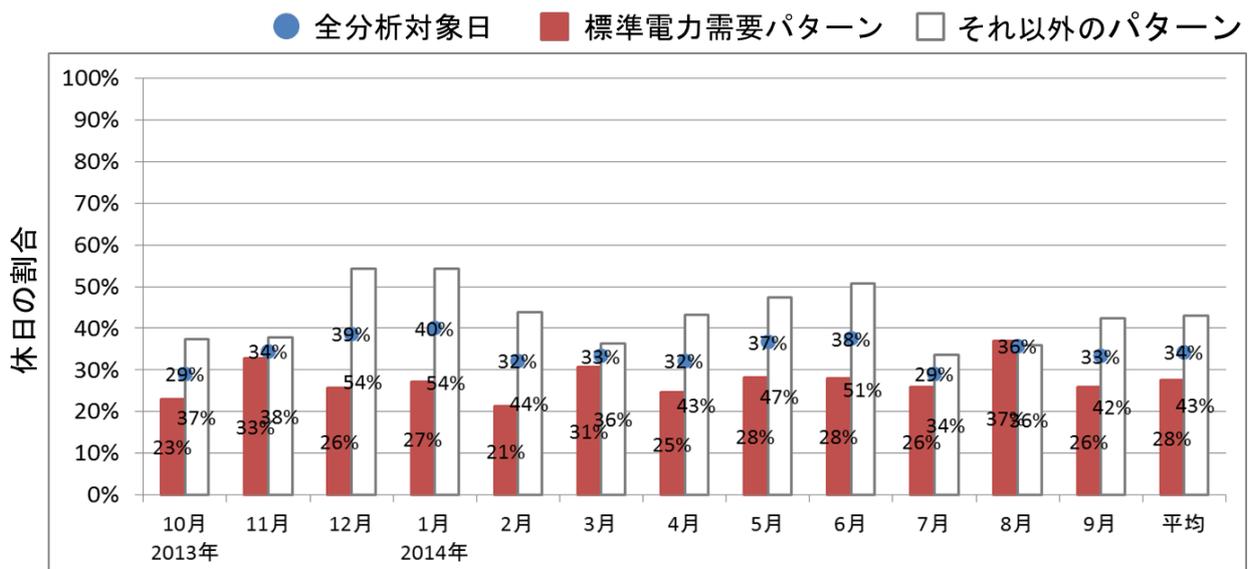


図 2-18 全分析対象日と標準電力需要パターン・それ以外のパターンに含まれる日の休日割合

2.4.3.4 標準電力需要パターンの平均的な特徴の整理

ここまでの比較によって確認してきた標準電力需要パターン，すなわち普段の生活をした日の平均的な特徴について整理する．

第一に，標準電力需要パターンに含まれる日の日数の割合から，今回定義した普段の生活をした日とはおよそ2日に1日の頻度で現れる日であることが分かった．

第二に，標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日電力需要量の比較から，普段の生活を過ごした日の方がそうでない日に比べ1日の電力需要量が2.0 kWh/日ほど少ないことが分かった．

第三に，標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの休日割合の比較から，普段の生活をした日とそうでない日の日数がそれぞれ15日ずつのとき，普段の生活をした日の休日は15日中4.2日，そうでない日の休日は15日中6.5日で，普段の生活をした日の休日が1ヶ月あたり2.3日少ないことが分かった．

2.4.4 グループ別の標準電力需要パターンの特徴

ここまでは全ての分析対象世帯の平均から、標準電力需要パターンの平均的な特徴を確認した。ここからは分析対象世帯を2つのグループに分類して、それぞれのグループでの標準電力需要パターンとそれ以外でのパターンの比較を行う。家庭の分類は、標準電力需要パターンでの1日の電力需要量 $E_{day_{typical}}$ [kWh/日] とそれ以外での1日の電力需要量 $E_{day_{others}}$ [kWh/日] の大小関係に着目して行う。標準電力需要パターンでの1日電力需要量がそれ以外のパターンよりも少ない家庭を「普段の生活が省エネグループ」、標準電力需要パターンでの1日電力需要量がそれ以外のパターンよりも多い家庭を「普段の生活が多消費グループ」とする。月ごとの「普段の生活が省エネグループ」と「普段の生活が多消費グループ」の割合を図2-19に示す。おおよそ80%の家庭が「普段の生活が省エネグループ」に含まれ、標準電力需要パターンの方が1日電力需要量は少ない ($E_{day_{typical}} < E_{day_{others}}$) という関係を満たす。「普段の生活が省エネグループ」に含まれる家庭の割合は、冬(12~2月)になると減少する。

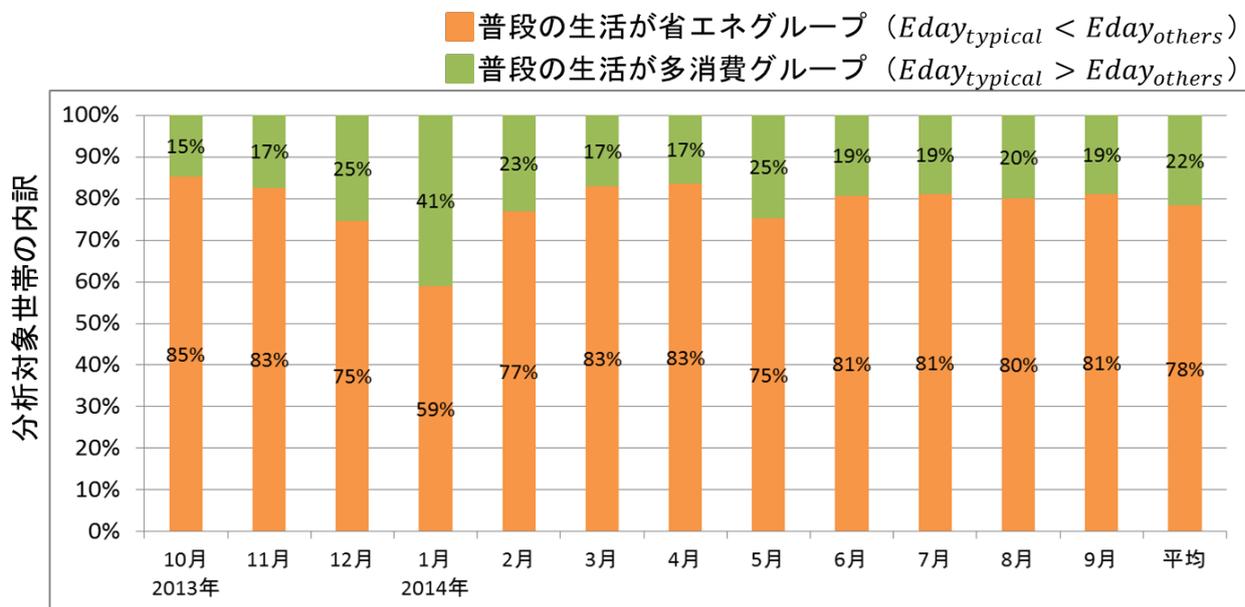


図 2-19 「普段の生活が省エネグループ」と「普段の生活が多消費グループ」の割合

2.4.4.1 グループ間での1日電力需要量の比較

グループごとの標準電力需要パターンの特徴を確認する前に、グループ間での電力需要の大小関係を確認する。月別での「普段の生活が省エネグループ」と「普段の生活が多消費グループ」の1日電力需要量の平均を図2-20に示す。

全月平均での1日電力需要量は、普段の生活が省エネグループの方は12.3 kWh/日であるのに対して普段の生活が多消費グループの方は13.2 kWh/日で、普段の生活が省エネタイプの方が0.9 kWh/日少ない。標準電力需要パターンの1日電力需要量が少ない「普段の生活が省エネタイプ」の方が、全日平均での電力需要量も少なくなっていることが分かる。月別に比較すると、2月・3月・8月には差が大きい一方で、10月・4月・6月には大小関係が逆転して普段の生活が多消費グループの方で1日電力需要量が少なくなっている。

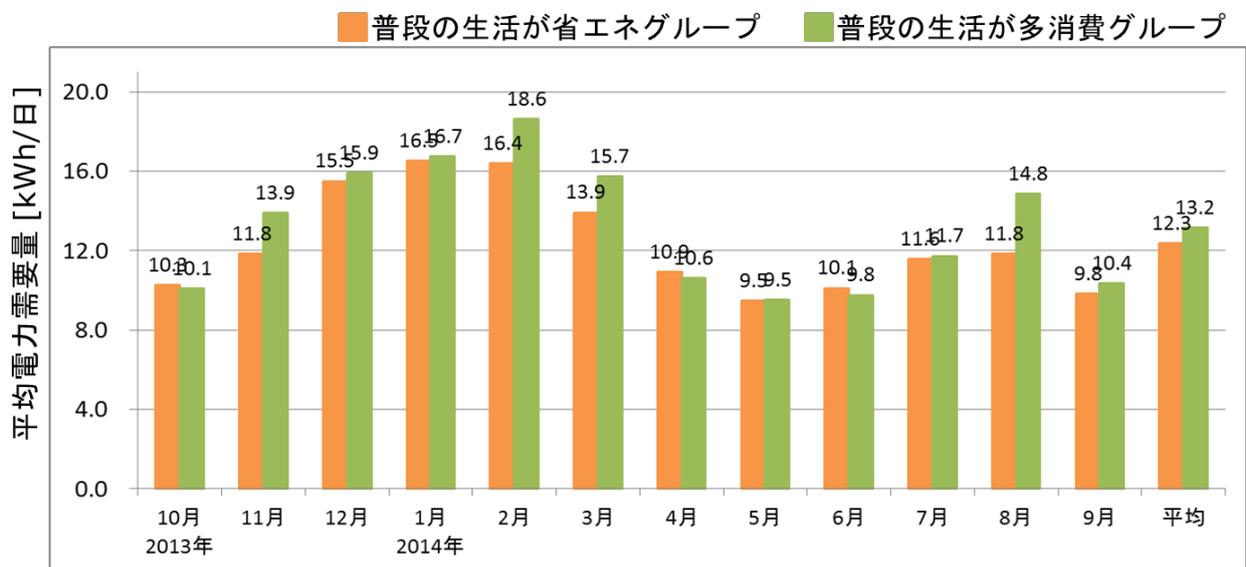


図 2-20 1日電力需要量の比較

2.4.4.2 標準電力需要パターンの日数割合

月ごとの分析対象日数のなかで標準電力需要パターンに含まれる日数の平均割合について、普段の生活が省エネグループの場合を図 2-21、普段の生活が多消費グループの場合を図 2-22 に示す。

12 カ月平均での標準電力需要パターンに含まれる日数の割合は、普段の生活が省エネグループでは 54%，普段の生活が多消費グループでは 47%であり、普段の生活が省エネグループの方が多い。この差を日数に変換すると、1 カ月を 30 日とした場合に普段の生活が省エネグループでは 30 日中 16.2 日が標準電力需要パターン、一方で普段の生活が多消費グループでは 14.1 日が標準電力需要パターンであり、差は 2 日程度である。

季節変化を見ると、普段の生活が省エネグループでは春・秋に割合が増加し夏・冬に減少する傾向がある程度みられるのに対して、普段の生活が多消費グループでは季節変化は相対的に小さい。

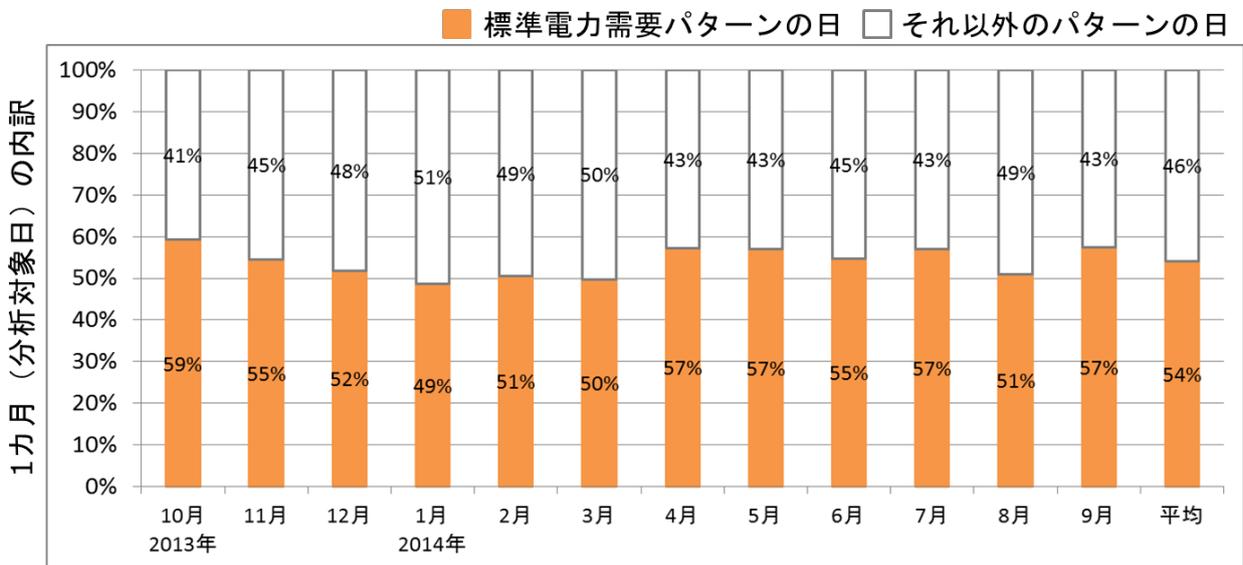


図 2-21 標準電力需要パターンの日数割合（普段の生活が省エネグループ）

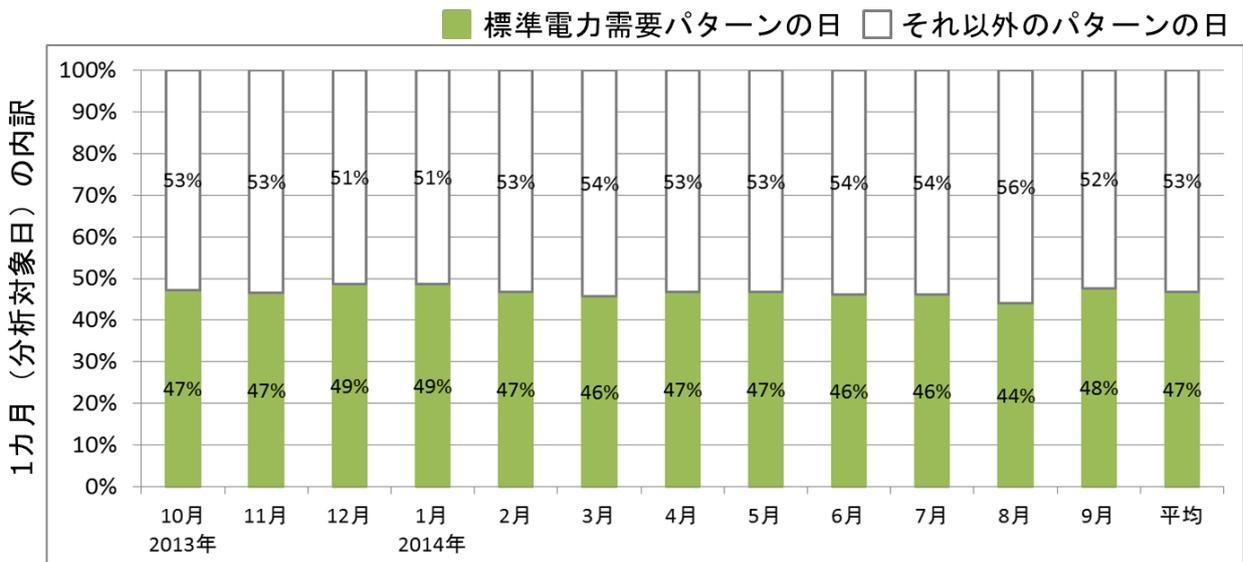


図 2-22 標準電力需要パターンの日数割合（普段の生活が多消費グループ）

2.4.4.3 標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日電力需要量の比較

つづいて、家庭における標準電力需要パターンでの1日電力需要量 $E_{day_{typical}}$ [kWh/日]とそれ以外のパターンでの1日電力需要量 $E_{day_{others}}$ [kWh/日]の比較について、普段の生活が省エネグループの場合を図2-23、普段の生活が多消費グループの場合を図2-24に示す。

普段の生活が省エネグループの場合、 $E_{day_{typical}}$ の全月平均が10.9 kWh/日であるのに対し $E_{day_{others}}$ の全月平均が14.0 kWh/日であり、差は3.1 kWh/日である。差が最も大きい月は2月・3月(4.0 kWh/日)、差が最も小さい月は6月(2.0 kWh/日)である。

一方で普段の生活が多消費グループの場合、 $E_{day_{typical}}$ の全月平均が14.0 kWh/日であるのに対し $E_{day_{others}}$ の全月平均が12.4 kWh/日であり、差は1.6 kWh/日である。

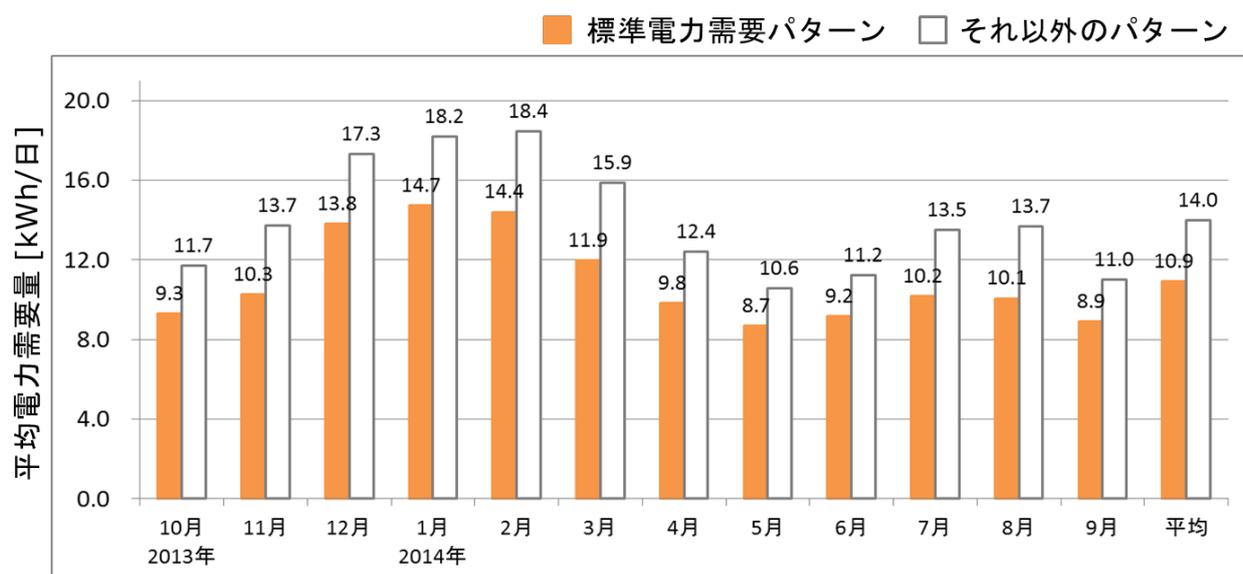


図 2-23 標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日電力需要量の比較(普段の生活が省エネグループ)

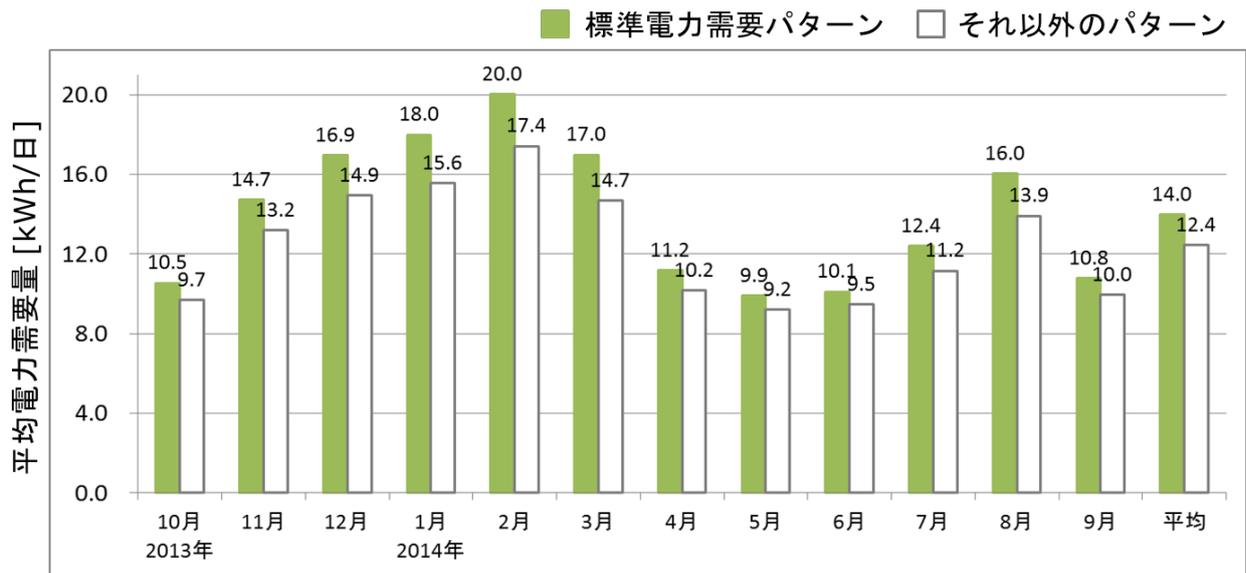


図 2-24 標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日電力需要量の比較(普段の生活が多消費グループ)

2.4.4.4 休日の割合の比較

月ごとの全分析対象日・標準電力需要パターンに含まれる日・それ以外のパターンに含まれる日における休日の割合について、普段の生活が省エネグループの場合を図 2-25、普段の生活が多消費グループの場合を図 2-26 に示す。

普段の生活が省エネグループの場合は、全月平均での標準電力需要パターンに含まれる日の休日割合は 29%，それ以外のパターンに含まれる日の休日割合は 42%である。標準電力需要パターンに含まれる日が 15 日、それ以外のパターンに含まれる日が 15 日に分類された場合で考えると、標準電力需要パターンに含まれる休日は 15 日中 4.4 日、それ以外のパターンに含まれる休日は 15 日中 6.3 日となり、標準電力需要パターンでは含まれる休日が 1.9 日少ない。また月別に見ると、12 月・1 月・6 月は標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの休日割合の差が大きい一方で、11 月・3 月は標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの休日割合の差が小さく、さらに 8 月は標準電力需要パターンの休日割合の方が多くなっている。

普段の生活が多消費グループの場合は、全月平均での標準電力需要パターンに含まれる日の休日割合は 22%，それ以外のパターンに含まれる日の休日割合は 47%である。先ほどと同様に休日割合を日数に変換すると、標準電力需要パターンに含まれる休日は 15 日中 3.3 日、それ以外のパターンに含まれる休日は 15 日中 7.1 日となり、標準電力需要パターンでは含まれる休日が 3.8 日少ない。また月別に見ると、12 月・1 月・5 月・6 月・9 月で標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの休日割合の差が大きく、それ以外のパターンに含まれる日の休日割合は 50%を超えている。

以上の結果から次のことが示唆される。普段の生活が多消費グループでは、電力需要カーブが平日と休日で異なる形状を取りやすく、これは平日と休日で異なる生活行動のパターンを取る傾向が強いことを示唆している。一方で普段の生活が省エネグループでは、電力需要カーブが平日と休日で似た形状を取りやすく、これは生活行動のパターンが平日・休日以外の要素に影響されやすいことを示唆している。

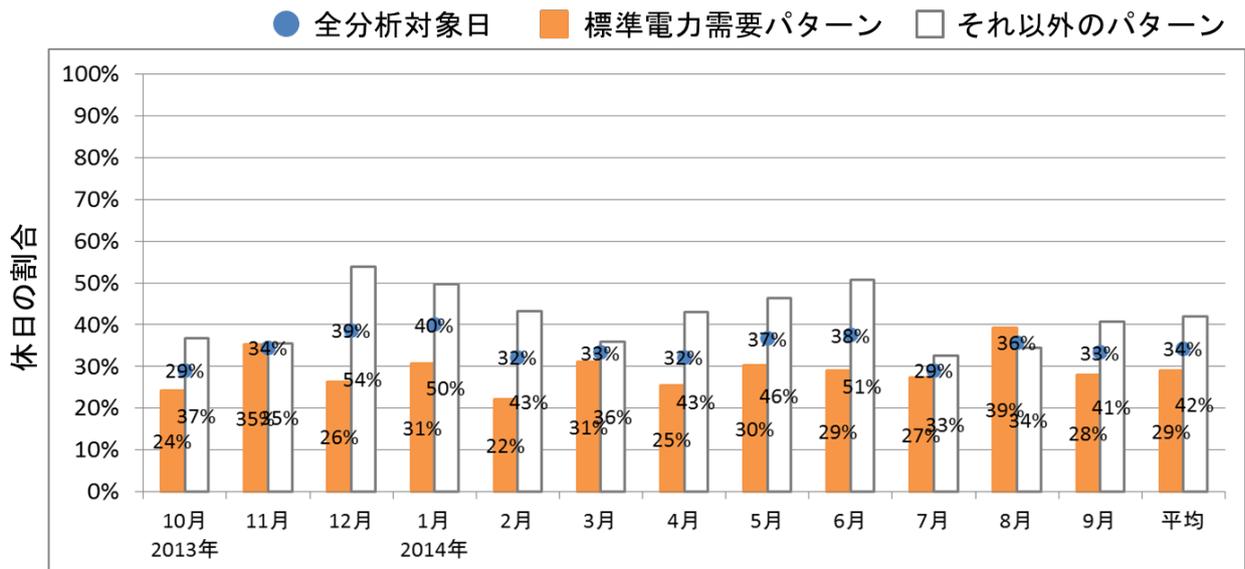


図 2-25 全分析対象日と標準電力需要パターン・それ以外のパターンに含まれる日の休日割合（普段の生活が省エネグループ）

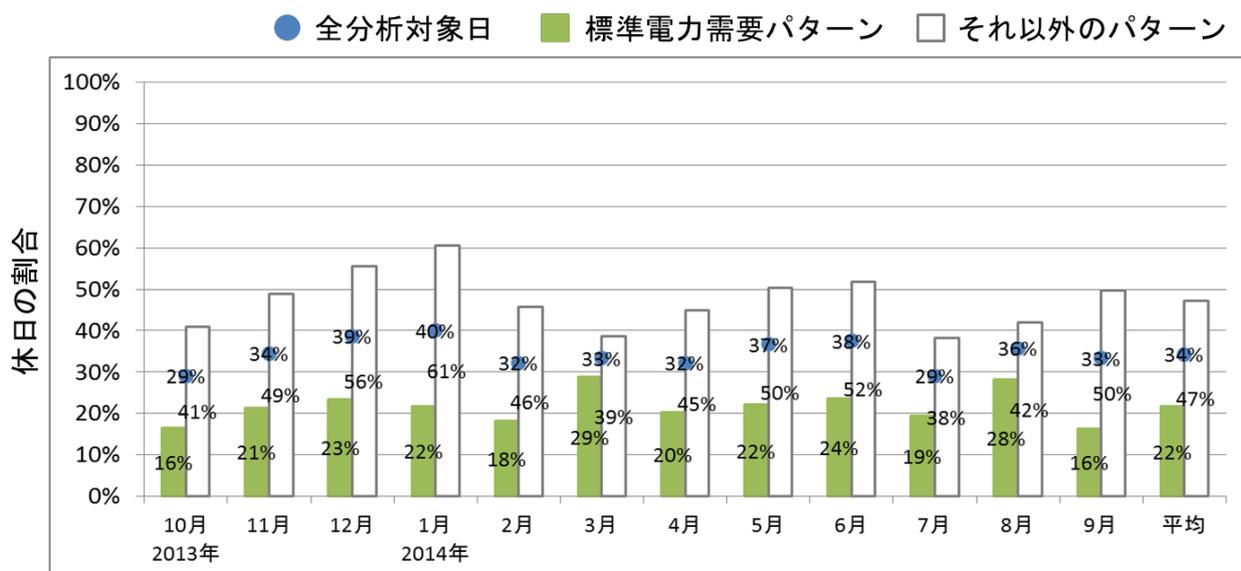


図 2-26 全分析対象日と標準電力需要パターン・それ以外のパターンに含まれる日の休日割合（普段の生活が多消費グループ）

2.4.4.5 グループ別の標準電力需要パターンの特徴の整理

標準電力需要パターンとそれ以外のパターンでの1日電力需要量の大小関係によって分析対象世帯を2つのグループに分類した。標準電力需要パターンの電力需要量の方が少ない家庭を「普段の生活が省エネグループ」、逆にそれ以外のパターンの電力需要量の方が少ない家庭を「普段の生活が多消費グループ」とすると、おおよそ80%の家庭が「普段の生活が省エネグループ」に含まれ、残り20%が「普段の生活が多消費グループ」に含まれた。それぞれのグループの電力需要の特徴について整理したものを表2-5に示す。少数派の「普段の生活が多消費グループ」の家庭は、「普段の生活が省エネグループ」の家庭はと比べて平均の1日電力需要量が多く、また平日/休日で電力需要パターンが分かれやすい傾向があることから、平日と休日で異なる生活行動のパターンを取る傾向が強い家庭であることが示唆される。

表 2-5 「普段の生活が省エネグループ」・「普段の生活が多消費グループ」の電力需要の特徴

	普段の生活が省エネグループ	普段の生活が多消費グループ
全日平均での 1日電力需要量	12.3 kWh/日	13.2 kWh/日
標準電力需要パターンの 日数割合 (30日中)	16.2 日	14.1 日
標準とそれ以外での 1日電力需要量の比較	標準が 3.1 kWh/日少ない	標準が 1.5 kWh/日多い
標準/それ以外での 休日割合 (15日中)	4.4 日/6.3 日	3.3 日/7.1 日

2.4.5 標準以外の個々の電力需要パターンの特徴

2.4.3・2.4.4 では標準電力需要パターンの特徴を確認することを目的として、標準以外のパターンについてはクラスタ分析によって5パターンに分類されたうちで標準を除いた4パターン平均での日数や1日電力需要量を示してきた。ここでは標準以外の電力需要パターンの特徴を確認することを目的として、4パターン平均ではなく標準以外の個々のパターンでの特徴を確認する。例えば2月の場合、分析対象世帯数は308世帯なので、これら世帯における標準以外の電力需要パターンは合計 $308 \times 4 = 1232$ パターンある。そこでこれらのパターンの特徴抽出のために、まずは各月のパターンに含まれる日数と標準に対する1日電力需要量の比率の分布を確認し、さらにクラスタ分析によって得られた標準以外の電力需要パターンをさらにクラスタ分析することで電力需要カーブの特徴を見る。

2.4.5.1 日数・需要量比率の分布

2月・5月・8月における標準以外のパターンに含まれる日の日数と需要量比率の分布を図2-27・図2-28・図2-29に示す。ここで凡例に示すパーセンテージは、対応する日数・需要量比率となる標準以外の個々の電力需要パターンの割合を表す。冬の2月における標準以外の個々の電力需要パターンは、日数1日・需要量比率1.3を頂点として山状に分布しており、これは標準以外の電力需要パターンは日数が1日で1日電力需要量が標準の1.3倍となるものが最も多いことを意味している。中間期の5月や夏の8月の場合も似たように、日数1日・需要量比率1.3~1.4を頂点としている。

一方で2月における分布の裾野を見ると、頂点を中心としてなだらかに分布しており、特に需要量比率が大きい方向に分布の裾野が伸びていることが分かる。これは、標準以外のパターンを個別に見た場合でも標準よりも電力需要が大きいパターンが多いことを示している。特に2月では需要量比率が2~4程度になる部分にも分布の裾野が伸びており、1日電力需要量が標準の2~4倍程度発生する日が日数は少ないが存在することを示している。この傾向は中間期の5月や夏の8月の場合も同様である。

このような分布の特徴から、標準以外の電力需要パターンを個別で見た場合でも、標準よりも電力需要量が大きくなる傾向が明らかになった。

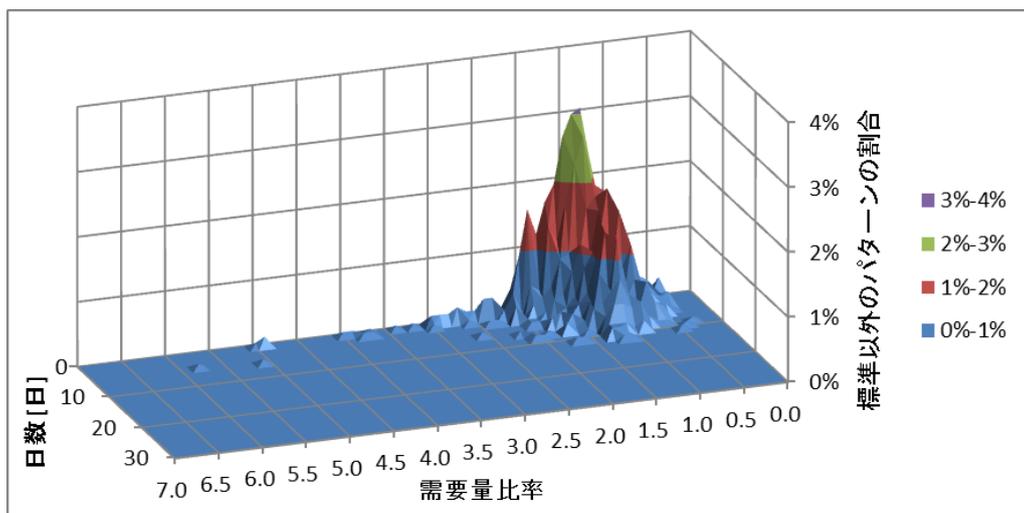


図 2-27 標準以外のパターンの需要量比率と日数の分布 (2月)

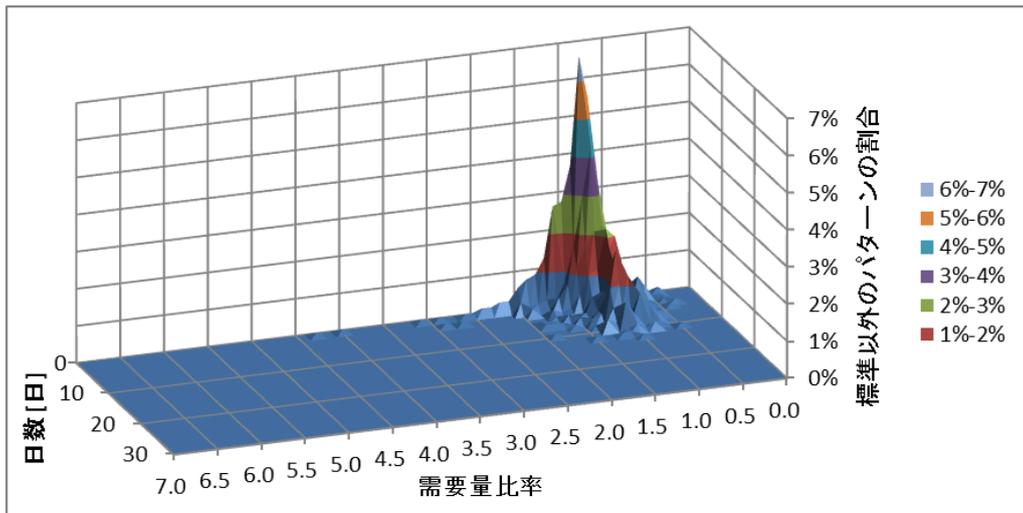


図 2-28 標準以外のパターンの需要量比率と日数の分布 (5月)

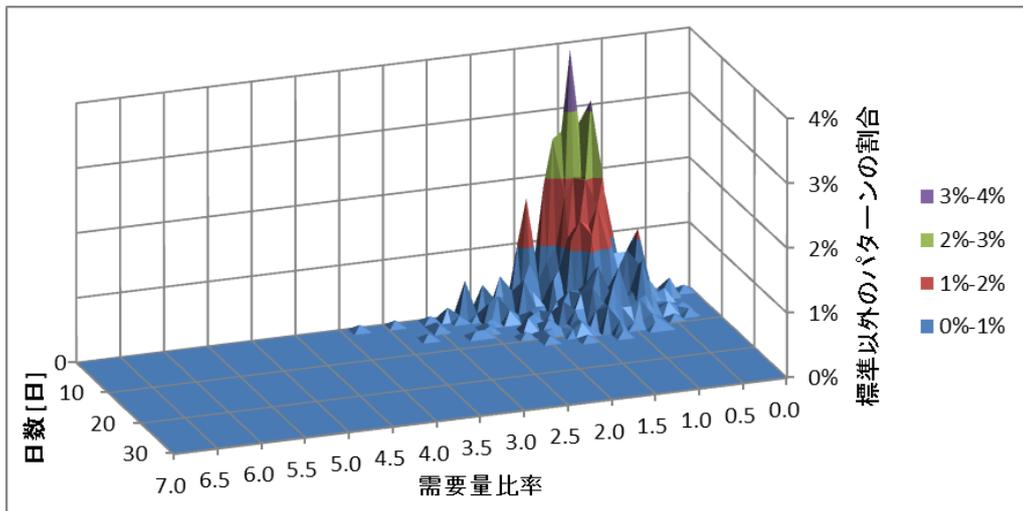


図 2-29 標準以外のパターンの需要量比率と日数の分布 (8月)

2.4.5.2 標準以外の電力需要カーブの特徴

つづいて、標準以外のパターンの電力需要カーブの特徴を確認する。2月・5月・8月における標準以外の個々の電力需要パターンをクラスタ分析したときのDBIの推移を図2-30に示す。なお、ここでのクラスタ分析手法は標準電力需要パターンを抽出するときと同様に最長距離法とし、分類するパターン数は2個～30個を検討した。パターン数の多い方が推移を辿って行くと、2月はパターン数が21個を下回った時点でDBIが増加し、5月はパターン数が10個を下回った時点でDBIが微増する。8月の場合、パターン数が28個を下回った時点でDBIが一旦減少し、26個を下回った時点でDBIが一気に増加する。以上の関係から分類するパターン数は、2月は21個・5月は10個・8月は26個とする。より少ないパターン数（例えばパターン数が6個の場合はいずれの月のDBIも小さい値を取る）も検討したが、単純に電力需要カーブのベースラインの高さ、すなわち1日電力需要量の大小によって分類され、ここで検討したいカーブの形状の違いの判別が困難であったので、上記のパターン数を採用した。

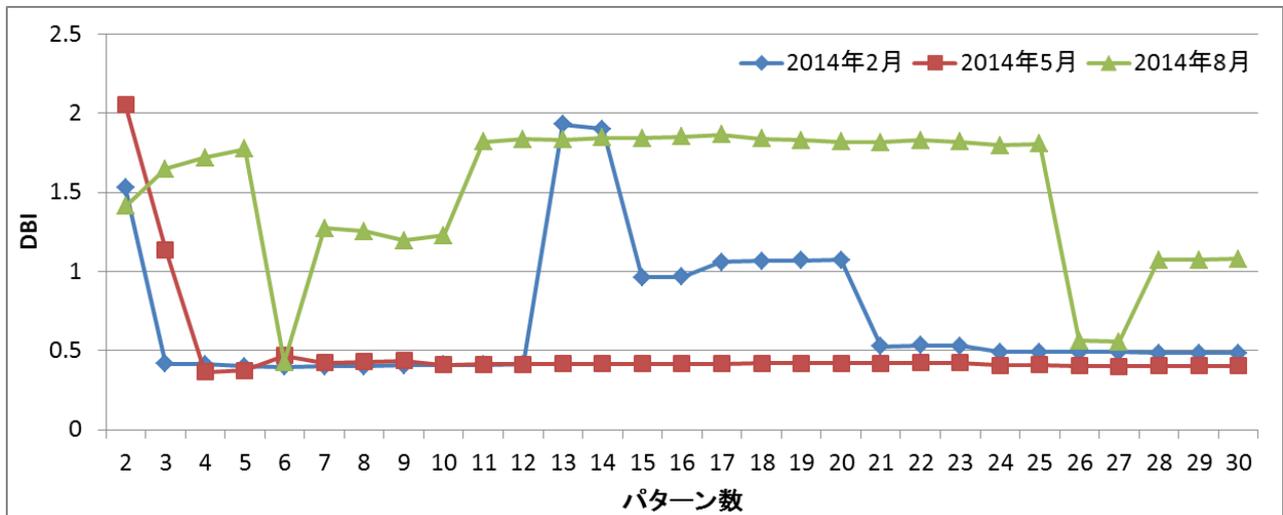


図 2-30 DBI の推移

つづいて、標準以外の個々の電力需要パターンのクラスタ分析について、月ごとに結果を確認する。

2月について、クラスタ分析によるパターンの構成を図2-31に示す。ここでは構成割合の大きい順に「パターン1」「パターン2」「パターン3」…と番号付けしている。このとき最も構成割合の大きいパターン1が49%と全体のおよそ半数を占めている。つづいてパターン2が32%を占め、パターン3・4・5がそれぞれ3~4%を占めている。以上のパターン1~5の5つで全体の93%を占めている。この5つのパターンを標準以外の電力需要パターンの中での代表的なパターンとして、パターンに含まれる日数・休日数の平均を図2-32に示す。平均日数が最も多いのはパターン1(4.1日)、つづいてパターン2・4・5の平均日数が3.1~3.4日程度で、平均日数が最も少ないのはパターン3(2.1日)である。平均休日数が最も多いのもパターン1(1.7日)、一方で平均休日数が最も少ないのはパターン4(1.0日)である。パターンに含まれる日に対する休日の割合で見ると、休日の割合が最も多いのはパターン3(52%)で休日の割合の方が平日の割合よりも多くなっている。一方で、休日の割合が最も少ないのはパターン4(29%)である。標準以外の代表的な電力需要パターンと標準電力需要パターンにおける電力需要カーブを図2-33に示す。標準電力需要パターンにおける電力需要カーブは朝7時(1100W)と夜20時(1000W)を

ピークとする 2 山のカーブを描いている。これに対して、標準以外の電力需要パターンの中で最も典型的なパターン 1 はピークがより小さく、1 つ目のピークは朝 7 時に 650 W、2 つ目のピークは夜 21 時に 750 W に達する。パターン 1 は他のパターンと比べてカーブがなだらかであることから、外出時間の長かった日や比較的温暖で暖房利用が少なかった日などがこのパターンに該当すると推察される。パターン 2 は朝 7 時から夜 23 時にかけて標準よりも大きな電力需要が発生している。2 つのピークも朝 7 時に 1200 W・夜 20 時に 1450 W というように、パターン 1 の 2 倍程度に達している。パターン 2 をより極端にしたのがパターン 5 であり、パターン 5 は朝のピークが特に顕著で朝 7 時に 2000 W に達している。パターン 2・5 では朝から夜まで長時間にわたって標準パターンよりも電力需要が大きくなっており、このことから比較的寒冷で暖房利用が多かった日や、頻繁には使用しない家電製品が使用された日などがこれらのパターンに該当すると推察される。パターン 3 は日中の電力需要増加が特徴であり、昼 12 時に 1500 W をとる 1 山のカーブを描くのが特徴である。このことからパターン 3 は日中の在宅者数が多い日などが該当すると推察され、これはパターン 3 の休日割合が多いことと対応している。パターン 4 は標準と比べて夜のピークが大きくなるのが特徴で朝 7 時に 1300 W・夜 22 時に 1900 W に達する一方、日中の電力需要はパターン 4 と標準でさほど変わらない。このことからパターン 4 は日中よりも夜間の活動が活発だった日などが該当すると推察され、これはパターン 4 の平日割合が多いことと対応している。

5 月について、クラスタ分析によるパターンの構成を図 2-34 に示す。最も構成割合の大きいパターン 1 が 86 % を占め、つづいてパターン 2 が 6 %、パターン 3 が 3 % と続く。以上のパターン 1~3 の 3 つで全体の 95 % を占めている。この 3 つのパターンを標準以外の電力需要パターンの中での代表的なパターンとして、パターンに含まれる日数・休日数の平均を図 2-35 に示す。日数の多い順で見るとパターン 1 (3.6 日) > パターン 3 (2.9 日) > パターン 2 (2.5 日) となり、休日数の多い順でも見てもパターン 1 (1.7 日) > パターン 3 (1.3 日) > パターン 2 (1.3 日) となり順番は同様である。パターンに含まれる日に対する休日の割合で見ると、パターン 1 が 46 %・パターン 2 が 50 %・パターン 3 が 46 % と大きな差はない。標準以外の代表的な電力需要パターンと標準電力需要パターンにおける電力需要カーブを図 2-36 に示す。標準電力需要パターンにおける電力需要カーブは朝 7 時 (500 W) と夜 19 時 (550 W) をピークとする 2 山のカーブを描いている。パターン 1 における電力需要カーブは標準とよく似ている。これは標準電力需要パターンを特定するためのクラスタ分析のパターン数を一律で 5 個としたために、5 月では過剰に細かく分類されている可能性を示唆している。また、ここでは複数の家庭における標準電力需要パターンと標準以外のパターンをそれぞれ平均化して表示しているため、個々の家庭で比較した場合には、パターンの違いが現れる可能性もある。これに対してパターン 3 は朝夜のピークが大きく、朝のピークは 6 時に 1000 W・夜のピークは 21 時に 1350 W に達している。一方でパターン 2 は標準と比べて朝 8 時から夜 24 時にかけて電力需要が増加しており、夜 19 時に 900 W をとる 1 山のカーブを描く。パターン 3 は相対的に平日の割合が多い一方でパターン 2 は相対的に休日の割合が多いことから、パターン 3 は平日寄りの生活行動、パターン 2 は休日寄りの生活行動であることが考えられ、これはカーブの形状と対応している。

8 月について、クラスタ分析によるパターンの構成を図 2-37 に示す。最も構成割合の大きいパターン 1 が 46 % を占め、つづいてパターン 2 が 14 %、パターン 3 が 12 %、パターン 4 が 10 %、パターン 5 が 4 % と続く。以上のパターン 1~5 の 5 つで全体の 86 % を占めている。この 5 つのパターンを標準以外の電力需要パターンの中での代表的なパターンとして、パターンに含まれる日数・休日数の平均を図 2-38 に示

す。日数が最も大きいのはパターン 3・4 (4.2 日) で、残りのパターン 1・2・5 の日数は 3.4~3.8 日である。休日数が最も少ないのはパターン 5 (1.0 日) で、残りのパターン 1~4 の休日数は 1.3~1.4 日である。休日の割合で見ると、パターン 1・2 (37%) > パターン 3・4 (32%) > パターン 5 (26%) の順番で休日の割合が多くなっている。標準以外の代表的な電力需要パターンと標準電力需要パターンにおける電力需要カーブを図 2-39 に示す。標準電力需要パターンにおける電力需要カーブは夜 21 時に 650 W のピークを取り、朝には明確なピークは存在しない。パターン 1 における電力需要カーブもほぼ同様な形状をしており、夜 22~24 時においてパターン 1 のカーブの方が僅かに小さい値を取る。これも 5 月の場合と同様に、日々の電力需要カーブが過剰に細かく分類されている可能性を示唆しており、また個々の家庭で比較した場合にはパターンの違いが現れる可能性も存在する。パターン 3・4 はパターン 1 よりも夜のピークがさらに大きくなっており、パターン 3 のピークは夜 20 時に 1000 W、パターン 4 のピークは夜 21 時に 1150 W に達している。パターン 3 は夜の冷房利用が多かった日などが該当すると推察され、パターン 4 では昼の電力需要も大きいことから日中にも冷房利用が多かった日などが該当すると推察される。パターン 2 は日中の 13 時に電力需要がピークの 900 W に達するのが特徴で、これはパターン 2 の休日割合が多いことに対応している。一方でパターン 4 は深夜に電力需要のピークが来ており、夜 0 時に 1000 W に到達している。深夜の電力需要が大きいことから、夜間の冷房利用が多かった日などが該当すると推察される。

以上、標準以外の個々の電力需要パターンは、ピークとなる時間帯や大きさといった電力需要カーブの形状に違いが見られる。また一部のパターンについては、平日・休日の割合などから類推される生活行動との関係性と対応している部分があることを確認した。

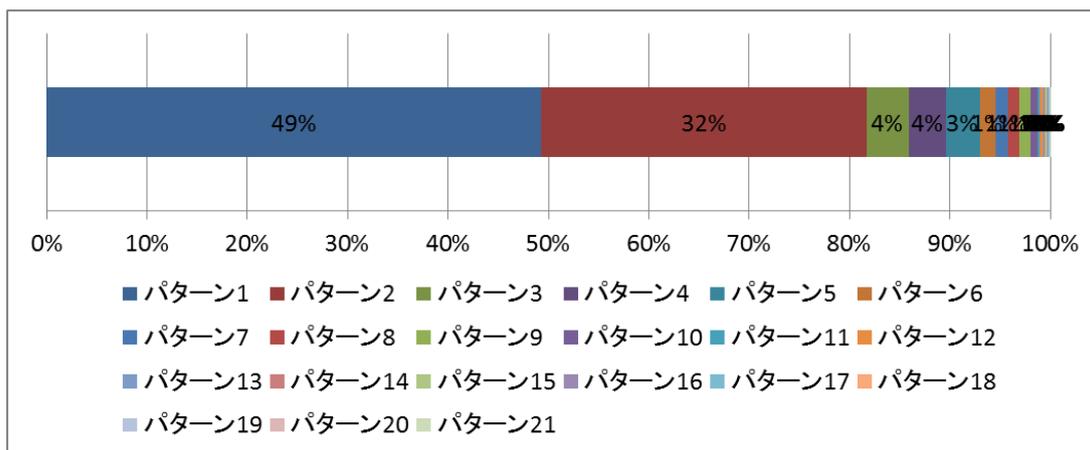


図 2-31 標準以外の電力需要パターンのクラスタ分析によるパターン構成 (2月)

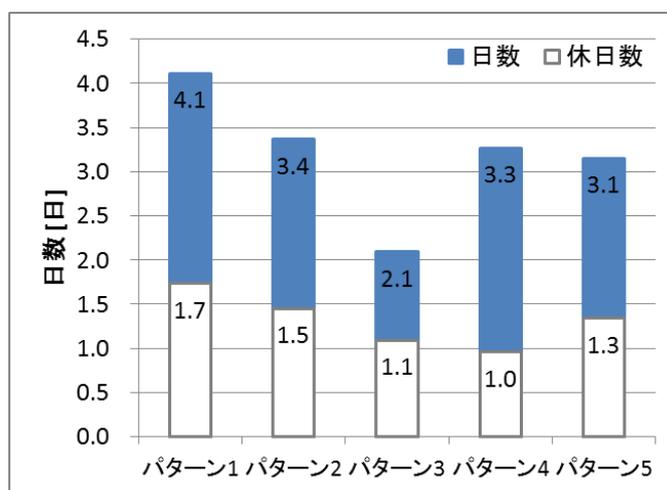


図 2-32 標準以外の代表的な電力需要パターンの日数・休日数 (2月)

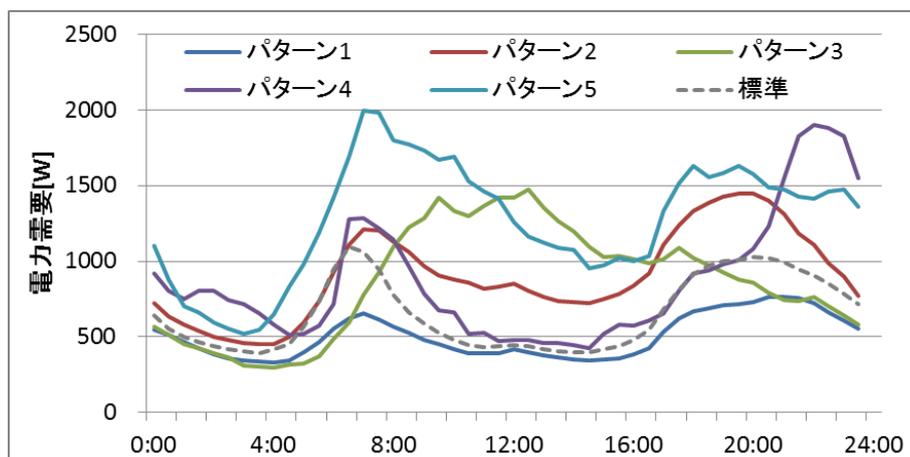


図 2-33 標準以外の代表的な電力需要パターンと標準電力需要パターンでの電力需要カーブ (2月)

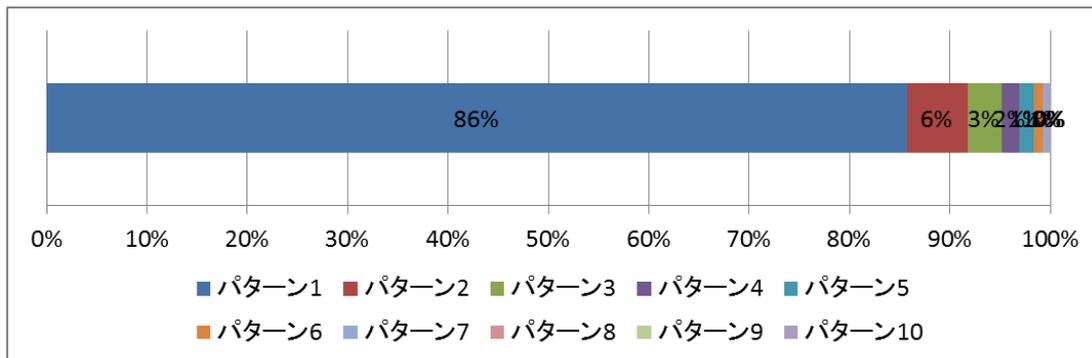


図 2-34 標準以外の電力需要パターンのクラスタ分析によるパターン構成 (5月)

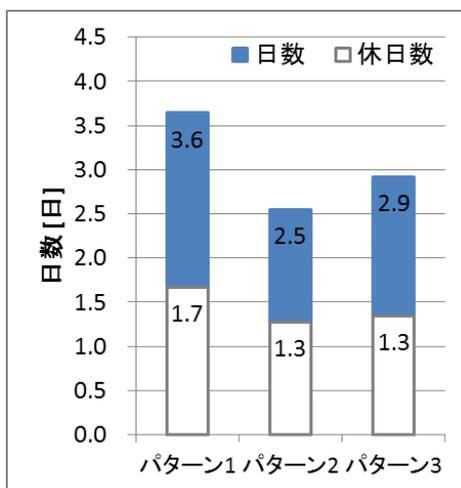


図 2-35 標準以外の代表的な電力需要パターンの日数・休日数 (5月)

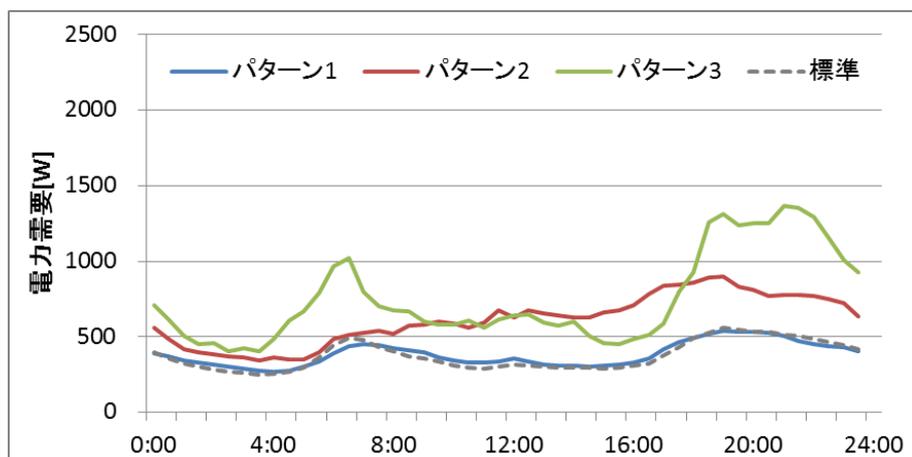


図 2-36 標準以外の代表的な電力需要パターンと標準電力需要パターンでの電力需要カーブ (5月)

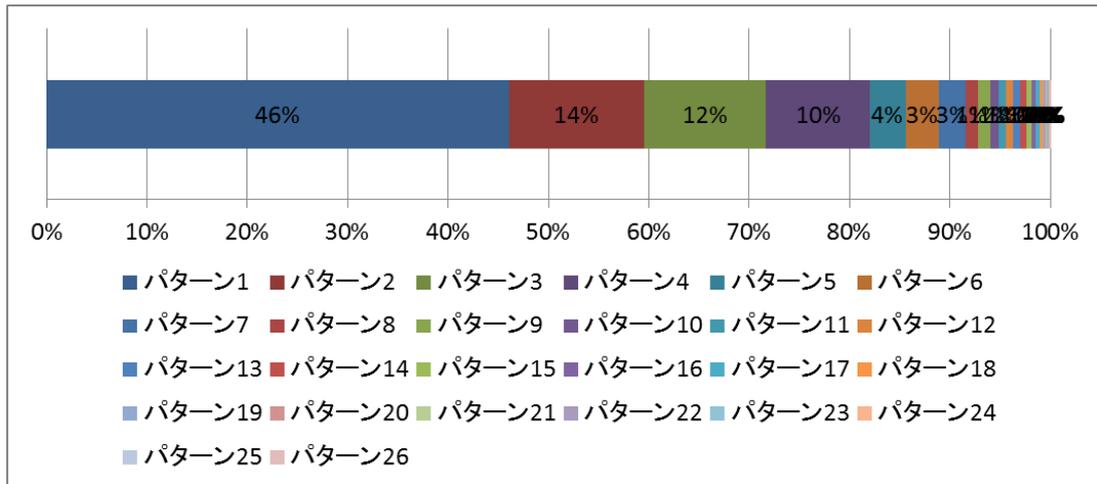


図 2-37 標準以外の電力需要パターンのクラスタ分析によるパターン構成 (8月)

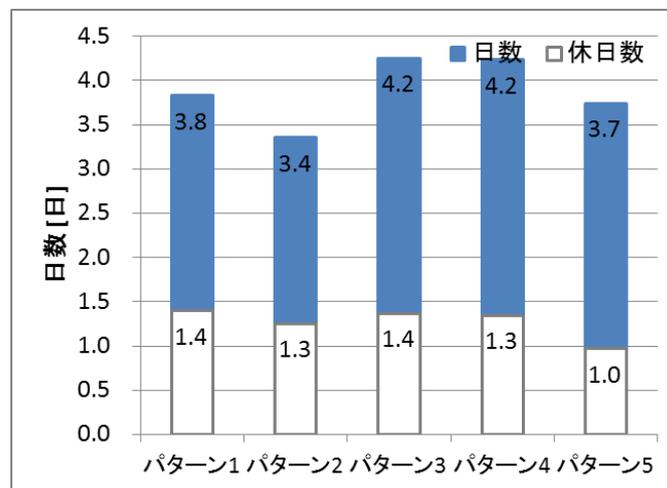


図 2-38 標準以外の代表的な電力需要パターンの日数・休日数 (8月)

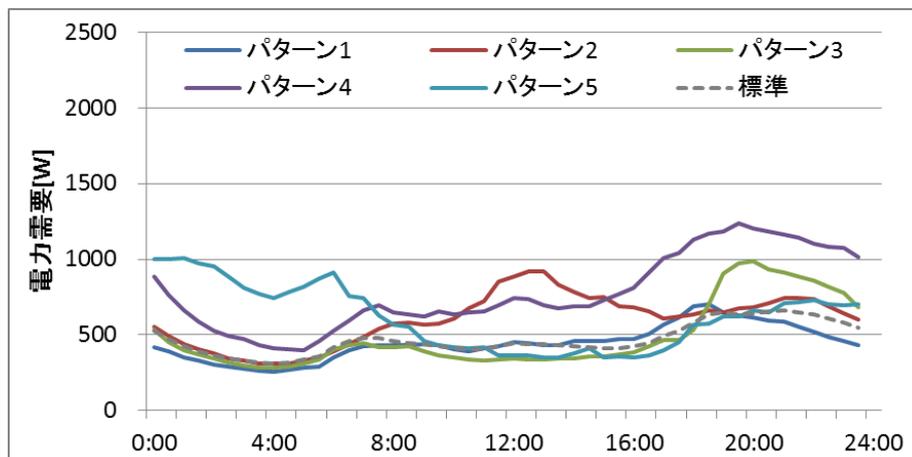


図 2-39 標準以外の代表的な電力需要パターンと標準電力需要パターンでの電力需要カーブ (8月)

2.5 まとめ

第2章では、省エネルギーアドバイスを目的とした家庭電力需要データの分析について述べた。

分析手法としては、それぞれの家庭の電力需要カーブ 1 か月分をクラスタ分析によって数パターンの電力需要カーブに分類した。クラスタ分析の分類アルゴリズムおよびパターン数の選択に関しては、クラスタ分析の妥当性を評価する指標に基づいて最長距離法を用いて5パターンに分類することとした。

そして、電力需要カーブのパターンの中で最も日数の多いものを「その家庭が1ヶ月間で最も普段の生活をしたときに発生する電力需要カーブのパターン」として「標準電力需要パターン」とした。標準電力需要パターンの特徴を確認するために、それ以外のパターンと日数・1日電力需要量・休日割合を比較した。また標準以外の個々の電力需要パターンの特徴を確認するために、需要量比率と日数の分布を確認した。

比較から明らかになった電力需要パターンの特徴を再確認する。

まず、標準電力需要パターンの平均的な特徴から次のことが明らかになった。クラスタ分析によって類推された「普段の生活をした日」とは、およそ2日に1日の頻度で現れる日であり、普段の生活でなかった日に比べて1日の電力需要量が2.0 kWh/日ほど少なく、休日の日数も普段の生活でなかった日に比べて1ヶ月あたり2.4日程度少ない。

また、グループ別の標準電力需要パターンの特徴から次のことが明らかになった。普段の生活をした日の電力需要量が少なくなる家庭（普段の生活が省エネグループ）を抽出すると、全日平均での電力需要量がそれ以外の家庭と比べて0.9 kWh/日ほど少なく、電力需要カーブが平日と休日で似た形状を取りやすく、生活行動のパターンが平日・休日以外の要素に影響されやすいことを示唆している。

さらに、標準以外の電力需要パターンの特徴から次のことが明らかになった。普段の生活でなかった日は普段の生活をした日よりも電力需要が多く、特に1日の電力需要量が普段の2倍から4倍程度発生する日も日数は少ないが存在する。また、一部の普段の生活でなかった日における電力需要カーブの形状は、平日・休日の割合との関係で説明することができる。

今回の分析では、標準とそれ以外の電力需要パターンを分ける要因や両者のパターンで休日の割合が異なる理由についての議論は十分に行えていない。これらを議論するためには、家庭の世帯属性（家族人数・家族構成など）や日々の生活行動に関する情報を別途収集して、これらの情報と家庭電力需要データを紐付けて分析する必要がある。データ分析のみの研究アプローチには以上のような限界があるが、スマートメーターによって収集・蓄積される電力需要データの多くは個人情報保護の観点から世帯属性・生活行動に関する情報が不明であって、そのようなデータを利用して日々の電力需要カーブから家庭ごとのパターンを抽出し、パターンごとの電力需要や日数の特徴を把握できた点では一定の価値があると考えられる。

この電力需要データの分析の目的は、分類した電力需要カーブのパターンから類推される生活行動パターンと電力需要の関係性を調べて、省エネルギーアドバイスを有用な情報が得られるか検討することである。今回の電力需要カーブで明らかになった生活行動パターンと電力需要の関係性とは、次のとおりである。クラスタ分析で類推される「普段の生活をした日」には電力需要が少なく省エネ型の生活を

過ごしており，一方で「普段の生活でなかった日」には電力需要が多く，場合によっては普段の 2 倍から 4 倍程度の需要を発生する日も存在する。

そこで，クラスタ分析によって分類された電力需要のパターンから「普段の生活をした日」と「普段の生活よりも電力需要が多かった日」を特定して，これらの日の電力需要カーブを比較することで電力需要が増加する時間帯を特定することができる。この生活行動パターンと電力需要の関係性を活用して，第 3 章では家庭に対する省エネルギーアドバイスレポートを提案する。

第3章 データ分析に基づく省エネアドバイス実証実験

3.1 概要

第2章では、個々の家庭における電力需要カーブ1か月分を最長距離法によるクラスタ分析によって5つのパターンに分類し、電力需要カーブのパターンの中で最も日数の多いものを「標準電力需要パターン」と定義した場合、標準電力需要パターンでの1日の電力需要量はそれ以外のパターンと比べて2kWh程度少ないことが明らかになった。その結果から、標準電力需要パターンに含まれる日が「その家庭が1ヶ月間で最も普段の生活をした日であり、1日の電力需要量が少なく省エネ型の生活を過ごしていた」ということが分かり、各家庭の生活行動パターンとそのときの電力需要の関係性を表す情報が得られることを示した。

本研究と並行して行われている研究[62]でも、家庭の生活行動パターンと電力需要の関係性を明らかにすることを目的とする家庭電力需要データの分析手法を開発している。この研究では、家庭の大まかな生活リズムに着目して、それぞれの家庭における1週間の電力需要カーブを離散フーリエ変換しスペクトルが最大となる周期を特徴量として家庭を分類している。この分析によって明らかになった関係は、次のとおりである。フーリエ変換の結果、多くの家庭は12時間周期か24時間周期のいずれかのスペクトルが最大となり、12時間周期を最大スペクトルとする家庭は朝型生活の傾向が見られ、一方で24時間周期を最大スペクトルとする家庭は夜型生活の傾向が見られた。そして冬以外の季節では、朝型生活の家庭よりも夜型生活の家庭の方が1日の電力需要量が大きかった。以上の結果から、「朝型生活の家庭は夜型生活の家庭よりも省エネ的な生活を過ごしている」という生活リズムと電力需要の関係性を示している。分析手法・結果の詳細については、付録の(ア)で述べる。

第3章では、このような生活行動と電力需要の関係性に関する情報をフィードバックすることによる家庭の電力需要削減効果を検証するために、省エネアドバイスレポートを提案する。提案する省エネアドバイスレポートの中でのクラスタ分析による情報として、標準電力需要パターンとそれ以外の4パターンのなかで1日の電力需要量が多いパターンに着目する。具体的な情報内容としては、標準電力需要パターンに含まれる日とそれ以外の電力需要量が多いパターンに含まれる日を示し、これらのパターン同士の電力需要カーブを比較する。こうすることで、普段の生活をした日と比べて特に電力需要が多かった日と時間帯を指摘し、この日時における家庭生活の振り返りを促すことで電力需要を増加させる要因を見つけるきっかけを与える。

この省エネアドバイスレポートを送付することによる家庭の電力需要削減効果を評価するために、実証実験を行った。実証実験の流れを図3-1に示す。スマートメーターが設置されている家庭の中から実証実験に参加してくれる家庭を募り、参加の承諾が得られた家庭78世帯に対して省エネアドバイスレポートを作成・送付した。送付する省エネアドバイスレポートのバリエーションを3種類用意し、電力需要の特徴に応じて各家庭に対して最も適していると考えられるレポートを送付する。そして、省エネアドバイスレポートを送付した家庭と送付しなかった家庭の電力需要の推移を比較することで、省エネアドバイスレポートの送付による省エネルギー効果を評価した。また省エネアドバイスレポートにアンケートを同封して、レポートの内容に関する居住者の意識を調査した。

第3章の構成について述べる。3.1（本節）では第3章の概要について述べる。3.2・3.3では実証実験の手法について述べる。まず3.2では、実証実験に参加する参加する家庭の募集方法、省エネアドバイスレポートの作成・送付方法とその内容、レポートに同封するアンケートの内容について述べる。つづいて3.3では、省エネアドバイスレポートの送付による家庭の省エネルギー効果を評価する手法について述べる。3.4では、アンケートによるレポート内容に対する意識調査の結果と省エネルギー効果の評価結果、およびその考察について述べる。

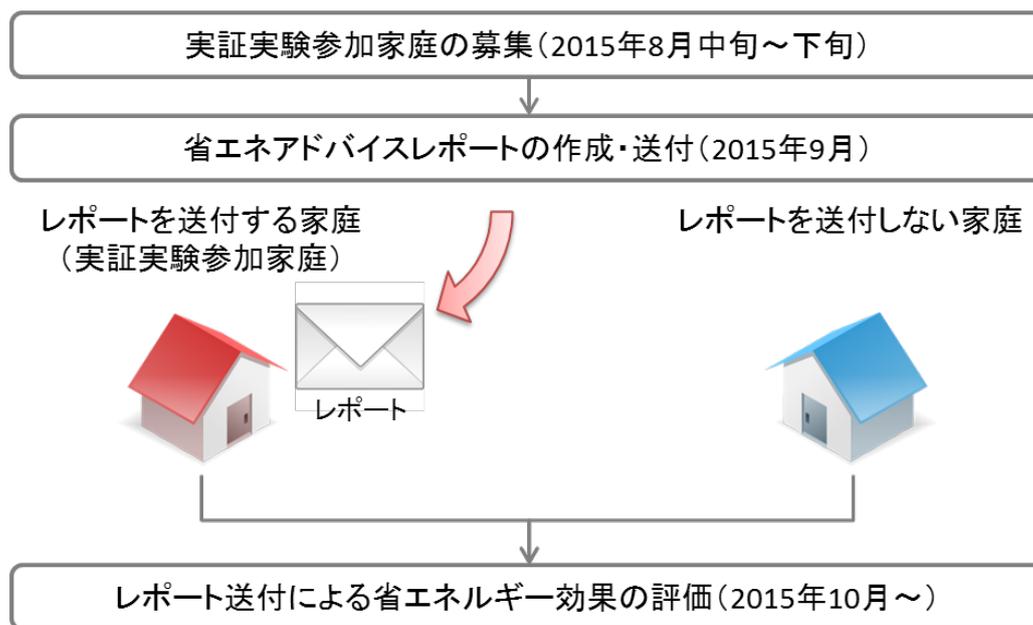


図 3-1 実証実験の流れ

3.2 省エネアドバイザーレポート

3.2.1 実証実験参加家庭の募集

省エネアドバイザーレポートを作成する前にまず、2015年8月中旬から下旬にかけて、実証実験に参加してもらえる家庭を募集した。第2章で分析を行なったスマートメーターが設置されている1070世帯のうち過去に別のアンケート調査に協力している300世帯に対して、実証実験に対する協力世帯募集文書を8月10日ごろに送付した。募集文書を送付する条件として「過去に別のアンケート調査に協力している」点で世帯を分類した理由としては、このような世帯は実証実験にも協力的であると考えられ、実証実験に参加してもらえる家庭の割合が高いただろうと判断したためである。募集文書には、実証実験全体の大枠と、参加した家庭に送付される省エネアドバイザーレポートとアンケートの概要、および参加家庭には謝礼として1000円程度の謝品（東大グッズ）がプレゼントされる旨を記載している。協力を申し出る家庭には協力世帯募集文書に同封の協力同意書を8月24日ごろまでに返送してもらった。結果として、募集文書を送付した300世帯のうち78世帯から実証実験への参加の申し出がなされ、募集文書を送付した家庭に対する参加家庭の割合は26%であった。

なお、今回の実証実験は東京大学研究倫理審査委員会の承認を得て実施している。

以上のように、実証実験に参加する家庭を募集して、参加を希望した家庭を実験群とする形式を「オプト・イン（opt in）型」の実証実験と呼ぶ。一方で、最初は全ての家庭を実験群として実証実験を行う旨を伝え、実験への参加を希望しないことを連絡した家庭を実験群から除く形式を「オプト・アウト（opt out）型」の実証実験と呼ぶ。一般的に、オプト・イン型で実証実験を行う場合には、オプト・アウト型に比べて実験に協力的である家庭の方が参加しやすい傾向にあるので、実験の効果が大きめに出る傾向がある[63]。今回の実証実験で言えば、省エネアドバイザーレポートの送付を希望する家庭の方がレポートへの興味が強く、そのためレポート送付による電力需要削減効果も出やすい傾向にあると考えられる。

しかしながら、研究対象となっている家庭の多くは今まで省エネアドバイザーレポートを受け取った経験がなく、いきなりオプト・アウト型で実証実験を行うことに対しては強い抵抗感を持つことが予想される。また個人情報の保護の観点から、今回の実証実験をオプト・アウト型で実施することは、東京大学研究倫理審査委員会に承認されていない。

また実証実験参加家庭数が多い場合には、レポートを送付する群と送付しない群の2群に分けて実証実験を行うことによって、疑似的にオプト・アウト型を再現することも可能である。しかしながら今回の実証実験は78世帯と少なく、これを2群に分けた場合にはレポート送付効果の有意性を検証できなくなることが懸念される。

今回の実証実験は「新しく開発した電力需要データの分析手法に基づく、生活行動と電力需要の関係性に関する情報をフィードバックすることによる家庭の省エネルギー効果を検証する」ための初めての試みであり、そのような実験の位置づけも考慮して今回はオプト・イン型で実証実験を行うこととし、後述のとおり全ての参加家庭にレポートを送付することとした。

3.2.2 省エネアドバイスレポート・アンケートの作成・送付

実証実験への協力の申し出があった 78 世帯を実証実験参加家庭とし、9 月上旬から中旬にかけて省エネアドバイスレポートと同封するアンケートを作成し、9 月 28 日にレポート・アンケートを送付した。

省エネアドバイスレポートを作成するにあたって、実証実験に参加する 78 世帯の 2015 年 5 月 1 日～8 月 30 日の家庭電力需要データを取得した。省エネアドバイスレポートは「A 夜型生活タイプ」「B 普段の生活が省エネタイプ」「C その他タイプ」の 3 種類を用意し、各家庭にはその家庭に最も適していると判断されるレポート 1 種類を送付した。「A 夜型生活タイプ」はフーリエ変換によって夜型生活の傾向が強いと判定された家庭のグループ、「B 普段の生活が省エネタイプ」は A 以外でクラスタ分析によって「普段の生活が省エネグループ」に該当する家庭のグループ、「C その他タイプ」は A でも B でもない家庭のグループに対して送付される。

グループ分類のフローチャートを図 3-2 に示す。まず、各家庭の家庭電力需要データを 1 週間ごとに周波数解析を行ない、「6～8 月の 13 週間の中で、夜型生活（24 時間周期のスペクトルが最大）と判定される週が 13 週のうち 7 週以上あること」「8 月の 4 週間の中で、夜型生活（24 時間周期のスペクトルが最大）と判定される週が 1 週以上あること」「8 月の深夜電力需要が平均以上であること」で条件分岐を行い、上記の 3 条件がすべて満たされる家庭は「A 夜型生活タイプ」とする。

3 条件のうち 1 つでも満たされないものがある家庭については、電力需要データのクラスタ分析の結果で条件分岐を行う。それぞれの家庭における 8 月の電力需要カーブを最長距離法によるクラスタ分析によって 5 つのパターンに分類し、日数が最も多いパターンをその家庭における 8 月の標準電力需要パターンとした。そして「8 月の標準電力需要パターンの 1 日電力需要量がそれ以外のパターンの 1 日電力需要量より小さいこと」で新たに条件分岐を行い、このクラスタ分析に関する条件を満たす家庭を「B 普段の生活が省エネタイプ」、満たさない家庭を「C その他タイプ」とする。

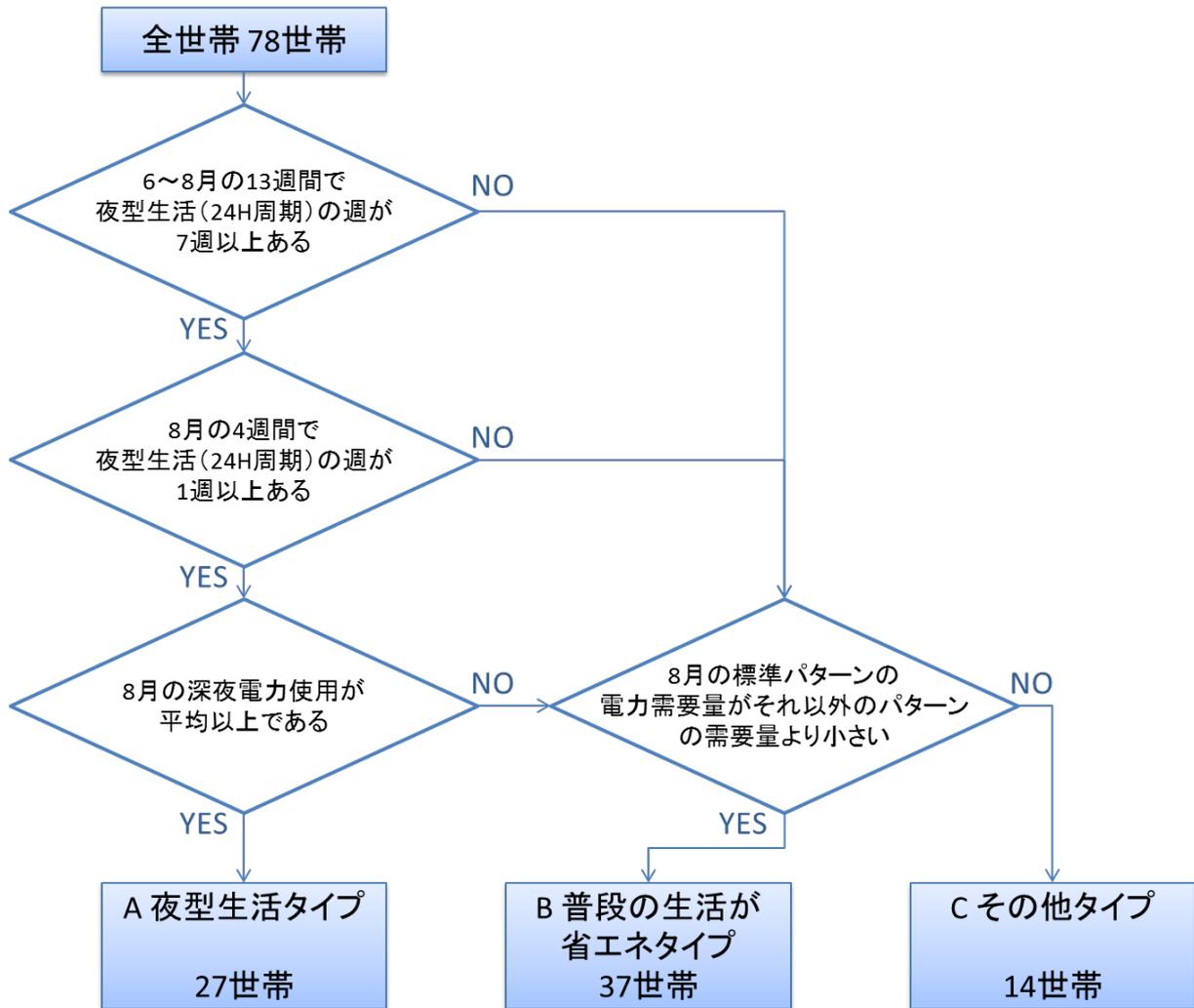


図 3-2 実証実験参加家庭のグループ分類フローチャート

3.2.3 省エネアドバイスレポートの内容

それぞれの家庭の電力需要データに基づいて、電力需要の特徴と省エネアドバイスを記した省エネアドバイスレポートを設計した。省エネアドバイスレポートの種類は、「A 夜型生活タイプ」「B 普段の生活が省エネタイプ」「C その他タイプ」の3つであり、各家庭にはA・B・Cのうちいずれか1種類のレポートが送付される。設計した省エネアドバイスレポートの例を図 3-3・図 3-4・図 3-5 に示す。実証実験に参加した家庭の特定されるのを回避するために、図中における一部の文言を **ピンク色** で上書きしている。実際のレポートでは、**HEMS** と書かれた部分には実証実験に参加した家庭が利用している HEMS サービスの名称が入り、**日記サービス** と書かれた部分には HEMS サービスに付随した家庭内での日記共有サービスの名称が入る。

省エネアドバイスレポート（紙面上のタイトルは「住まいの省エネアドバイスレポート」となっている）は、「他世帯との比較」「1日の電力の使いかた」「あなたへの省エネアドバイス」の3つの項目で構成されている。それぞれの項目の目的としては、まず「他世帯との比較」によってレポートの送り先である家庭が他の家庭と比べて電力需要が多いのか少ないのかという大まかな特徴を理解してもらい、つづいて「1日の電力の使いかた」によって電力需要を時間帯別に比較することで詳細な特徴を理解してもらい、最後に「あなたへの省エネアドバイス」によって電力需要の特徴を考慮してその家庭に適した対策を生活行動と関連付けて提案している。

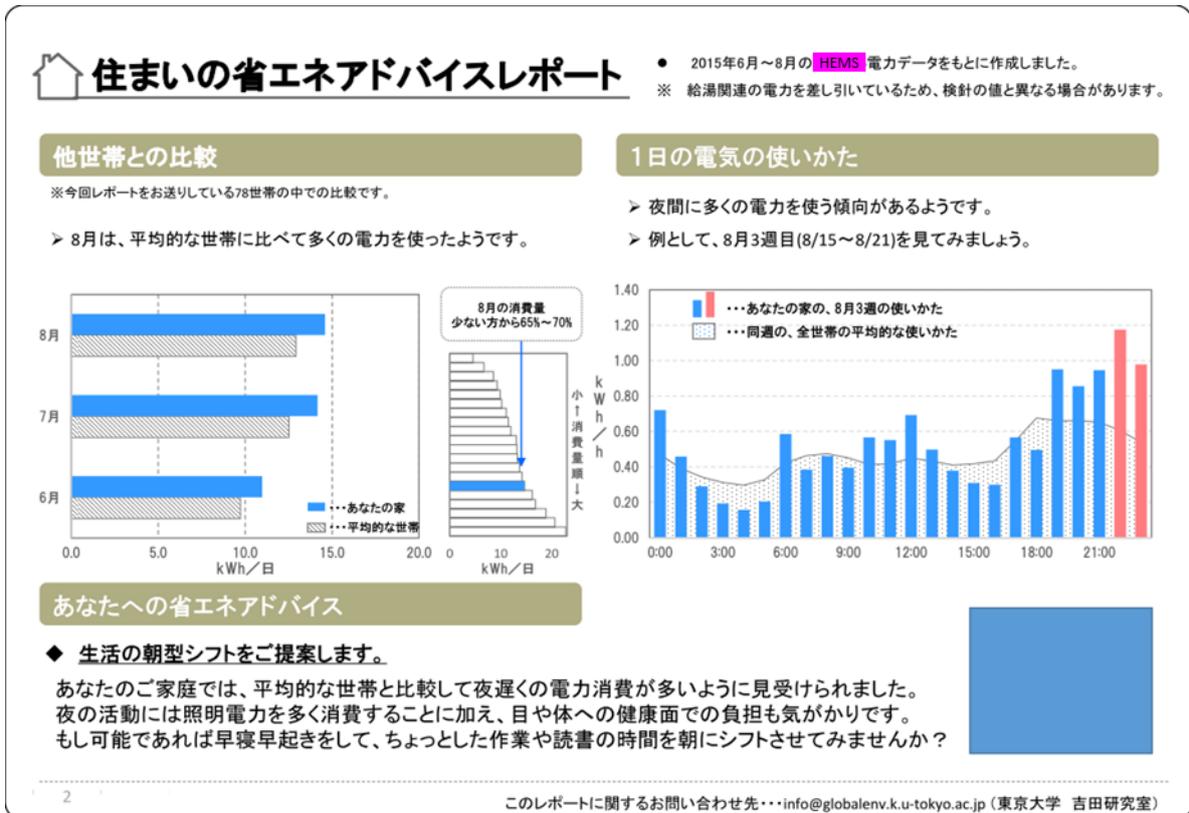


図 3-3 省エネアドバイスレポートの例 (A 夜型生活タイプ)

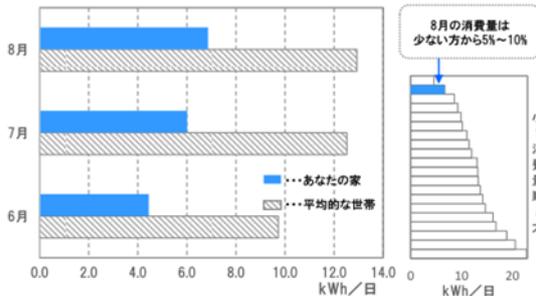
住まいの省エネアドバイスレポート

- 2015年6月～8月のHEMS電力データをもとに作成しました。
- ※ 給湯関連の電力を差し引いているため、検針の値と異なる場合があります。

他世帯との比較

※今回レポートをお送りしている78世帯の中での比較です。

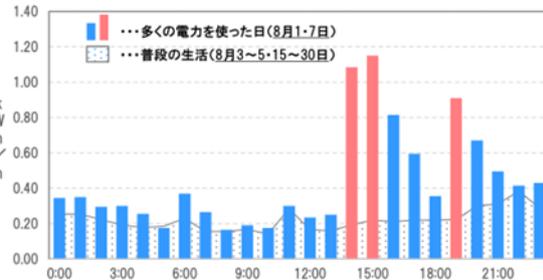
- > 8月は、平均的な世帯に比べてかなり省エネであったようです。
- > このまま継続できるように頑張らしましょう！



1日の電力の使いかた

※あなたの8月の電気の使いかたに注目して、使いかたが似ている日をパターンにまとめました。

- > 8月に最も多く現れたパターン(普段の生活)は電力使用量が少なく、省エネ型と考えられます。
- > 多くの電力を使っていたパターンと比べてみましょう。



あなたへの省エネアドバイス

- ◆ 8月の生活を振り返ってみましょう。

普段の生活(8月3～5・15～30日)と、多くの電力を使った日(8月1・7日)の生活を比べてみましょう。日々の生活を振り返ることで、電力使用が増える原因がわかり、あなたのご家庭に合わせた省エネ行動を見つけるきっかけになります。生活を振り返るときには、HEMSの「日記サービス」や日記・家計簿・SNSを活用してみましょう。



1

このレポートに関するお問い合わせ先...info@globalenv.k.u-tokyo.ac.jp (東京大学 吉田研究室)

図 3-4 省エネアドバイスレポートの例 (B 普段の生活が省エネタイプ)

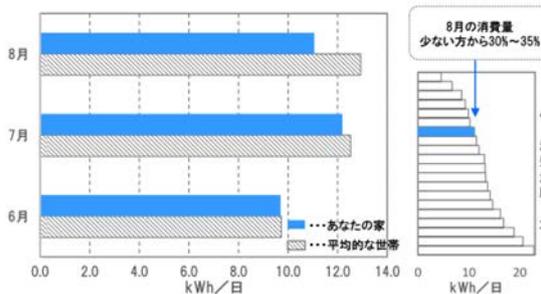
住まいの省エネアドバイスレポート

- 2015年6月～8月のHEMS電力データをもとに作成しました。
- ※ 給湯関連の電力を差し引いているため、検針の値と異なる場合があります。

他世帯との比較

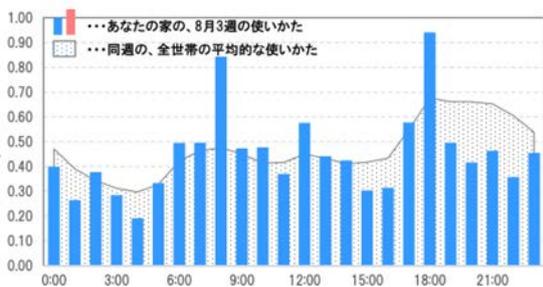
※今回レポートをお送りしている78世帯の中での比較です。

- > 8月は、平均的な世帯に比べて省エネであったようです。
- > このまま継続できるように頑張らしましょう！



1日の電気の使いかた

- > 普段から夜の電力使用量が少なく、良い生活リズムが窺えます。
- > 例として、8月3週目(8/15～8/21)を見てみましょう。



あなたへの省エネアドバイス

- ◆ 良い生活リズムでお過ごしようです。

あなたのご家庭ではあまり余分な電力を使わず、規則正しく生活しているように見受けられます。その結果、周囲と比較しても普段から省エネな生活が出来ていると考えられます。今後も省エネへの「気づき」があれば、生活の中に取り入れてみてください。



10

このレポートに関するお問い合わせ先...info@globalenv.k.u-tokyo.ac.jp (東京大学 吉田研究室)

図 3-5 省エネアドバイスレポートの例 (C その他タイプ)

3.2.3.1 他世帯との比較

この項目では、レポートの送り先である家庭とそれ以外の実証実験参加家庭平均での月平均の電力需要量を比較している。この項目の構成は省エネアドバイスレポートの種類（A・B・C）によらず同じであり、先行研究での実証実験[41][42][43][44]における省エネアドバイスレポートの内容を参考にしている。他世帯との比較の例を図 3-6 に示す。

冒頭の文章では比較結果の概要を述べており、送り先家庭と参加家庭平均の電力需要量の大小関係によって4種類の記述内容を用意した。記述内容と対応する電力需要量の大小関係について表 3-1 に示す。左側のグラフでは 2015 年の 6 月・7 月・8 月の各月における 1 日の平均電力需要量を比較しており、青い棒グラフが送り先家庭の電力需要量、斜線パターンの棒グラフがそれ以外の家庭の電力消費量を示している。右側のグラフでは 8 月の電力需要量が少ない順に実証実験参加家庭を 20 区分に分類している。グラフの横方向は各区分の電力需要量の大きさを表し、上から電力需要量が少ない順番に並べている。グラフを青く塗る位置によって送り先家庭がどの区分に該当するかを図で示し、「8 月の消費量は少ない方から〇〇%～〇〇%」という表記で、どの区分に該当するかをより分かりやすくしている。

他世帯との比較

※今回レポートをお送りしている78世帯の中での比較です。

- 8月は、平均的な世帯に比べてかなり省エネであったようです。
- このまま継続できるように頑張りましょう！

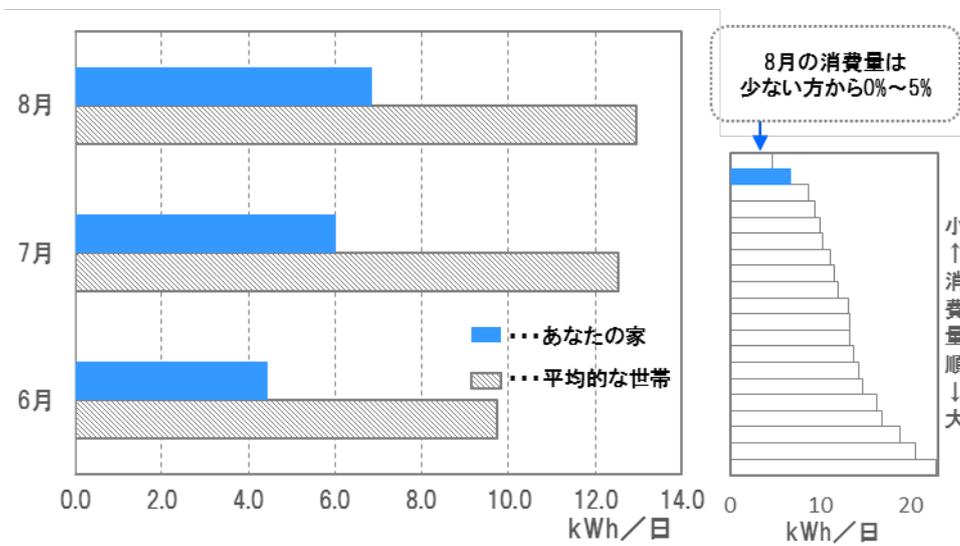


図 3-6 他世帯との比較の例

表 3-1 電力需要量の大小関係とアドバイスレポートの記述の対応関係

電力需要量の大小関係	記述
8月の需要量が平均以上 6・7月のうち少なくともい ずれかの月で需要量が平均 以下	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 8月は、平均的な世帯に比べて(やや)多くの電力を使ったようです。 ➤ 空調の使いかた等、夏の過ごし方に改善点があるかもしれません。
8月の需要量が平均以上 6・7月両方の需要量が平均 以上	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 8月は、平均的な世帯に比べて(やや)多くの電力を使ったようです。
8月の需要量が平均以下 6・7月の両方の需要量が平 均以下	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 8月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。 ➤ このまま継続できるように頑張りましょう！
8月の需要量が平均以下 6・7月のうち少なくともい ずれかの月で需要量が平均 以上	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 8月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。 ➤ 夏を省エネ上手に過ごされているようですね。

3.2.3.2 1日の電力の使いかた

この項目では、送り先である家庭の特定の週や日における電力需要カーブを比較している。比較対象は、その家庭の別の日における電力需要カーブや、参加家庭平均の同じ週における電力需要カーブであり、省エネアドバイスレポートの種類（A・B・C）によって内容が異なる。

3種類のレポートのうち「B 普段の生活が省エネタイプ」が、第2章の家庭電力需要データ分析に基づく情報が書かれており、このレポートは標準電力需要パターンでの1日電力需要量がそれ以外のパターンよりも少ない家庭（第2章で「普段の生活が省エネグループ」に該当する家庭）に対して送付されている。

「B 普段の生活が省エネタイプ」の場合での、1日の電力の使いかたの例を図3-7に示す。「B 普段の生活が省エネタイプ」では、クラスタ分析によって分類した8月の電力需要カーブの5パターンのうち、標準電力需要パターンと電力需要量が最も多いパターンの比較をしている。

標準電力需要パターンとは、2.3.3で前述のとおり、1か月分の電力需要カーブをクラスタ分析した結果の電力需要パターンの中で、含まれる日数が最も多い電力需要パターンを指す。グラフの中では、黒い線で示された「普段の生活」が標準電力需要パターンに該当し、グラフの凡例の後ろに標準電力需要パターンに含まれる日付が記載されている。

電力需要量が最も多いパターンとは、クラスタ分析した結果の電力需要パターンの中で、1日の平均電力需要量が最も多い電力需要パターンを指す。2.4.3.2で「多くの家庭において、標準電力需要パターンでは1日電力需要量が小さい」という関係が示されており、多くの家庭で電力需要量が最も多いパターンは標準電力需要パターン以外となる。グラフの中では、青とピンク色の棒で示された「多く電力を使った日」は電力需要量が最も多いパターンに該当し、グラフの凡例の後ろに標準電力需要パターンに含まれる日付が記載されている。グラフがピンク色になっている時間帯は、1時間おきの時間帯24区分の中で標準電力需要パターンとの差が大きい順に上位3つを示している。

1日の電力の使いかた

※あなたの8月の電気の使いかたに注目して、使いかたが似ている日をパターンにまとめました。

- 8月に最も多く現れたパターン(普段の生活)は電力使用量が少なく、省エネ型と考えられます。
- 多くの電力を使っていたパターンと比べてみましょう。

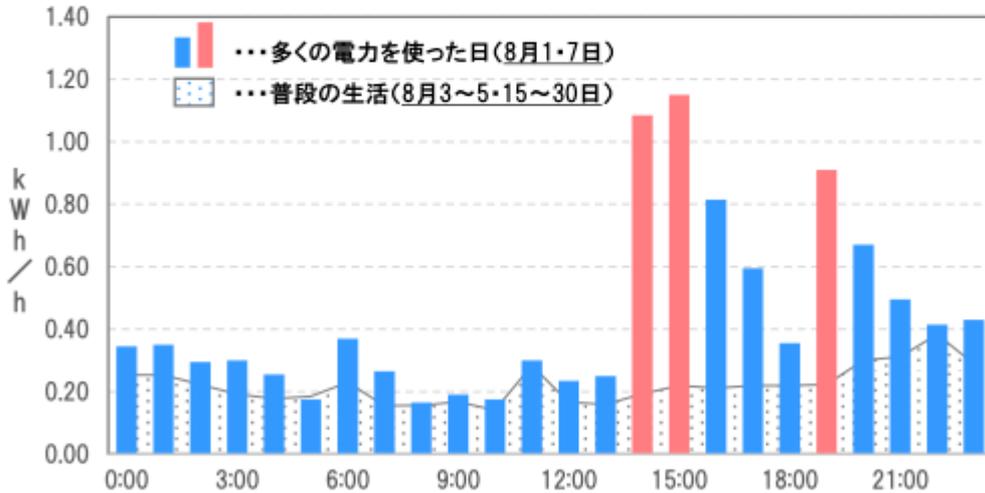


図 3-7 1日の電力の使いかたの例 (B 普段の生活が省エネタイプ)

「A 夜型生活タイプ」での1日の電力の使いかたの例を図 3-8 に、「C その他タイプ」での1日の電力の使いかたの例を図 3-9 に示す。「A 夜型生活タイプ」「C その他タイプ」の1日の電力の使いかたでは、ある週の送り先家庭の電力需要カーブと、同週の参加家庭平均の電力需要カーブを比較している。

「A 夜型生活タイプ」は電力需要カーブのフーリエ変換によって夜型生活と判定される週が多く、深夜電力需要が多い家庭に対して送付されている。ここでは、8月1週目(2015年8月1日～7日)・2週目(8月8日～14日)・3週目(8月15日～21日)・4週目(8月22日～28日)の電力需要カーブをフーリエ変換する。フーリエ変換の結果、24時間周期のスペクトルが最大となる週が夜型生活の週であり、この週の電力需要カーブを「あなたの家の、8月○週の使いかた」として青色の棒グラフで表示する。特に電力需要の多い深夜の時間帯はグラムの色をピンクにして強調する。これに対して、同週の参加家庭平均の電力需要カーブを「同週の、全世帯の平均的な使いかた」として黒い線グラフで表示する。

「C その他タイプ」は、「A 夜型生活タイプ」にも「B 普段の生活が省エネタイプ」にも該当しない家庭であり、すなわち電力需要カーブのフーリエ変換によって朝型生活と判定される週が多く、なおかつクラスタ分析によって得られる標準電力需要パターンでの1日電力需要量がそれ以外のパターンよりも多い家庭(第2章で「普段の生活が多消費グループ」に該当する家庭)に対して送付されている。ここでは、フーリエ変換の結果、12時間周期のスペクトルが最大となる週が朝型生活の週であり、この週の電力需要カーブを「あなたの家の、8月○週の使いかた」として青色の棒グラフで表示する。特に電力需要の多い深夜の時間帯はグラムの色をピンクにして強調する。これに対して、同週の参加家庭平均の電力需要カーブを「同週の、全世帯の平均的な使いかた」として黒い線グラフで表示する。

1日の電気の使いかた

- 夜間に多くの電力を使う傾向があるようです。
- 例として、8月3週目(8/15～8/21)を見てみましょう。

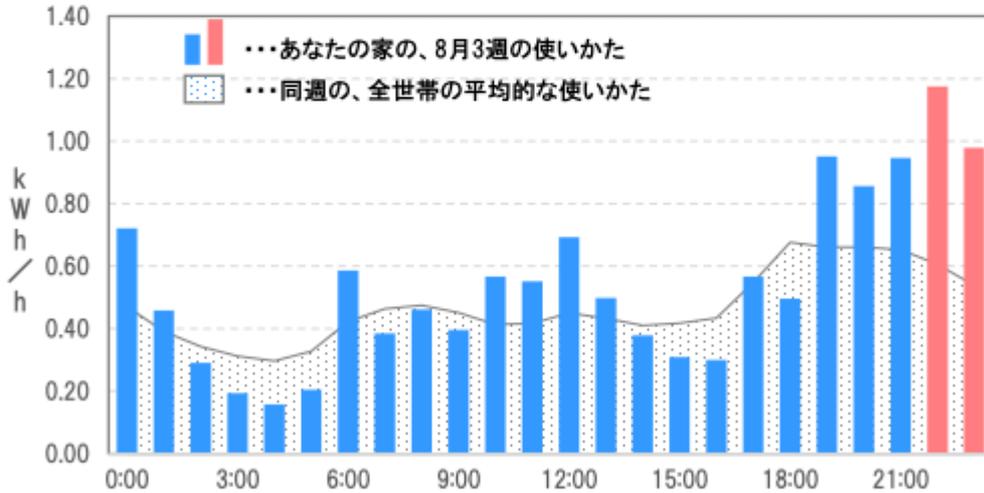


図 3-8 1日の電力の使いかたの例 (A 夜型生活タイプ)

1日の電気の使いかた

- 普段から夜の電力使用量が少なく、良い生活リズムが窺えます。
- 例として、8月3週目(8/15～8/21)を見てみましょう。

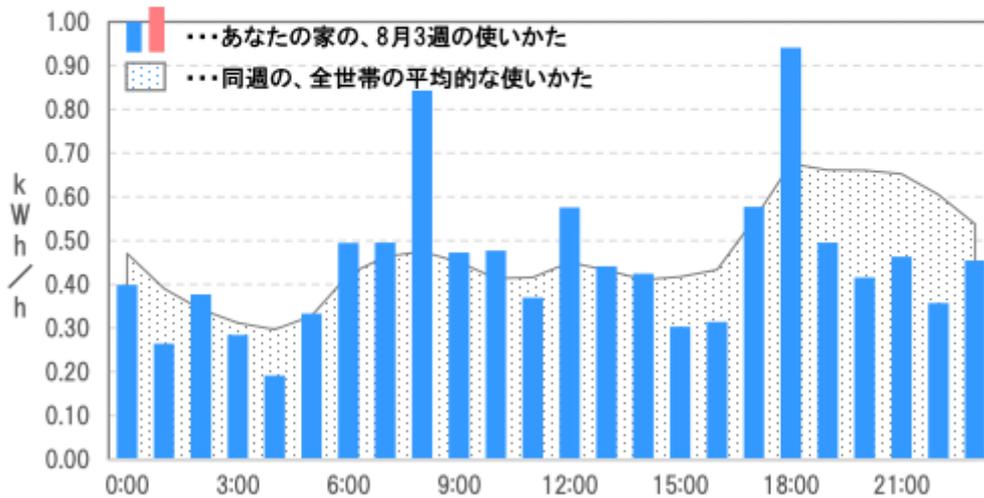


図 3-9 1日の電力の使いかたの例 (C その他タイプ)

3.2.3.3 あなたへの省エネアドバイス

この項目では、各家庭に取り組んでほしい省エネ行動のアドバイスを提案している。省エネアドバイスの内容は 3.2.3.2 の 1 日の電力の使いかたと関連付けられており、省エネアドバイスレポートの種類 (A・B・C) によって内容が異なる。

3 種類のレポートのうち「B 普段の生活が省エネタイプ」では、8月の生活の振り返りを促している。「B 普段の生活が省エネタイプ」の場合での、あなたへの省エネアドバイスの例を図 3-10 に示す。ここでは「普段の生活 (標準電力需要パターンの日)」と「多くの電気を使った日 (1 日電力需要量が最大となるパターンの日)」の日付を明示的に示して、これらの日の生活を振り返ることを提案している。日々の生活の振り返りによって電力需要が増加する要因に気づいて家庭に合わせた省エネ行動を発見することを促している。生活行動を振り返るためのツールとして、HEMS サービスに付随した家庭内での日記共有サービスや日記・家計簿・SNS を活用することを提案している¹。

あなたへの省エネアドバイス

◆ 8月の生活を振り返ってみましょう。

普段の生活(8月3~5・15~30日)と、多くの電力を使った日(8月1・7日)の生活を比べてみましょう。日々の生活を振り返ることで、電力使用が増える原因がわかり、あなたのご家庭に合わせた省エネ行動を見つけるきっかけになります。生活を振り返るときには、HEMS の 日記サービス や日記・家計簿・SNSを活用してみましょう。

図 3-10 あなたへの省エネアドバイスの例 (B 普段の生活が省エネタイプ)

「A 夜型生活タイプ」の場合での、あなたへの省エネアドバイスの例を図 3-11 に示す。ここでは、普段の生活リズムを夜型生活から朝型生活に変えることを提案している。「A 夜型生活タイプ」の家庭は深夜の電力需要が多く、夜遅くまで活発に行動していると考えられる。生活リズムを夜型から朝型にシフトすることで、省エネルギーと健康増進を同時に達成させるような生活様式を取ることを促している。

あなたへの省エネアドバイス

◆ 生活の朝型シフトをご提案します。

あなたのご家庭では、平均的な世帯と比較して夜遅くの電力消費が多いように見受けられました。夜の活動には照明電力を多く消費することに加え、目や体への健康面での負担も気になります。もし可能であれば早寝早起きをして、ちょっとした作業や読書の時間を朝にシフトさせてみませんか？

図 3-11 あなたへの省エネアドバイスの例 (A 夜型生活タイプ)

「C その他タイプ」の場合での、あなたへの省エネアドバイスの例を図 3-12 に示す。ここでは、具体的な行動の提案はせず、家庭の省エネに繋がす発見があればそれも生活に取り入れることを促している。

¹ 家計簿に関するアンケート調査[60]によると、家計・資産管理をしている人のうち、家計簿を利用している人の割合は 7 割強である。

あなたへの省エネアドバイス

◆ 良い生活リズムでお過ごしのようにです。

あなたのご家庭ではあまり余分な電力を使わず、規則正しく生活しているように見受けられます。その結果、周囲と比較しても普段から省エネな生活が出来ていると考えられます。今後も省エネへの「気づき」があれば、生活の中に取り入れてみてください。

図 3-12 あなたへの省エネアドバイスの例 (C その他タイプ)

3.2.4 アンケートの内容

省エネアドバイスレポートと同封するアンケートでは、レポートを読んだ日付とアンケートを記入した日付、省エネアドバイスレポートに関する感想、個人属性、家庭で使用するエネルギー・家電製品、省エネに対する意識を質問しており、レポートを確認した後でアンケートに回答・返送してもらった。

省エネアドバイスレポートに関する感想に対する質問は次のとおりである。第一にレポート全体に対する感想として、省エネアドバイスレポートが参考になったかどうかについて多肢選択形式で質問し、また省エネアドバイスレポートの改善点や掲載してほしい内容について自由記述形式で質問している。第二にレポートの個々の項目に対する感想として、「他世帯との比較」・「1日の電力の使いかた」で指摘した内容を自分で気づいていたかどうかと、「あなたへの省エネアドバイス」で提案した行動を実施したかどうかについて多肢選択形式で質問している。第三に今後の省エネアドバイスレポートの定期的な送付を希望するかどうかと、希望する場合にはレポートの送付方法について多肢選択形式で質問している。

個人属性については、回答者の性別・同居している家族の構成・家族人数について質問している。

家庭で使用するエネルギー・家電製品に対する質問は次のとおりである。第一に家庭における電力の受電タイプ（電気・ガス併用／オール電化／その他）について多肢選択形式で質問している。第二に家庭で使用する給湯器・暖房機器の種類について多肢選択形式で質問している。第三に電気代が高いと思う家電製品について自由記述形式で質問している。

省エネに対する意識については、「風呂でシャワー・蛇口をこまめに閉めるかどうか」「風呂の残り湯を洗濯に使うかどうか」「近くの外出に徒歩・自転車で移動するかどうか」「テレビを節電モードに設定しているかどうか」について多肢選択形式で質問している。省エネ意識についての質問内容は他にも様々なものが考えられ、例としてエアコンに関する「冷房 28℃／暖房 20℃の設定温度で使用しているかどうか」という質問が挙げられる。しかしながら、エアコンの設定温度は居住地域に依存するため、今回のように実証実験の対象が特定の地域に限られない場合には適さない。このような観点から、省エネ意識についての質問を設計する際には、このような世帯属性との相関が出にくいような質問内容とするよう配慮している。

2.2.1 で指摘したのと同様、今回の実証実験参加世帯は全て戸建住宅であり、かつ HEMS サービスが本格導入され始めた 2011 年以降に建設された住宅であると考えられるため、住宅の建て方や築年数についての質問は行っていない。

アンケートの紙面については、付録として図 A-4・図 A-5 に示す。

3.3 省エネアドバイザーレポートの送付による家庭電力需要削減効果の評価

ここでは、省エネアドバイザーレポートの送付による家庭電力需要の削減効果の評価手法について述べる。省エネアドバイザーレポートを送付することで家庭の電力需要がどの程度削減するか、あるいは逆に増加するかを評価するためには、家庭の電力需要の推移を分析して、レポート送付前後での 1 日電力需要量を比較する必要がある。また、家庭の電力需要は省エネアドバイザーレポートを送付すること以外にも様々な外的要因に影響され、この外的要因を調整してレポート送付による電力需要削減効果の評価するためには、レポートを送付した家庭 78 世帯だけでなく、レポートを送付しなかった家庭の電力需要も分析する必要がある。このような複数の家庭における電力需要の推移を分析するために、パネルデータを利用した回帰分析の手法を用いる。

まず 3.3.1 でデータ形式の一種であるパネルデータとはどのようなものであるか、その特徴について述べる。パネルデータを利用した回帰分析の手法には、固定効果推定と変量効果推定の 2 種類があり、どちらの手法を利用するのが妥当かを判断するために検定を用いて当てはまりの良さを評価する。3.3.2 では、パネルデータを利用した 2 種類の回帰分析手法とその検定手法について述べる。3.3.3 では、パネルデータの回帰分析を利用して、省エネアドバイザーレポート送付による電力需要削減効果の評価する手法について述べる。

3.3.1 パネルデータ

パネルデータのデータ形式のイメージを図 3-13 に示す。パネルデータのデータ形式を説明するためには、まず時系列データとクロスセクションデータのデータ形式について説明して、その後でパネルデータについて触れる方が理解しやすい。特定の 1 つの個体に着目して、その個体のデータを複数時点において計測したデータセットを時系列データと呼ぶ。一方で、複数の個体に着目して、それらの個体のデータを特定の 1 時点において計測したデータセットをクロスセクションデータと呼ぶ。パネルデータとは、時系列データとクロスセクションデータを組み合わせたデータ形式となっている。すなわち、複数の個体に着目して、それらの個体のデータを複数時点において計測したデータセットがパネルデータである。ここで、時点 t ($t = 1, 2, \dots, T$)における個体 i ($i = 1, 2, \dots, I$)のパネルデータ形式の属性 X を、 X_{it} と表記する。

The diagram shows a grid representing panel data. The columns are labeled '時点1', '時点2', '...', '時点t', and '...'. The rows are labeled '個体1', '個体2', '...', '個体i', and '...'. The data points are denoted as X_{it} . Annotations include: 'パネルデータ' (Panel Data) with a blue arrow pointing to the entire grid; '時系列データ' (Time Series Data) with a red arrow pointing to the first column; and 'クロスセクションデータ' (Cross-section Data) with a green arrow pointing to the first row.

	時点1	時点2	...	時点t	...
個体1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1t}	...
個体2	X_{21}	X_{22}		X_{2t}	
⋮	⋮			⋮	
個体i	X_{i1}	X_{i2}	...	X_{it}	...
⋮	⋮			⋮	

図 3-13 パネルデータのデータ形式

3.3.2 パネルデータを利用した回帰分析

パネルデータを利用した回帰分析は、主に計量経済学の分野で用いられる研究手法である[65][66].

時点数 T ・個体数 I のパネルデータに対する K 個の説明変数を用いた重回帰分析について考える. 時点 t ($t = 1, 2, \dots, T$)における個体 i ($i = 1, 2, \dots, I$)の被説明変数を Y_{it} , それを説明する k 番目 ($k = 1, 2, \dots, K$)の説明変数を X_{it}^k , 説明変数のベクトル表記を $\mathbf{x}_{it} = {}^t(X_{it}^1, X_{it}^2, \dots, X_{it}^k, \dots, X_{it}^K)$ とする.

このとき, パネルデータを利用した回帰分析のモデルは式 3-1 のように表す. ここで, α_i は「個別効果 (individual effect)」と呼ばれ, 個体 i に応じて異なる値を取る定数項 (スカラー) であり, いわばそれぞれの個体が固有に持っている説明変数の水準を表す. $\mathbf{b} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k, \dots, \beta_K)$ は説明変数ベクトル \mathbf{x}_{it} の係数ベクトルであり, ε_{it} は誤差項 (スカラー) ($\varepsilon_{it} \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$) である. ここで, パネルデータの回帰分析モデルは, 個別効果の与え方によって「固定効果モデル」「変量効果モデル」の2種類に分けられる.

$$Y_{it} = \alpha_i + \mathbf{b}\mathbf{x}_{it} + \varepsilon_{it} = \alpha_i + \beta_1 X_{it}^1 + \beta_2 X_{it}^2 + \dots + \beta_k X_{it}^k + \dots + \beta_K X_{it}^K + \varepsilon_{it} \quad \text{式 3-1}$$

3.3.2.1 固定効果モデル

固定効果モデル (fixed effect model) においては、個別効果 α_i をそれぞれの個体について独立に求める。そのためにも、説明変数の係数ベクトル \mathbb{b} を推定するために、次のような式変形を行なう。式 3-1 の時間平均を取ると、式 3-2 が得られる。ただし、 $\bar{Y}_i \cdot \bar{x}_i \cdot \bar{\varepsilon}_i$ は、式 3-3・式 3-4・式 3-5 によって与えられる。

$$\bar{Y}_i = \alpha_i + \mathbb{b}\bar{x}_i + \bar{\varepsilon}_i \quad \text{式 3-2}$$

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Y_{it} \quad \text{式 3-3}$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_{it} \quad \text{式 3-4}$$

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \varepsilon_{it} \quad \text{式 3-5}$$

ここで式 3-1 と式 3-2 の差分を取ると式 3-6 が得られ、式中から α_i が消える。以上の式変形から、最小二乗法を用いて式 3-7 で表す目的関数 $J(\mathbb{b})$ を最小化させるような \mathbb{b} を求めることによって、固定効果モデルによる \mathbb{b} の推定量 $\hat{\mathbb{b}}_{fe}$ が得られる。そして、 $\hat{\mathbb{b}}$ を式 3-2 に代入することで、式 3-8 で表すように固定効果モデルによる α_i の推定量 $\hat{\alpha}_{i_{fe}}$ を求めることができる。

$$(Y_{it} - \bar{Y}_i) = \mathbb{b}(x_{it} - \bar{x}_i) + (\varepsilon_{it} - \bar{\varepsilon}_i) \quad \text{式 3-6}$$

$$J(\mathbb{b}) = \{(Y_{it} - \bar{Y}_i) - \mathbb{b}(x_{it} - \bar{x}_i)\}^2 \quad \text{式 3-7}$$

$$\hat{\alpha}_i = \hat{\mathbb{b}}\bar{x}_i - \bar{Y}_i \quad \text{式 3-8}$$

固定効果モデルにおいては、個別効果 α_i をそれぞれの個体について設定するので、個体数 I が多くなるほど推定する変数の数が増加し、モデルの自由度は低下していく。そのため、個体数 I が多く時点数 T が小さい場合には、推定量が求められない場合も発生しうる。このような課題を解決するために編み出されたのが変量効果モデルである。

3.3.2.2 変量効果モデル

変量効果モデル (random effect model) においては、個別効果 α_i を式 3-9 で表すように全ての個体に共通な定数項 α と誤差項 v_i によって与える。ただし、 v_i は式 3-10 で表す関係を満たす。式 3-9 を式 3-1 に代入することで、式 3-11 が得られる。

$$\alpha_i = \alpha + v_i \quad \text{式 3-9}$$

$$\begin{aligned} E[v_i] &= 0 \\ \text{Cov}(v_i, v_j) &= E[v_i v_j] = \begin{cases} \sigma_v^2 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \\ \text{Cov}(\varepsilon_{it}, v_j) &= E[\varepsilon_{it} v_j] = 0 \end{aligned} \quad \text{式 3-10}$$

$$Y_{it} = \alpha + \mathbb{b}x_{it} + v_i + \varepsilon_{it} \quad \text{式 3-11}$$

式 3-11 における誤差項である v_i と ε_{it} は互いに独立ではなく、式 3-10 で表すような共分散構造を有している。そこで、変量効果モデルでは一般化最小二乗法という手法によって推定量を求める。一般化最小二乗法の手順は次のとおりである。固定効果モデル (3.3.2.1) のときと同様に式 3-11 の時間平均を取ると、式 3-12 が得られる。

$$\bar{Y}_i = \alpha + \mathbb{b}\bar{x}_i + v_i + \bar{\varepsilon}_i \quad \text{式 3-12}$$

ここで θ を式 3-13 のように与えて $Y_{it} - \theta\bar{Y}_i$ を求めると、式 3-14 が得られる。式 3-14 における誤差項である $\varepsilon_{it} - \theta\bar{\varepsilon}_i$ は正規分布に従うことが証明されており、最小二乗法を用いて式 3-15 で表す目的関数 $J(\alpha, \mathbb{b})$ を最小化させるような $\alpha \cdot \mathbb{b}$ を求めることによって、変量効果モデルによる $\alpha \cdot \mathbb{b}$ の推定量 $\hat{\alpha}_{re} \cdot \hat{\mathbb{b}}_{re}$ が得られる。

$$\theta = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_\varepsilon^2}{\sigma_\varepsilon^2 + T\sigma_v^2}} \quad \text{式 3-13}$$

$$(Y_{it} - \theta\bar{Y}_i) = \alpha(1 - \theta) + \mathbb{b}(x_{it} - \theta\bar{x}_i) + v_i(1 - \theta) + \varepsilon_{it} - \theta\bar{\varepsilon}_i \quad \text{式 3-14}$$

$$J(\alpha, \mathbb{b}) = \{(Y_{it} - \theta\bar{Y}_i) - \alpha(1 - \theta) - \mathbb{b}(x_{it} - \theta\bar{x}_i)\}^2 \quad \text{式 3-15}$$

変量効果モデルにおいては、個別効果 α_i を定数項 α と誤差項 v_i によって与えるので、固定効果モデルに比べて変数を節約することができる。ただし、変量効果モデルの制約条件として、個別効果 α_i が説明変数 X_{it}^k と相関を持たない ($\text{Cov}(\alpha_i, X_{it}^k) = 0$) ことが求められる。

3.3.2.3 ハウスマン検定

パネルデータの回帰分析において、固定効果モデル・変量効果モデルのいずれが適切であるかを判断するための検定がハウスマン検定である。前述のとおり、変量効果モデルを使用する際には「個別効果 α_i が説明変数 X_{it}^k と相関を持たない」ことが条件となる。そこで、ハウスマン検定の帰無仮説 H_0 と対立仮説 H_1 は式 3-16 のように与えられる。ハウスマン検定統計量 H は固定効果モデル・変量効果モデルによる \mathbb{b} の推定量 $\hat{\mathbb{b}}_{fe} \cdot \hat{\mathbb{b}}_{re}$ を用いて式 3-17 のように与えられ、統計量は自由度 K （モデルの説明変数の数）の χ^2 分布 χ_K^2 に従う。ただし、 $\hat{V}(\hat{\mathbb{b}}_{fe}) \cdot \hat{V}(\hat{\mathbb{b}}_{re})$ は $\hat{\mathbb{b}}_{fe} \cdot \hat{\mathbb{b}}_{re}$ の共分散行列の推定量である。

$$\begin{cases} H_0 & Cov(\alpha_i, X_{it}^k) = 0 \\ H_1 & Cov(\alpha_i, X_{it}^k) \neq 0 \end{cases} \quad \text{式 3-16}$$

$$H = {}^t(\hat{\mathbb{b}}_{fe} - \hat{\mathbb{b}}_{re})[\hat{V}(\hat{\mathbb{b}}_{fe}) - \hat{V}(\hat{\mathbb{b}}_{re})]^{-1}(\hat{\mathbb{b}}_{fe} - \hat{\mathbb{b}}_{re}) \sim \chi_K^2 \quad \text{式 3-17}$$

統計量が大きいときに帰無仮説 H_0 は棄却されて個別効果 α_i が説明変数 X_{it}^k と相関を持つので、この場合には変量効果モデルを用いることはできず固定効果モデルを用いるのが良い。一方で、統計量が十分小さいときに帰無仮説 H_0 は棄却できず個別効果 α_i が説明変数 X_{it}^k と無相関であるので、この場合には変量効果モデルを用いても良い。ただし、統計量が十分小さい場合であっても固定効果モデルを用いることができなくなるというわけではない。

3.3.3 回帰分析に基づくレポート送付による電力需要削減効果の評価

3.3.3.1 被説明変数の設定

回帰分析モデルの被説明変数は、レポート送付前後の期間における各家庭の1日電力需要量 $E_{day_{it}}$ [kWh/日]である。そこで、1日電力需要量のパネルデータを生成するために、家庭電力需要データを取得した。

分析する家庭電力需要データの期間は、2015年5月1日～11月1日の185日間とする。すなわち、パネルデータの時点数 $T = 185$ とし、 $t = 1$ は5月1日、 $t = 2$ は5月2日、…、 $t = 185$ は11月1日に対応する。省エネアドバイスレポートを送付した78世帯については、2015年5月1日～8月31日の電力需要データはレポート作成のためにすでに取得済みであるため、これら78世帯については残りの2015年9月1日～11月1日の家庭電力需要データを取得した。ここで、78世帯中1世帯はデータ欠損のため削減効果の評価するのが困難であったためサンプルから除外し、残り77世帯の1日電力需要量をパネルデータとして用いる。また、比較対照群として省エネアドバイスレポートを送付していない568世帯の2015年5月1日～11月1日の家庭電力需要データを取得した。以上の645世帯分の家庭電力需要データから1日電力需要量のパネルデータを生成する。

3.3.3.2 レポートの種類による電力需要削減効果の一括評価・種類別評価

以上の回帰分析モデルを用いて、省エネアドバイスレポートの送付による電力需要削減効果を評価する。レポートの評価方法は、全ての種類（「A 夜型生活タイプ」「B 普段の生活が省エネタイプ」「C その他タイプ」）のレポートを一括に評価する「一括評価」と、レポートの種類別で評価する「種類別評価」の2通りを検討する。

一括評価の場合、レポートを送付した77世帯とレポートを送付していない568世帯を合計した645世帯分のパネルデータを用いて回帰分析を行う。種類別評価の場合、レポートを送付した家庭は3.2.2で示したように電力需要カーブの特徴から3つのグループに分類しているため、レポートを送付していない家庭も同様の手法で3つのグループに分類してパネルデータを生成する。一括評価・種類別評価でのパネルデータの家庭数*I*と内訳を表3-2に示す。

表 3-2 一括評価・種類別評価でのパネルデータの家庭数とその内訳

	一括評価	種類別評価 A 夜型生活 タイプ	種類別評価 B 普段の生活 が省エネタイプ	種類別評価 C その他 タイプ
家庭数	645	180	348	117
レポート送付した家庭数	77	26	37	14
送付していない家庭数	568	154	311	103

3.3.3.3 一括評価・種類別評価のための回帰分析モデルの設計

つづいて、日付 t ($t = 1, 2, \dots, T$)における家庭 i ($i = 1, 2, \dots, I$)の1日電力需要量 $E_{day_{it}}$ [kWh/日]を説明する線形回帰モデルを設計する。モデルの説明変数は先行研究[41][42]を参考に、気象条件に関する変数 ($X_{it}^{cool} \cdot X_{it}^{heat} \cdot X_{it}^{humid}$)、平日・休日に関する変数 (X_t^{holi})、経時変化に関する変数 ($X_t^{sep30th}$)、省エネアドバイスレポートに関する変数 ($X_{it}^{read} \cdot X_{it}^{eff}$)の合計7個とする。

$X_{it}^{cool} \cdot X_{it}^{heat}$ は、それぞれ冷房・暖房需要を表現するために変数に与える変数で、日平均気温に依存している。まず、日付 t ($t = 1, 2, \dots, T$)における家庭 i ($i = 1, 2, \dots, I$)の日平均外気温 Tom_{it} [°C]を設定する。これは、気象庁[67]から47都道府県に設置された気象台(複数ある場合は県庁所在地に近い方)の日平均気温データを取得して、各家庭が居住している都道府県に応じて割り当てる。そして、 $TEMP_{it}$ から $X_{it}^{cool} \cdot X_{it}^{heat}$ を求める。 X_{it}^{cool} は冷房需要を表現するための変数で、式 3-18 で与えられる。 X_{it}^{cool} は、日平均外気温 Tom_{it} [°C]が基準温度 (24 °C) 以上となる日には日平均外気温と基準温度の差となり、基準温度を下回る日には0となる。 X_{it}^{heat} は暖房需要を表現するための変数で、式 3-19 で与えられる。 X_{it}^{heat} は、日平均外気温 Tom_{it} [°C]が基準温度 (14 °C) 以下となる日には基準温度と日平均外気温の差となり、基準温度を上回る日には0となる。

$$X_{it}^{cool} = \begin{cases} Tom_{it} - 24 & (Tom_{it} \geq 24) \\ 0 & (Tom_{it} < 24) \end{cases} \quad \text{式 3-18}$$

$$X_{it}^{heat} = \begin{cases} 14 - Tom_{it} & (Tom_{it} \leq 14) \\ 0 & (Tom_{it} > 14) \end{cases} \quad \text{式 3-19}$$

$X_{it}^{cool} \cdot X_{it}^{heat}$ の与え方は、建築環境工学の分野における冷房デGREEデー・暖房デGREEデーの計算方法を参考にしている。冷房デGREEデー・暖房デGREEデーとは、それぞれ冷房・暖房によって年間で消費されるエネルギー量を概算する際に利用される指標であり、1年間分の $X_{it}^{cool} \cdot X_{it}^{heat}$ を積算した値が冷房デGREEデー・暖房デGREEデーとなる。すなわち、 $X_{it}^{cool} \cdot X_{it}^{heat}$ は冷房デGREEデー・暖房デGREEデーを1日単位に分割した値に相当する。基準温度の設定に際しては、異なる基準値を与えた回帰分析モデルを作成し、最も当てはまりが良いものを採用した。

X_{it}^{humid} は、日付 t ($t = 1, 2, \dots, T$)における家庭 i ($i = 1, 2, \dots, I$)の日平均湿度[%]である。日平均気温のときと同様に、気象庁[67]から47都道府県に設置された気象台(複数ある場合は県庁所在地に近い方)の日平均湿度データを取得して、各家庭が居住している都道府県に応じて割り当てる。

X_t^{holi} は、日付 t ($t = 1, 2, \dots, T$)が休日であるかどうかを表すダミー変数で、日付 t が休日のとき $X_{it}^{holi} = 1$ 、平日のとき $X_{it}^{holi} = 0$ をとる。ここで休日は土曜・日曜・祝日であるとし、祝日の一覧を表 3-3 に示す。

表 3-3 祝日の一覧

日付	祝日名
2015年5月4日	みどりの日
2015年5月5日	こどもの日
2015年5月6日	憲法記念日の振替休日
2015年7月20日	海の日
2015年9月21日	敬老の日
2015年9月22日	国民の休日
2015年9月23日	秋分の日
2015年10月12日	体育の日

$X_t^{sep30th}$ は、気温・湿度以外の時系列のトレンドを除去するためのダミー変数で、日付 t ($t = 1, 2, \dots, T$)が9月30日以降 ($t \geq 153$) のとき $X_t^{sep30th} = 1$ 、9月30日より前 ($t < 153$) のとき $X_t^{sep30th} = 0$ をとる。9月30日は省エネアドバイスレポートを送付した日付であり、仮にこの時期を境界として1日電力需要量に変化する場合、レポート送付による電力需要削減効果を評価するうえでのノイズとなってしまう。そこで、このダミー変数を組み込むことによって、他の説明変数では表現できない時系列のトレンドを吸収することができる。

ここまでのレポートを送付した家庭・送付していない家庭の両方に影響する説明変数であり、以降の2つの説明変数がレポートを送付した家庭のみに影響するものである。 X_{it}^{read} は、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を表すダミー変数で、省エネアドバイスレポートの送付による電力需要削減効果を評価するための説明変数である。アンケートの回答結果にもとづいて、家庭 i ($i = 1, 2, \dots, I$) が送付された省エネアドバイスレポートを読んだ日付を t_i^{read} ($t_i^{read} \geq 153$) と設定する。日付 t ($t = 1, 2, \dots, T$) が日付 t_i^{read} より後 ($t > t_i^{read}$) のとき $X_{it}^{read} = 1$ をとる。日付 t が t_i^{read} 以前 ($t \leq t_i^{read}$) のときや、家庭 i がそもそもレポートを送付されていないときは $X_{it}^{read} = 0$ をとる。

X_{it}^{eff} は、省エネアドバイスレポート「他世帯との比較」(3.2.3.1)の記述内容に関するダミー変数である。省エネアドバイスレポートの「他世帯との比較」では送り先家庭と参加家庭平均の電力需要量を比較していて、8月の電力需要量が平均以下のとき「8月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。」という記述が書かれている。逆に、8月の電力需要量が平均以上のとき「8月は、平均的な世帯に比べて(やや)多くの電力を使ったようです。」という記述が書かれている。日付 t ($t = 1, 2, \dots, T$) が家庭 i ($i = 1, 2, \dots, I$) が送付された省エネアドバイスレポートを読んだ日付 t_i^{read} より後 ($t > t_i^{read}$) で、なおかつ読んだレポートに「8月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。」と書かれていたとき $X_{it}^{eff} = 1$ をとる。それ以外のとき $X_{it}^{eff} = 0$ をとる。 $X_{it}^{eff} = 1$ となる、すなわち「8月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。」という記述が書かれたレポートを受け取る家庭は77世帯中34世帯で、レポート種類別では「A 夜型生活タイプ」が26世帯中9世帯、「B 普段の生活が省エネタイプ」が35世帯中19世帯、「C その他タイプ」が12世帯中6世帯である。

Schultz et al. [68]は、省エネアドバイスレポートによって省エネ型の家庭（平均より電力需要量の少ない家庭）に対して「あなたの家庭は平均よりも省エネ型です」と伝えた場合、レポート送付以降の電力需要量が増加することを示した。このように、レポートによって提供される情報内容（送り先家庭の電力需要量が少ないこと）とその情報に対する受け手の反応（電力需要量が増加する）が逆転してしまうことで発生する負の効果を、心理学の分野では「ブーメラン効果」と呼ぶ。 X_{it}^{eff} は、省エネアドバイスレポートの「他世帯との比較」によるブーメラン効果を抽出するためのダミー変数である。

以上の説明変数を用いて回帰分析モデルを設計する。ここで、説明変数同士の相関を考えると、 $X_{it}^{read} \cdot X_{it}^{eff}$ はいずれも省エネアドバイスレポートを送付した家庭についてのダミー変数であり、相関を持つことが予想され、多重共線性の問題が考えられる。しかしながら、 X_{it}^{read} を除くとレポート送付による電力需要削減効果を評価することができなくなり、 X_{it}^{eff} を除くと一応電力需要削減効果を評価できるが、レポートのブーメラン効果によって削減効果を過少に評価することになる。そこで、回帰分析モデルは X_{it}^{eff} を除く説明変数 6 個による「 X_{it}^{eff} なしモデル」と提示した全ての説明変数 7 個による「 X_{it}^{eff} ありモデル」の 2 通りを検討する。「 X_{it}^{eff} なしモデル」の回帰式を式 3-20、「 X_{it}^{eff} ありモデル」の回帰式を式 3-21 に示す。

$$Eday_{it} = \alpha_i + \beta_{cool}X_{it}^{cool} + \beta_{heat}X_{it}^{heat} + \beta_{humid}X_{it}^{humid} + \beta_{holi}X_t^{holi} + \beta_{sep30th}X_t^{sep30th} + \beta_{read}X_{it}^{read} + \varepsilon_{it} \quad \text{式 3-20}$$

$$Eday_{it} = \alpha_i + \beta_{cool}X_{it}^{cool} + \beta_{heat}X_{it}^{heat} + \beta_{humid}X_{it}^{humid} + \beta_{holi}X_t^{holi} + \beta_{sep30th}X_t^{sep30th} + \beta_{read}X_{it}^{read} + \beta_{eff}X_{it}^{eff} + \varepsilon_{it} \quad \text{式 3-21}$$

3.3.3.4 家庭別評価とのための回帰分析モデルの設計

第2章の家庭電力需要データ分析に基づく情報を記載した「B 普段の生活が省エネタイプ」については、レポートを送付することによる電力需要削減効果を家庭別に推定する。

ここまでの回帰分析モデルでは、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響がすべての家庭で共通であるという前提のもとで設計されている。しかしながら、たとえ同じ種類のレポートであっても、レポートの内容は各家庭の電力需要データに基づいて作成されているので、詳細部分については家庭ごとにまちまちである。そのため、レポートに対する反応も家庭ごとに変化することが予想される。そこで、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を家庭ごとに個別推定するために、 β_{read} を家庭ごとに推定する。家庭別推定のための回帰分析モデルの式は式 3-22 のように記述できる。

$$Eday_{it} = \alpha_i + \beta_{cool}X_{it}^{cool} + \beta_{heat}X_{it}^{heat} + \beta_{humid}X_{it}^{humid} + \beta_{holi}X_t^{holi} + \beta_{sep30th}X_t^{sep30th} + \beta_{read_i}X_{it}^{read} + \varepsilon_{it} \quad \text{式 3-22}$$

この回帰分析モデルにおいて、 β_{read_i} は家庭*i* ($i = 1, 2, \dots, I$) が省エネアドバイスレポートを読むことによる影響度を表す。ただし、家庭*i*がそもそもレポートを送付されていないときは $\beta_{read_i} = 0$ とする。以降ではレポートが送付された家庭のみに着目し、レポートが送付された家庭数を*J* ($J < I$) としレポートが送付された家庭*j* ($j = 1, 2, \dots, J$) における β_{read_i} の推定量を $\hat{\beta}_j$ とする。

$\hat{\beta}_j$ を被説明変数、各家庭のアンケートによって得られたレポートの感想・省エネ意識やレポートに記載したクラスタ分析によって得られる電力需要の特徴量を説明変数として回帰分析を行うことで、どのような家庭がレポートを読むことによって電力需要を削減あるいは増加させているか、というようにレポート送付による影響と家庭の特徴の関係を調べる。

レポートの感想に基づく回帰分析では、「他世帯との比較」の認識度 $X_j^{compare}$ ・「1日の電力の使いかた」の認識度 X_j^{use} を説明変数として用いる。アンケートでは、「他世帯との比較」「1日の電力の使いかた」それぞれの項目で指摘した内容を自分で気づいていたかどうかについて多肢選択形式で質問している。他世帯の比較について、「十分気づいていた」と回答した場合 $X_j^{compare} = 1$ 、「なんとなく気づいていた」と回答した場合 $X_j^{compare} = 2$ 、「余り気づいてなかった」と回答した場合 $X_j^{compare} = 3$ 、「全然気づいてなかった」と回答した場合 $X_j^{compare} = 4$ 、というように回答を定量化して説明変数を設定する。1日の電力の使いかたについても同様に、「十分気づいていた」と回答した場合 $X_j^{use} = 1$ 、「なんとなく気づいていた」と回答した場合 $X_j^{use} = 2$ 、「余り気づいてなかった」と回答した場合 $X_j^{use} = 3$ 、「全然気づいてなかった」と回答した場合 $X_j^{use} = 4$ 、と説明変数を設定する。回帰式を式 3-23 に示す。

$$\hat{\beta}_{read_j} = \alpha + \beta_{compare}X_j^{compare} + \beta_{use}X_j^{use} + \varepsilon_j \quad \text{式 3-23}$$

省エネ意識に基づく回帰分析では、「風呂でシャワー・蛇口をこまめに閉めるかどうか」 X_j^{shower} 、「風呂の残り湯を洗濯に使うかどうか」 X_j^{bath} 、「近くの外出に徒歩・自転車で移動するかどうか」 X_j^{walk} 、「テレビを節電モードに設定しているかどうか」 X_j^{tv} を説明変数として用いる。アンケートでは、これらの省エネに関連する行動をおこなっているかどうかについて多肢選択形式で質問している。風呂でシャワー・蛇口をこまめに閉めるかどうかについて、「いつもおこなっている」と回答した場合 $X_j^{shower} = 1$ 、「ときどきおこなっている」と回答した場合 $X_j^{shower} = 2$ 、「あまりおこなっていない」と回答した場合 $X_j^{shower} = 3$ 、「まったくおこなっていない」と回答した場合 $X_j^{shower} = 4$ 、というように回答を定量化して

説明変数を設定する。他の質問についても同様の手順で定量化を行う。回帰式を式 3-24 に示す。

$$\hat{\beta}_{read_j} = \alpha + \beta_{shower} X_j^{shower} + \beta_{bath} X_j^{bath} + \beta_{walk} X_j^{walk} + \beta_{tv} X_j^{tv} + \varepsilon_j \quad \text{式 3-24}$$

クラスタ分析によって得られる電力需要の特徴量に基づく回帰分析では、8月平均での1日電力需要量 $E_{day_{ave_j}}$ [kWh/日], 8月の「普段の生活」(標準電力需要パターン)の1日電力需要量 $E_{day_{typical_j}}$ [kWh/日], 8月の「多く電力を使った日」(標準以外で1日電力需要量が最も多いパターン)の1日電力需要量 $E_{day_{most_j}}$ [kWh/日], 「普段の生活」と「多くの電力を使った日」の需要量比率 $R_j = \frac{E_{day_{most_j}}}{E_{day_{typical_j}}}$ [-], 「普段の生活」の日数 $D_{typical_j}$ [日], 「多くの電力を使った日」の日数 D_{most_j} [日]を説明変数として用いる。回帰式を式 3-25 に示す。

$$\hat{\beta}_{read_j} = \alpha + \beta_{Eave} E_{day_{ave_j}} + \beta_{Etyp} E_{day_{typical_j}} + \beta_{Emost} E_{day_{most_j}} + \beta_R R_j + \beta_{Dtyp} D_{typical_j} + \beta_{Dmost} D_{most_j} + \varepsilon_j \quad \text{式 3-25}$$

3.3.3.5 期間分割した評価のための回帰分析モデルの設計

前節 3.3.3.3 で説明してきた回帰分析モデルでは、省エネアドバイスレポートを読んだ日から 11 月 1 日までの 1 日電力需要量とそれ以前の 1 日電力需要量の違いから、レポート送付による電力需要削減効果の評価している。レポートを送付したのが 9 月 28 日なので、レポート送付による影響が生じる期間はおよそ 1 カ月程度である。そのため、レポート送付による影響をより詳細に検討した場合、レポートを読んだ直後の期間と読んでから数週間程度経過した期間では、レポート送付による影響に違いが生じることが予想される。そこで、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を、読んでから 2 週間までの期間とそれ以降の期間とで分割して評価するための回帰分析モデルを設計する。具体的な手法は、以下のとおりである。

省エネアドバイスレポートの送付による電力需要削減効果の評価するための説明変数として、 $X_{it}^{read_within2w}$ ・ $X_{it}^{read_after2w}$ の 2 つを用意する。

$X_{it}^{read_within2w}$ は省エネアドバイスレポートを読んでから 2 週間以内の影響を表すダミー変数である。家庭 i ($i = 1, 2, \dots, I$) が送付された省エネアドバイスレポートを読んだ日付を t_i^{read} ($t_i^{read} \geq 153$) とし、日付 t ($t = 1, 2, \dots, T$) が日付 t_i^{read} から 2 週間以内 ($t_i^{read} < t \leq t_i^{read} + 14$) のとき $X_{it}^{read_within2w} = 1$ をとる。日付 t が t_i^{read} 以前 ($t \leq t_i^{read}$) のときや t_i^{read} から 2 週間より後 ($t > t_i^{read} + 14$) のとき、また家庭 i がそもそもレポートを送付されていないときは $X_{it}^{read_within2w} = 0$ をとる。

$X_{it}^{read_after2w}$ は省エネアドバイスレポートを読んでから 2 週間より後の影響を表すダミー変数である。日付 t ($t = 1, 2, \dots, T$) が、家庭 i ($i = 1, 2, \dots, I$) が送付された省エネアドバイスレポートを読んだ日付 t_i^{read} から 2 週間より後 ($t > t_i^{read} + 14$) のとき $X_{it}^{read_after2w} = 1$ をとる。日付 t が t_i^{read} から 2 週間以前 ($t \leq t_i^{read} + 14$) のときや家庭 i がそもそもレポートを送付されていないときは $X_{it}^{read_after2w} = 0$ をとる。

同様に、省エネアドバイスレポートの「他世帯との比較」によるブーメラン効果を抽出するためのダミー変数も、 $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ の 2 つを用意する。

$X_{it}^{eff_within2w}$ は「8 月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。」と書かれた省エネアドバイスレポートを読んでから 2 週間以内の影響を表すダミー変数である。日付 t ($t = 1, 2, \dots, T$) が家庭 i ($i = 1, 2, \dots, I$) が送付された省エネアドバイスレポートを読んだ日付 t_i^{read} から 2 週間以内 ($t_i^{read} < t \leq t_i^{read} + 14$) で、なおかつ読んだレポートに「8 月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。」と書かれていたとき $X_{it}^{eff_within2w} = 1$ をとる。それ以外のとき $X_{it}^{eff_within2w} = 0$ をとる。

$X_{it}^{eff_after2w}$ は「8 月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。」と書かれた省エネアドバイスレポートを読んでから 2 週間より後の影響を表すダミー変数である。日付 t ($t = 1, 2, \dots, T$) が、家庭 i ($i = 1, 2, \dots, I$) が送付された省エネアドバイスレポートを読んだ日付 t_i^{read} から 2 週間より後 ($t > t_i^{read} + 14$) で、なおかつ読んだレポートに「8 月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。」と書かれていたとき $X_{it}^{eff_after2w} = 1$ をとる。それ以外のとき $X_{it}^{eff_after2w} = 0$ をとる。

以上の説明変数を用いて回帰分析モデルを設計する。 $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ を除く説明変数 7 個による「 $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ なしモデル」の回帰式を式 3-26、提示した全ての説明変数 9 個による

「 $X_{it}^{eff_within2w}$ 、 $X_{it}^{eff_after2w}$ ありモデル」の回帰式を式 3-27 に示す。

$$Eday_{it} = \alpha_i + \beta_{cool}X_{it}^{cool} + \beta_{heat}X_{it}^{heat} + \beta_{humid}X_{it}^{humid} + \beta_{holi}X_t^{holi} + \beta_{sep30th}X_t^{sep30th} + \beta_{read_within2w}X_{it}^{read_within2w} + \beta_{read_after2w}X_{it}^{read_after2w} + \varepsilon_{it} \quad \text{式 3-26}$$

$$Eday_{it} = \alpha_i + \beta_{cool}X_{it}^{cool} + \beta_{heat}X_{it}^{heat} + \beta_{humid}X_{it}^{humid} + \beta_{holi}X_t^{holi} + \beta_{sep30th}X_t^{sep30th} + \beta_{read_within2w}X_{it}^{read_within2w} + \beta_{read_after2w}X_{it}^{read_after2w} + \beta_{eff_within2w}X_{it}^{eff_within2w} + \beta_{eff_after2w}X_{it}^{eff_after2w} + \varepsilon_{it} \quad \text{式 3-27}$$

3.4 結果・考察

3.4.1 アンケート回答者の個人属性の構成

ここでは、省エネアドバイスレポートに同封したアンケートから得られた個人属性の構成を確認する。アンケートは省エネアドバイスレポートを送付した 78 世帯のうち 73 世帯から返送が届いており、アンケートの回収率は 94 %である。送付したレポートの種類別で見ると、「A 夜型生活タイプ」は 27 世帯のうち 25 世帯、「B 普段の生活が省エネタイプ」は 37 世帯のうち 35 世帯、「C その他タイプ」は 14 世帯のうち 13 世帯のアンケート回答が得られている。

3.4.1.1 回答者の性別と年齢

アンケート回答者の性別の構成を図 3-14、年代の構成を図 3-15 に示す。男女別では 74 %が男性と男性の方が多く、年代別では 40 代が最も多く 41 %、ついで 30 代が 38 %というように若年層が多い。

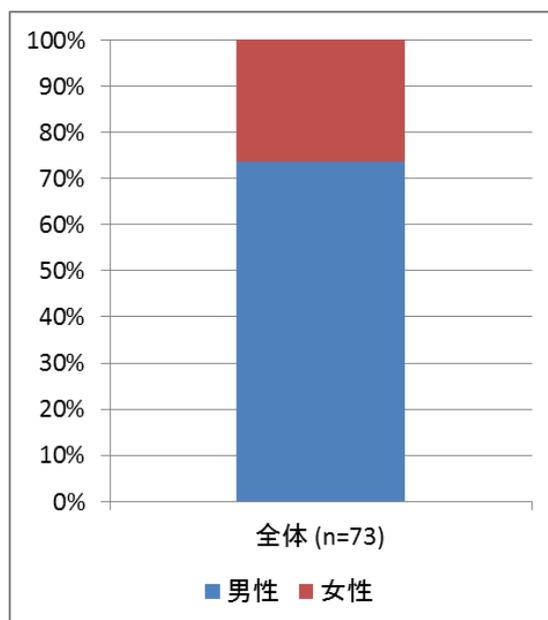


図 3-14 性別の構成

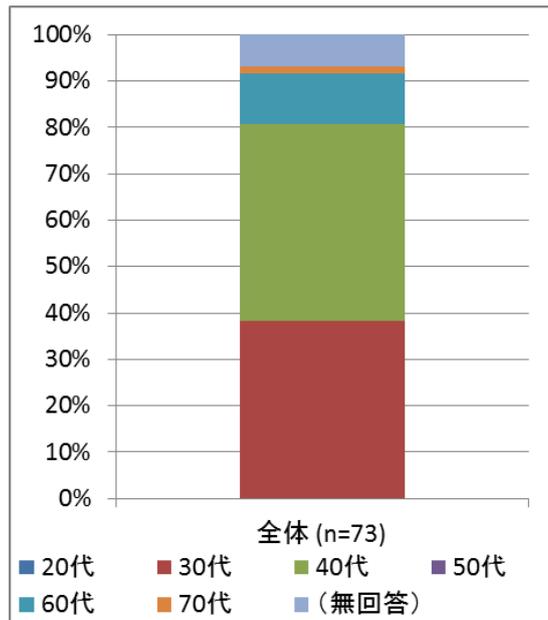


図 3-15 年代の構成

3.4.1.2 家庭の世帯類型と家族人数

アンケートを回答した家庭の世帯類型の構成を図 3-16、家族人数の構成を図 3-17 に示す。

世帯類型別では、親+子供の世帯が全体の 74 % を占めている一方で、祖父母+親+子の 3 世代世帯は全体の 8 % と少なく、核家族世帯が多い傾向を確認することができる。レポート種類別で見ると、「A 夜型生活タイプ」を送付した家庭では親+子供の世帯の割合が多く、「B 普段の生活が省エネタイプ」を送付した家庭では夫婦 2 人世帯の割合が多い。なお、全体の 4 % の家庭が単身世帯と回答しているが、これらの回答者は後述する家族人数の質問で 2 人以上と回答しており、回答を分析に用いる際には注意が必要である。

家族人数別では、4 人世帯が最も多く 44%，ついで 3 人世帯が 30%，5 人世帯が 14 % と続く。回答者全体の平均家族人数は 3.70 人/世帯である。レポート種類別で見ると、「A 夜型生活タイプ」を送付した家庭では 3 人世帯・4 人世帯の割合が多く、「B 普段の生活が省エネタイプ」を送付した家庭では 2 人世帯・5 人世帯の割合が多い。平均家族人数は、「A 夜型生活タイプ」が 3.68 人/世帯、「B 普段の生活が省エネタイプ」が 3.66 人/世帯、「C その他タイプ」が 3.80 人/世帯と、いずれも似たような家族人数となっている。

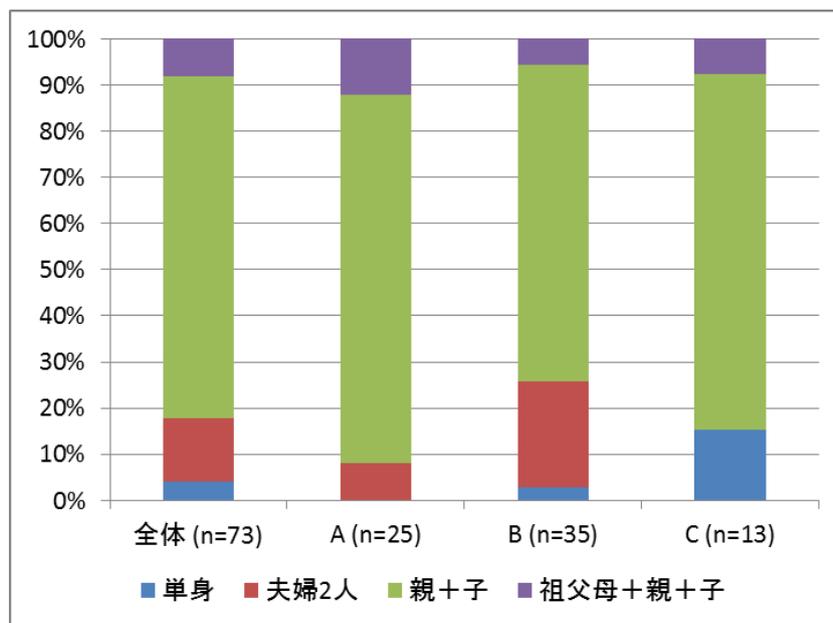


図 3-16 世帯類型の構成

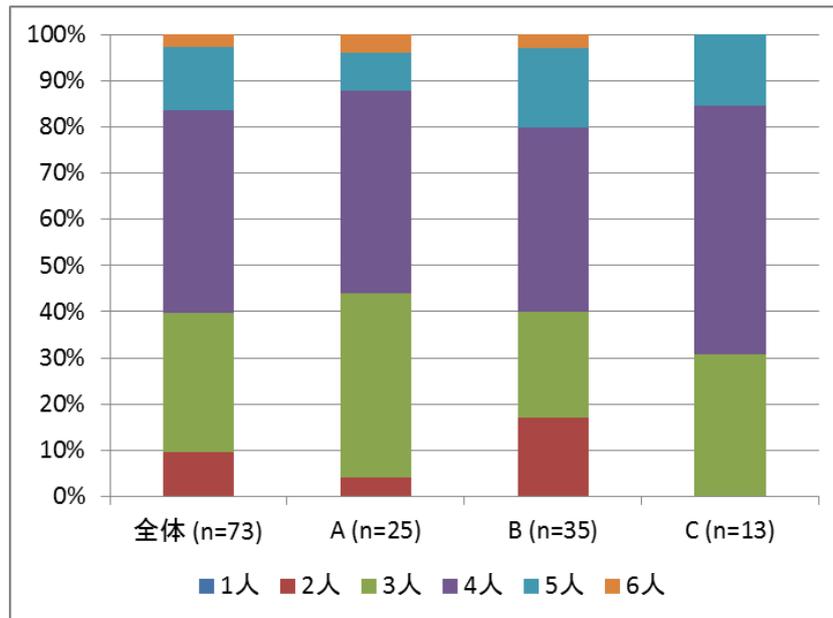


図 3-17 家族人数の構成

3.4.1.3 家庭の受電タイプと給湯器の種類

アンケートを回答した家庭の受電タイプの構成を図 3-18, 所有している給湯器の種類を図 3-19 に示す。

受電タイプ別では、オール電化の家庭が 53 %、電気・ガス併給の家庭が 47 %とおよそ半々である。レポート種類別で見ると、「A 夜型生活タイプ」「B 普段の生活が省エネタイプ」はおよそ全体平均と同じであるが、「C その他タイプ」を送付した家庭ではオール電化の割合が 77 %と大きい。

給湯器の種類別では、電気式給湯器の家庭が 52 %、ガス式給湯器の家庭が 44 %と受電タイプと同様およそ半々である。レポート種類別で見ても、「C その他タイプ」を送付した家庭では電気式給湯器の割合が 77 %と多く、これも受電タイプの傾向と同様である。

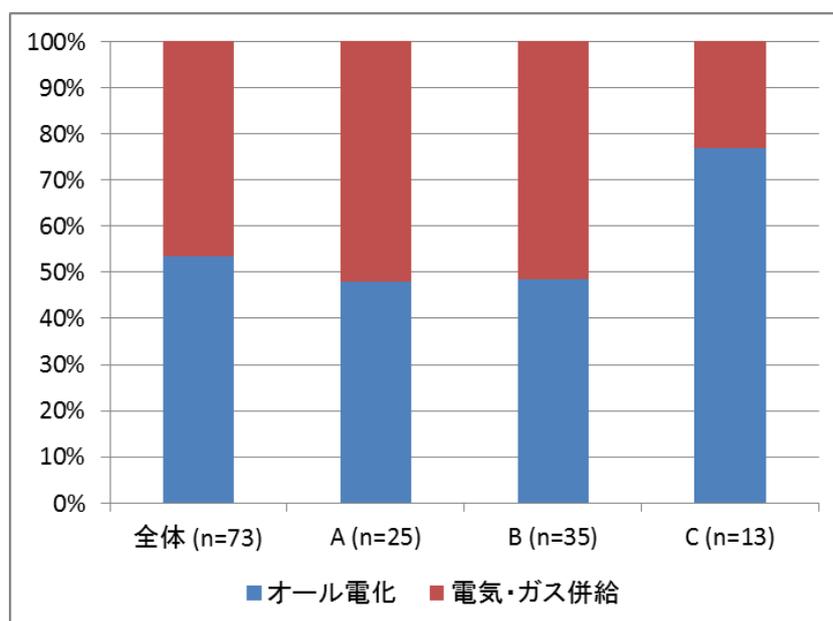


図 3-18 受電タイプの構成

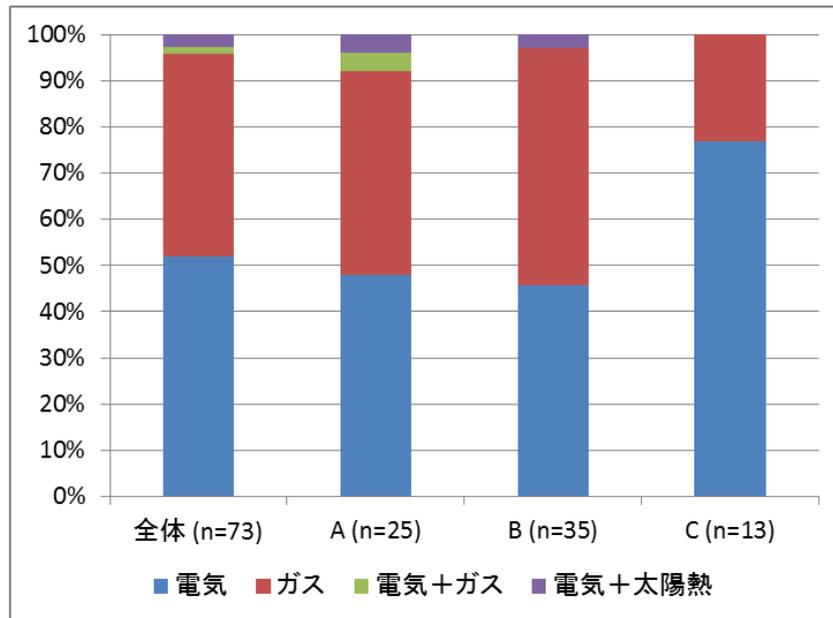


図 3-19 給湯器の種類構成

3.4.1.4 省エネに対する意識

アンケート回答者の省エネに対する意識の構成を図 3-20 に示す。

「風呂でシャワー・蛇口をこまめに閉めるかどうか（こまめに節水）」の質問では「いつもおこなっている」という回答が最も多く 59% を占め、「ときどきおこなっている」が 26%、「あまりおこなっていない」が 14% と続く。「風呂の残り湯を洗濯に使うかどうか（残り湯利用）」の質問では「まったくおこなっていない」と回答した者が 59% で過半数を占め、2 番目に多いのが「いつもおこなっている」の 30%、3 番目が「ときどきおこなっている」の 11% である。以上の 2 問はいずれも入浴に関連した省エネ意識を質問しているが、シャワー・蛇口の節水は「いつもおこなっている」者が過半数であるのに対し、残り湯の利用は「まったくおこなっていない」者が過半数と全く逆の傾向を示している。これは、シャワー・蛇口の節水は水道料金の節約という経済的インセンティブが強く働いているのに対し、残り湯の利用では逆に衛生面の懸念が有意に影響していることを示唆している。

「近くの外出に徒歩・自転車で移動するかどうか（徒歩・自転車）」の質問では「ときどきおこなっている」という回答が最も多く 33%、次いで「まったくおこなっていない」が 29%、「あまりおこなっていない」が 26% と続き、「いつもおこなっている」という回答が最も少なく 12% である。省エネ意識についての 4 つの質問の中では、もっとも回答がばらけた質問となっている。一方で、「テレビを節電モードに設定しているかどうか（テレビ節電）」の質問では「いつもおこなっている」という回答が 41%、「まったくおこなっていない」という回答が 38% で、この 2 つの回答に二極化される結果となった。これは、テレビの節電モード設定を一度行えば以降もそのモードが持続するため、節電モード設定を行っている家庭と行っていない家庭に二分されたためと考えられる。

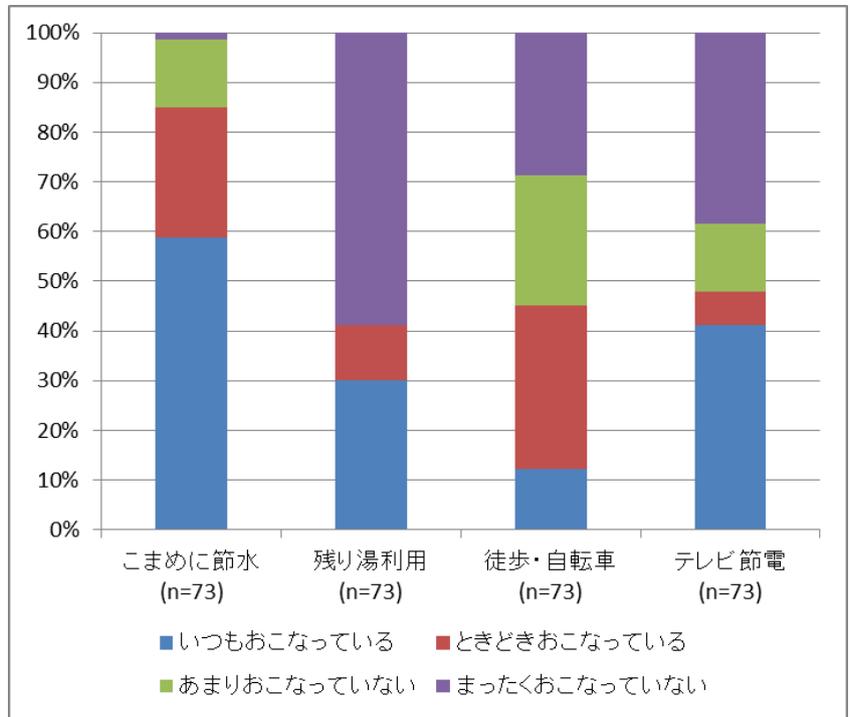


図 3-20 省エネに対する意識の構成

3.4.2 省エネアドバイザーレポートに関するアンケート回答結果

つづいて、省エネアドバイザーレポートに関するアンケート回答結果を確認する。

3.4.2.1 省エネアドバイザーレポートを読んだ日付について

省エネアドバイザーレポートを読んだ日付に関する回答結果の構成を図 3-21 に示す。レポート全体で見ると「9月30日」にレポートを読んだという回答を最も多く（23世帯）、その前後の期間に山状に分布している。レポート種類別でも、「9月30日」という回答が最多となっている。レポートを送付した日は9月28日であり、送付日以降の1週間（9月28日～10月4日）の期間でレポートを読んだと回答した世帯は、レポートを送付した全世帯の約9割を占める。このことから、実証実験に参加した家庭はレポートが届いてから間を置かず読んでおり、これは今回の実証実験をオプト・イン型で実施しているために、参加家庭が実証実験に対して協力的であると同時にレポート内容に対する関心の高さを反映したものと考えられる。

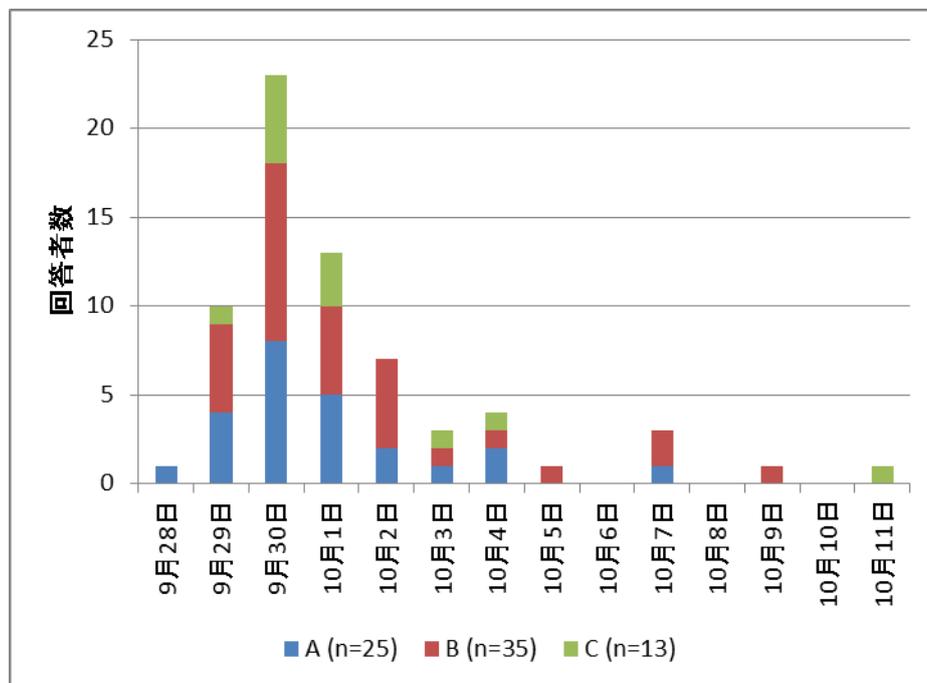


図 3-21 省エネアドバイザーレポートを読んだ日付について

3.4.2.2 省エネアドバイスレポートの有用性について

省エネアドバイスレポートの有用性（レポートがどの程度参考になったか）に関する回答結果の構成を図 3-22 に示す。省エネアドバイスレポートが「参考になった」と回答した割合は全体の 86%であり、多くの家庭がレポートの有用性を認識できている。ただし、今回の実証実験は募集に対して参加表明した家庭にレポートを送付するオプト・イン形式で行われたため、レポートに対する関心が強い家庭が多いものと考えられる。

レポート種類別で見ると、「A 夜型生活タイプ」で「あまり参考にならなかった」のは 25 世帯中 3 世帯で、これらの家庭はすべてオール電化住宅であった。これらの家庭はレポートの感想として、「夜間の電力需要が多くなるのは、電気温水器（エコキュート）が夜間に運転されるためではないか」と回答している。今回のレポートを作成するにあたって使用した電力需要カーブは、電気温水器や蓄熱暖房など生活行動のタイミングによらない電力需要は除外されている。この点については、レポートにも注意書きを行なったが、読み手側が十分に伝わっていなかったものと考えられる。

「B 普段の生活が省エネタイプ」で「あまり参考にならなかった」のは 35 世帯中 6 世帯であった。これらの家庭はレポートの感想として、「生活行動の振り返りをしたが、増加要因がわからなかった。子供がいる家庭は 8 月の生活行動が不規則なので、他の観点でのアドバイスが欲しい」「多くの電力を使った日の電力の用途を明らかにしてほしい」「具体的な家電を指摘し代替家電情報の提供を行うなど、もう少し具体的なアドバイスでないと実行もしないだろうと思う。」と回答している。これらの感想が一様に含意していることは、「家庭全体での電力需要カーブを示して生活行動の振り返りを促したとしても省エネアドバイスの効果は弱く、電力需要の用途が分かる情報提供が求められている」ということである。今回分析した家庭電力需要データは配電盤の回路別に計測されているが、回路ごとにどのような家電製品が接続されているかが不確かであったので、電力需要を用途別に示すことができなかった。レポートの有用性を向上するためには、電力需要を用途別に分類する手法を構築し、「普段の生活」と「電力を多く使った日」とで具体的にどのような家電製品が使用されることによって需要の差が発生しているのかを明確にして情報提供することが効果的と考えられる。

「C その他タイプ」を送付した家庭では全員が「参考になった」と回答している。ただし、「C その他タイプ」は他の種類のレポートと比べて送付された家庭の数が少ないことに注意されたい。

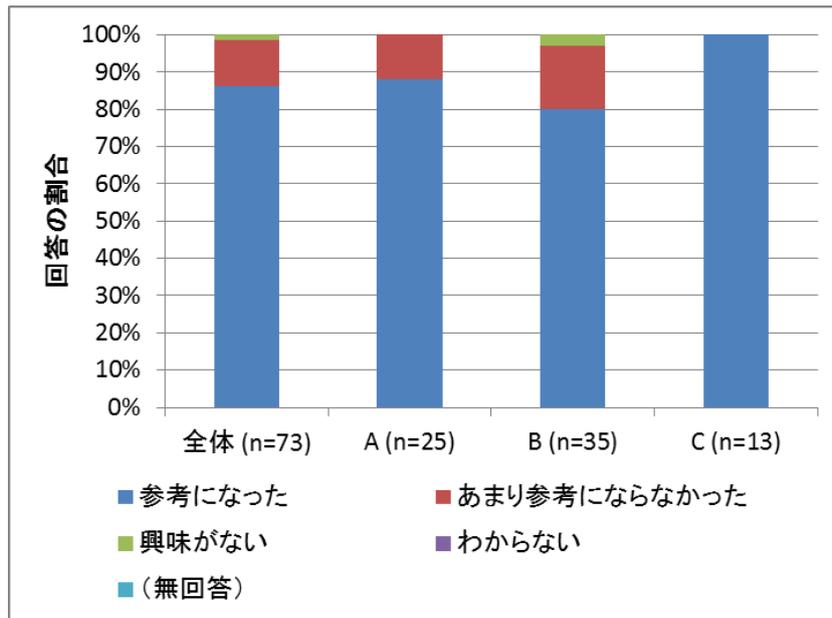


図 3-22 省エネアドバイスレポートの有用性について

3.4.2.3 「他世帯との比較」・「1日の電力の使いかた」の認識について

省エネアドバイザーレポートの内容の認識（レポートに書かれている情報について、読む前はどの程度自分で気づいていたか）の回答結果を示す。「他世帯との比較」の認識に関する回答結果の構成を図 3-23、「1日の電力の使いかた」の認識に関する回答結果の構成を図 3-24 に示す。

「他世帯との比較」ではレポートの送り先である家庭とそれ以外の実証実験参加家庭平均での月平均の電力需要量を比較して、項目の構成はレポート種類によらず同じである。「他世帯との比較」について「なんとなく気づいていた」という回答が最も多く 42%，ついで「余り気づいてなかった」が 36%，「全然気づいてなかった」が 21%と続く。「他世帯との比較」について「十分気づいていた」という回答は 1%と少なく、これは普段の生活において自分の家庭と他の家庭の電力需要量を比較する機会が少ないためと考えられる。

「他世帯との比較」では、送り先家庭と参加家庭平均の電力需要量の大小関係によって記述内容を変えている。8月の電力需要量が平均以下のとき「8月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。」という記述が書かれている。逆に、8月の電力需要量が平均以上のとき「8月は、平均的な世帯に比べて(やや)多くの電力を使ったようです。」という記述が書かれている。この記述内容別で2グループに分けて「他世帯との比較」の認識を比較すると、「8月は省エネ」であった家庭では「余り気づいてなかった」割合が多く、「8月は多消費」と指摘された家庭では「全然気づいてなかった」割合が多い。人は、客観的な情報を与えずに自分の能力・成績などを自己評価した場合、「自分の能力・成績は平均以上である」と回答する割合が多く、心理学の分野で「平均以上効果」[69]と呼ばれる。そのような自己評価をしている人に対して「あなたは平均以下である（平均的な世帯に比べて多くの電力を使っていた）」という客観的情報を与えることの方が、より意外であると感じられる。そのため、記述内容によって回答に差が出たものと考えられる。

「1日の電力の使いかた」では、送り先である家庭の特定の週や日における電力需要カーブを、その家庭の別の日における電力需要カーブや参加家庭平均の同じ週における電力需要カーブと比較して、レポートの種類によって内容が異なる。全体平均では、「なんとなく気づいていた」という回答が最も多く 48%，ついで「余り気づいてなかった」が 34%，「十分気づいていた」が 14%と続く。一方で、「1日の電力の使いかた」について「全然気づいてなかった」という回答は 4%と少ない。「1日の電力の使いかた」はその家庭に多い生活リズムや日々の生活行動パターンの違いに着目した情報であるため、「他世帯との比較」よりは日常的に気づきやすいと考えられる。

レポート種類別で見ると、「A 夜型生活タイプ」は 80%が「十分気づいていた」「なんとなく気づいていた」と回答している。このタイプは、電力需要カーブのフーリエ変換によって夜型生活と判定される週が多く深夜電力需要が多い家庭に対して送付されている。

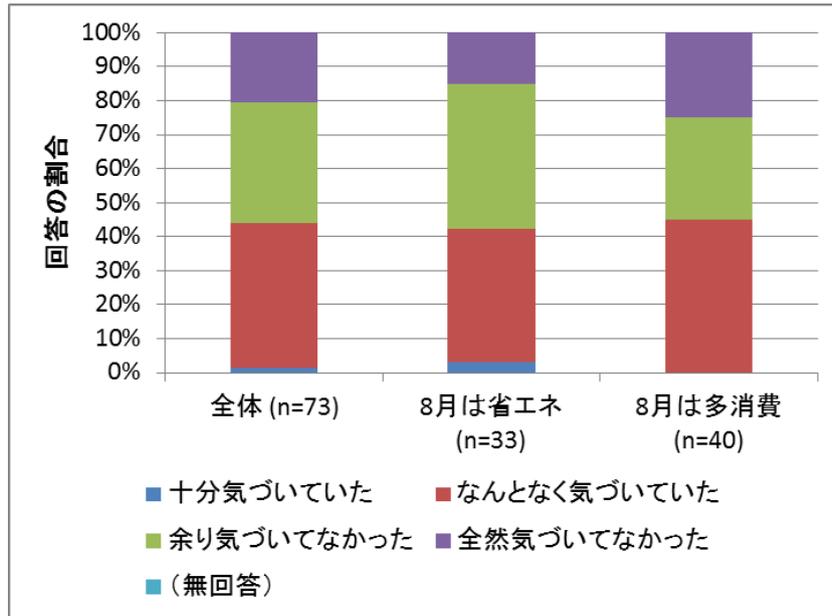


図 3-23 「他世帯との比較」の認識について

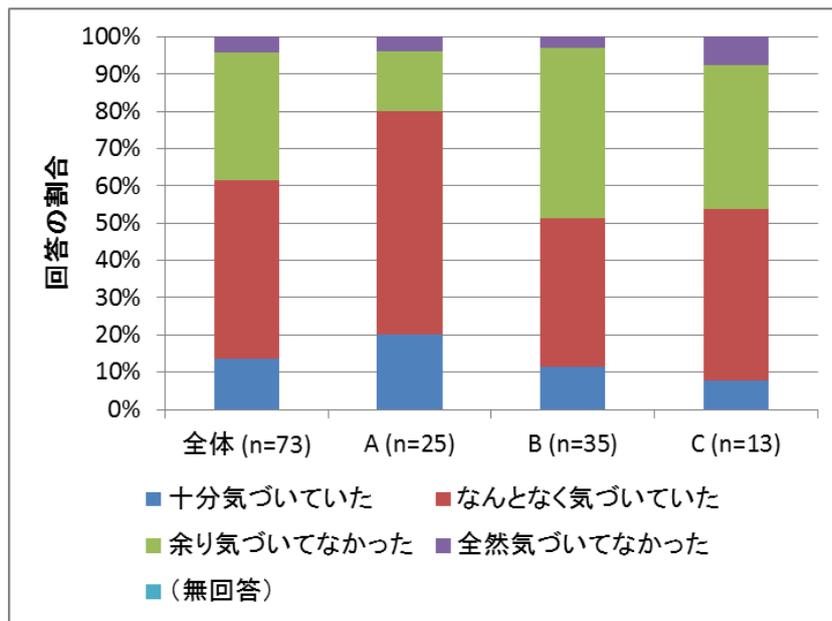


図 3-24 「1日の電力の使いかた」の認識について

3.4.2.4 「あなたへの省エネアドバイス」の実施について

「あなたへの省エネアドバイス」を実施したかどうかに関する回答結果の構成を図 3-25 に示す。「あなたへの省エネアドバイス」では、各家庭に取り組んでほしい省エネ行動のアドバイスを「1日の電力の使いかた」と関連させる形で提案しており、レポートの種類によって内容が異なる。「A 夜型生活タイプ」では生活リズムを夜型から朝型にシフトすることを提案し、「B 普段の生活が省エネタイプ」では普段の生活（標準電力需要パターンの日）と多くの電気を使った日（1日電力需要量が最大となるパターンの日）の生活の振り返りを提案している。

省エネアドバイスを「今後実施する予定」という回答が58%と半数以上を占めている。「わからない」という回答が18%で2番目に多い。「アドバイスを実施した」「アドバイスを実施しない」という回答はともに11%である。このような内訳となった理由として、多くの家庭がレポートを読んだ当日にアンケートに回答したため、生活リズムのシフトや日々の生活行動の振り返りといった時間を要するアドバイスを即時に実施することができなかったものと考えられる。省エネアドバイスレポート送付による電力需要削減効果は、「今後実施する予定」「わからない」と回答したグループがアドバイスを実施するか否かに大きく影響されると考えられる。

このような中で、「A 夜型生活タイプ」「B 普段の生活が省エネタイプ」で「アドバイスを実施した」「アドバイスを実施しない」という回答者のレポートに対する感想を確認する。

「A 夜型生活タイプ」で「アドバイスを実施した」と回答したのは25世帯中2世帯で、このうち1世帯はレポートの感想として「日中は不在のはずなのに予想以上に電力を使用しておどろいた」と書いている。「A 夜型生活タイプ」のレポートの本来の趣旨は夜の電力需要の削減であるが、一部の家庭は他の部分にも関心を向けていた。一方で、「アドバイスを実施しない」と回答したのは25世帯中4世帯で、これらの家庭はすべてオール電化住宅であった。レポートの有用性についての質問でも指摘したとおり、これらの家庭はレポートの感想として、「夜間の電力需要が多くなるのは、電気温水器（エコキュート）が夜間に運転されるためであり、生活リズムによる影響ではない」と回答している。

「B 普段の生活が省エネタイプ」で「アドバイスを実施した」と回答したのは35世帯中4世帯で、生活行動の振り返りによって「両親等が宿泊した」と電力需要の増加要因を特定していた家庭もある一方で、「帰省をしており終日不在であった日が、普段の生活と案内された点は疑問」という意見もあった。

「アドバイスを実施しない」と回答したのも35世帯中4世帯で、「暮らしが便利になる+省エネの策があれば教えてほしい。結局は省エネと暮らしの便利さは反比例であると思う」という意見が出た。

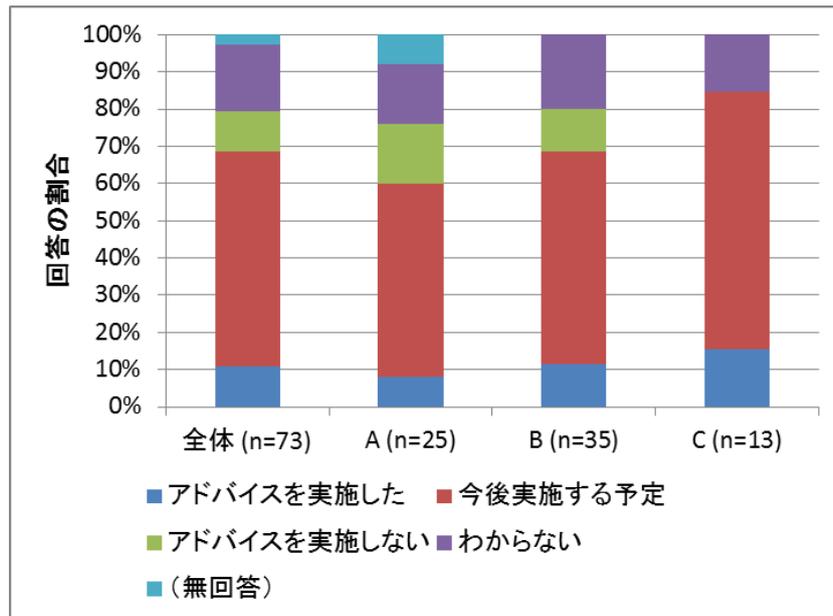


図 3-25 「あなたへの省エネアドバイス」の実施について

3.4.2.5 「1日の電力の使いかた」の認識と「あなたへの省エネアドバイス」の実施の関連性

今回の省エネアドバイスレポートでは、「1日の電力の使いかた」で電力需要カーブの特徴を生活リズム・生活パターンと関連づけて説明し、つづいて「あなたへの省エネアドバイス」でこの電力需要と生活行動の関係性からそれぞれの家庭にあった省エネアドバイスを提案している。そこで、「1日の電力の使いかた」の認識と「あなたへの省エネアドバイス」の実施の関連性を確認するために、この2つの回答結果をレポート種類別にクロス集計した。

「A 夜型生活タイプ」のクロス集計結果を表 3-4 に示す。「アドバイスを実施した」あるいは「今後実施する予定」と回答した15世帯のうち13世帯は1日の電力の使いかたについて「なんとなく気づいていた」と回答している。この点から、「生活リズムを夜型から朝型にシフトする」という省エネアドバイスに対して積極的に捉えている家庭は、もともと自分たちが夜型の生活リズムで過ごしていることを自覚している傾向が強いことを示している。一方で、「アドバイスを実施しない」と回答した4世帯は、全て1日の電力の使いかたについて「十分気づいていた」と回答している。先ほど確認したとおり、これらの家庭はすべてオール電化住宅で、夜間の電力需要が多くなるのは電気温水器（エコキュート）が夜間に運転されるためであると考えている。そのため、夜間に電力需要が多くなることについて十分気づいていたし、夜間電力需要は生活リズムによる影響ではないため生活リズムのシフトは実施しないと考えているものと思われる。

表 3-4 「1日の電力の使いかた」の認識と「あなたへの省エネアドバイス」の実施のクロス集計（A 夜型生活タイプ）

「あなたへの省エネアドバイス」の実施	「1日の電力の使いかた」の認識				総計
	十分気づいていた	なんとなく気づいていた	余り気づいてなかった	全然気づいてなかった	
アドバイスを実施した		1	1		2
今後実施する予定		11	2		13
わからない		3		1	4
アドバイスを実施しない	4				4
(無回答)	1		1		2
総計	5	15	4	1	25

「B 普段の生活が省エネタイプ」のクロス集計結果を表 3-5 に示す。「アドバイスを実施した」と回答した4世帯はいずれも1日の電力の使いかたについて「十分気づいていた」「なんとなく気づいていた」と回答している。一方で、「アドバイスを実施しない」と回答した4世帯のうち3世帯は1日の電力の使いかたについて「余り気づいてなかった」と回答している。ここから、アドバイスをすぐに実施した家庭は日々の生活行動の違いに対する関心が強く、逆にアドバイスを実施しない家庭は日々の生活行動の違いに対する関心が弱いことを示している。

表 3-5 「1日の電力の使いかた」の認識と「あなたへの省エネアドバイス」の実施のクロス集計 (B 普通の生活が省エネタイプ)

「あなたへの省エネアドバイス」の実施	「1日の電力の使いかた」の認識				総計
	十分気づいていた	なんとなく気づいていた	余り気づいてなかった	全然気づいてなかった	
アドバイスを実施した	1	3			4
今後実施する予定	2	10	7	1	20
わからない	1		6		7
アドバイスを実施しない		1	3		4
(無回答)					2
総計	4	14	16	1	35

「C その他タイプ」のクロス集計結果を表 3-6 に示す。アドバイスの実施についてのいずれの回答でも、1日の電力の使いかたについて「(十分/なんとなく) 気づいていた」と回答したグループと「(余り/全然) 気づいてなかった」と回答したグループが似たように分布しており、明確な傾向は確認できない。

表 3-6 「1日の電力の使いかた」の認識と「あなたへの省エネアドバイス」の実施のクロス集計 (C その他タイプ)

「あなたへの省エネアドバイス」の実施	「1日の電力の使いかた」の認識				総計
	十分気づいていた	なんとなく気づいていた	余り気づいてなかった	全然気づいてなかった	
アドバイスを実施した		1	1		2
今後実施する予定	1	4	3	1	9
わからない		1	1		2
アドバイスを実施しない					
(無回答)					2
総計	1	6	5	1	13

3.4.2.6 省エネアドバイスレポートの定期無料送付サービスについて

今回のような省エネアドバイスレポートが定期的に送付される無料のサービスがあれば、希望するかどうかに関する回答結果の構成を図 3-26 に示す。省エネアドバイスレポートの定期無料送付サービスを「希望する」と回答したのは全体の 92%であり、多くの家庭が今後もレポートを受け取りたいと答えた。ただし何度も指摘している通り、今回の実証実験は募集に対して参加表明した家庭にレポートを送付するオプト・イン形式で行われたため、レポートに対する関心が強い家庭が多いであろう点に注意されたい。

無料定期サービスを「希望しない」と回答した 6 世帯のうち 5 世帯は「レポートが参考になった」と回答しており、レポートに対する感想では「平均的な家庭より省エネだと分かり、今後も続けていきたいと感じた。」「いかに我が家が節約しているかが分かりました。結果に満足しています。」と回答している。今回のレポートによって「自分の家庭が省エネ的であること」が追認され、これ以上の情報提供を求めているものと考えられる。

「希望する」と回答した中で、最も望ましいレポートの送付形式に関する回答結果の構成を図 3-27 に示す。レポート送付形式では、「郵送」による送付という回答が最も多く 48%、「電子メール」による送付という回答が 2 番目に多く 39%であった。レポートを送付した家庭には HEMS で収集された情報を表示する HEMS モニターがリビングなど人の集まる場所の壁に据え付けられているが、この「HEMS モニター」による表示を希望したのは全体の 10%と少なかった。

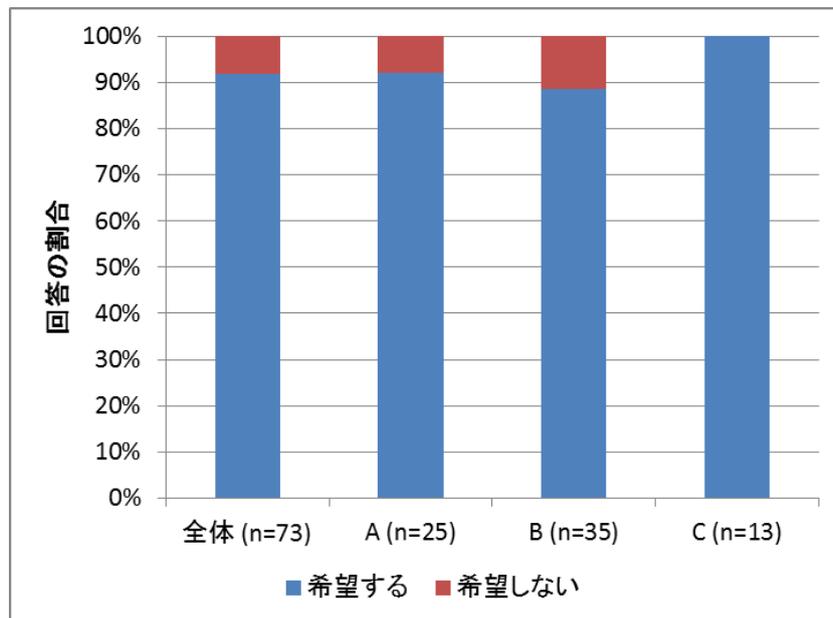


図 3-26 省エネアドバイスレポートの定期無料送付サービスについて

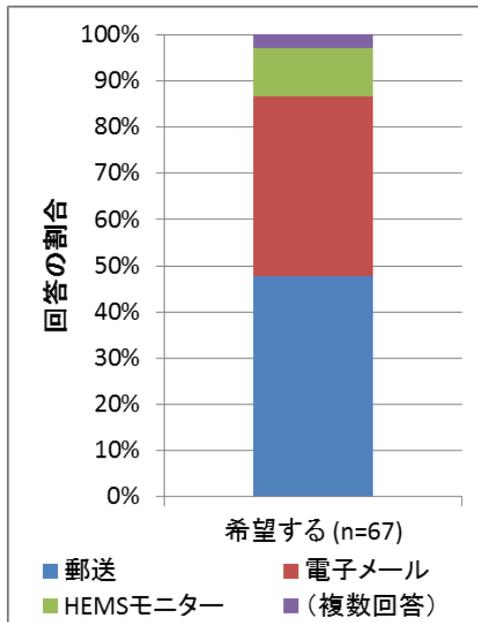


図 3-27 省エネアドバイスレポートの送付方法について

3.4.3 パネルデータを利用した回帰分析

3.4.3.1 レポート送付・非送付家庭での1日電力需要量の比較

省エネアドバイスレポートの送付による電力需要削減効果を評価する前に、レポートを送付した家庭と送付していない家庭での電力需要を比較する。レポートを送付する前の2015年6月～8月に着目して、1日電力需要の平均を図2-27に示す。

レポートを送付した家庭と送付していない家庭で比較すると、全体的には送付した家庭と送付していない家庭の1日電力需要量はほぼ同じ値をとっている。送付したレポートの種類別で見ると、「A 夜型生活タイプ」はレポートを送付した家庭の方で1日電力需要量が多く、「B 普段の生活が省エネタイプ」「C その他タイプ」はレポートを送付していない家庭の方で1日電力需要量が多い傾向が見られる。

レポート種類別で見ると、「A 夜型生活タイプ」の家庭の1日電力需要量が最も多く、2番目に多いのが「C その他タイプ」で、「B 普段の生活が省エネタイプ」の家庭の1日電力需要量は最も少ない。

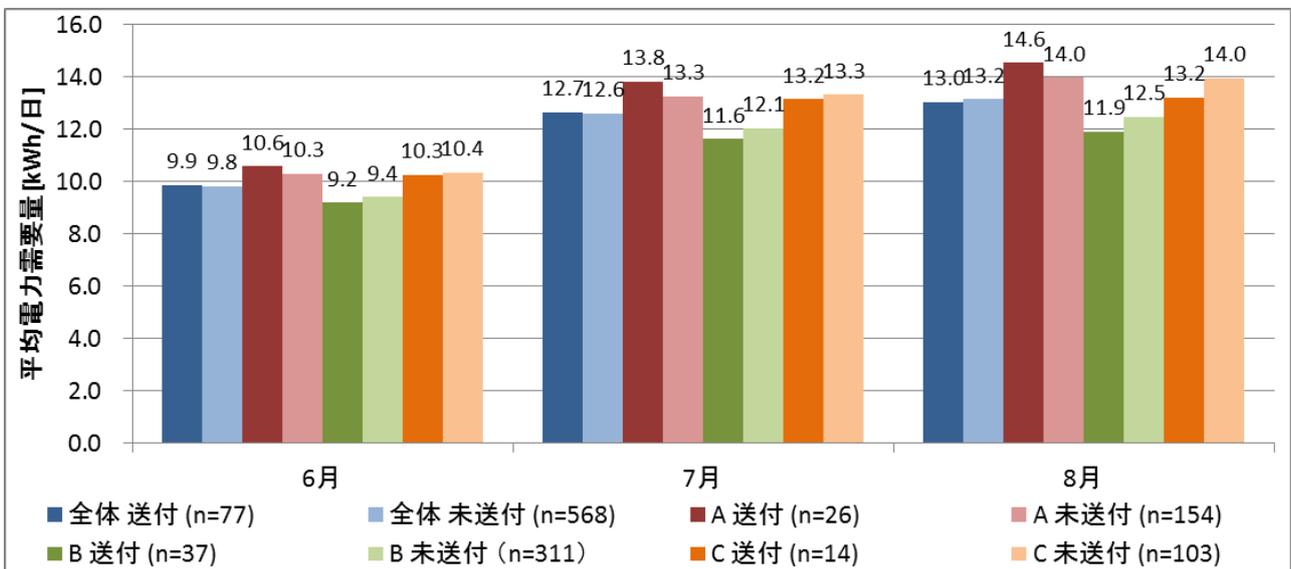


図 3-28 レポート送付・未送付家庭での1日電力需要量の比較

3.4.3.2 一括評価

ここではデータ取得した 645 世帯（レポート送付した 77 世帯+送付していない 568 世帯）すべてを分析対象として、省エネアドバイスレポートを種類で分けずに一括で扱って電力需要削減効果を評価した結果について述べる。分析する家庭電力需要データの期間は、3.3.3.1 で前述のとおり、2015 年 5 月 1 日～11 月 1 日の 185 日間とした。回帰分析モデル結果の前に、説明変数の相関係数を表 3-7 に示す。赤字の数値は負であることを意味する。説明変数の中で最も相関が大きい組み合わせは $X_{it}^{read} \cdot X_{it}^{eff}$ (0.67) である。この 2 つはいずれも省エネアドバイスレポートを送付した家庭についてのダミー変数であるため 3.3.3.3 で相関を持つことを予想していたが、実際に両者には中程度の相関が確認できた。それ以外の説明変数の組み合わせでは相関係数は 0.30 を下回っており、相関は弱い。

表 3-7 説明変数の相関係数（一括評価）

	X_{it}^{cool}	X_{it}^{heat}	X_{it}^{humid}	X_t^{holi}	$X_t^{sep30th}$	X_{it}^{read}	X_{it}^{eff}
X_{it}^{cool}	1.00						
X_{it}^{heat}	-0.06	1.00					
X_{it}^{humid}	-0.03	-0.06	1.00				
X_t^{holi}	-0.01	0.04	-0.06	1.00			
$X_t^{sep30th}$	-0.25	0.20	-0.26	-0.00	1.00		
X_{it}^{read}	-0.07	0.09	-0.08	0.00	0.29	1.00	
X_{it}^{eff}	-0.05	0.04	-0.05	0.00	0.19	0.67	1.00

X_{it}^{eff} なしモデルによる回帰分析の結果を表 3-8 に示す。

まずは、固定効果モデルによる結果から見ていく。固定効果モデルでは、分析対象の家庭それぞれに固有な個別効果 α_i が与えられ、一括評価の場合では分析対象世帯数と同じ 645 個の α_i の推定量が計算される。表中では、これらの代表値として α_i の最小値、第一・第二・第三四分位値、最大値を表記している。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.353 で、モデルは 0.1%水準で有意である。説明変数の係数については、 $\beta_{cool} \cdot \beta_{heat} \cdot \beta_{humid} \cdot \beta_{holi}$ の推定量が、いずれも 0.1%の有意水準で正の値を取っている。この結果は、「夏で平均気温が高い日・冬で平均気温が低い日・平均湿度が高い日および休日には 1 日電力需要量が増加する」ことを意味する。推計量の値は、 $\beta_{cool} = 0.937$ kWh/(日・℃), $\beta_{heat} = 0.523$ kWh/(日・℃), $\beta_{humid} = 0.035$ kWh/(日・%), $\beta_{holi} = 0.218$ kWh/日である。一方で、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を表す β_{read} の推定量は有意ではないが正の値を取っている。

次に、変量効果モデルによる結果を見ていく。変量効果モデルでは、個別効果 α_i が全ての家庭に共通な定数項 α と誤差項 v_i によって与えられる。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.354 で、モデルは 0.1%水準で有意である。説明変数の係数と同様、 α の推定量は標準偏差・t 値・P 値・有意性を表記している。説明変数の係数については、いずれの係数の推定量・有意性ともに、固定効果モデルによる結果とほとんど同じである。固定効果モデルと変量効果モデルで推計量に違いが生じない理由として、パネルデータの時点数 T が十分大きくモデルの自由度が確保できている点が挙げられる。固定効果モデルの課題として、家庭の数 I が多くなるほど推定する変数の数が増加してモデルの自由度は低下し、時点数 T が小さい場合には推定量が求められない可能性がある。しかし、今回は時点数 $T = 185$ と大きいので、モデルの自

由度が保たれて固定効果モデルでも問題なく分析できているものと考えられる。

つづいて、ハウスマン検定の結果を見ていく。検定統計量は 8.442 (P 値 0.2075) で、帰無仮説「個別効果 α_i が説明変数 X_{it}^k と相関を持たない」が棄却されない。そのため、変量効果モデルを用いても良いものと判断できる。ただし、今回の結果では固定効果モデルと変量効果モデルの推定量に差異はないので、どちらのモデルを採用しても結果の違いは生じない。

表 3-8 回帰分析結果 (X_{it}^{eff} なしモデル, 一括評価)

固定効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.355	0.353	10904	<2e-16	***
	最小値	第一四分位値	第二四分位値	第三四分位値	最大値
α_i	-2.416	4.724	6.763	9.116	23.671
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	0.937	0.004	239.9	<2e-16	***
β_{heat}	0.523	0.020	26.4	<2e-16	***
β_{humid}	0.035	0.001	59.0	<2e-16	***
β_{holi}	0.218	0.015	14.2	<2e-16	***
$\beta_{sep30th}$	0.014	0.022	0.6	0.516	
β_{read}	0.067	0.063	1.1	0.290	
変量効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.354	0.354	10904	<2e-16	***
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
α	7.255	0.156	46.6	<2e-16	***
β_{cool}	0.937	0.004	239.9	<2e-16	***
β_{heat}	0.522	0.020	26.4	<2e-16	***
β_{humid}	0.035	0.001	59.1	<2e-16	***
β_{holi}	0.218	0.015	14.2	<2e-16	***
$\beta_{sep30th}$	0.014	0.022	0.7	0.508	
β_{read}	0.067	0.063	1.1	0.289	
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%
ハウスマン検定	統計量	自由度	P 値	帰無仮説	
	8.442	6	0.2075	棄却せず	

X_{it}^{eff} ありモデルによる回帰分析の結果を表 3-9 に示す。

まずは、固定効果モデルによる結果から見ていく。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.354 で、モデルは 0.1 %水準で有意である。説明変数の係数については、 $\beta_{cool} \cdot \beta_{heat} \cdot \beta_{humid} \cdot \beta_{holi}$ の推定量が、いずれも 0.1 %の有意水準で正の値を取っており、 X_{it}^{eff} なしモデルによる結果とほぼ同じである。 β_{eff} の推定量も、同様に 0.1 %の有意水準で正の値を取っている。 β_{eff} は省エネアドバイスレポートの「他世帯との比較」で「8月が平均的な世帯よりも省エネであった」ことを伝えることによる影響を表しており、この結果は「平均よりも省エネ的であったという情報提供によって、1日電力需要量は平均 0.986 kWh/日ほど増加する」というようにレポート送付によるブーメラン効果を示している。一方で、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を表す β_{read} の推定量は 0.1 %の有意水準で正の値を取っており、「ブーメラン効果を除いた場合には、省エネアドバイスレポートを読むことによって、1日電力需要量は平均 0.382 kWh/日ほど減少する」というようにレポート送付による電力需要削減効果を示している。

次に、変量効果モデルによる結果を見ていく。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.354 で、モデルは 0.1 %水準で有意である。ブーメラン効果については $\beta_{eff} = 0.972$ kWh/日となり、固定効果モデルによる結果と比べてわずかに影響度は小さいが、0.1 %の有意水準で負の値を取る点に変わりはない。ブーメラン効果を除いたレポート送付による影響は $\beta_{read} = -0.375$ kWh/日となり、これも固定効果モデルによる結果と比べてわずかに影響度は小さいが、0.1 %の有意水準で正の値を取る点に変わりはない。 $\beta_{read} \cdot \beta_{eff}$ 以外の説明変数の係数については、推定量・有意性ともに、固定効果モデルによる結果とほとんど同じである。

つづいて、ハウスマン検定の結果を見ていく。検定統計量は 89.226 (P 値 $< 2.2e-16$) で、帰無仮説「個別効果 α_i が説明変数 X_{it}^k と相関を持たない」が棄却される。そのため、変量効果モデルの制約条件を満たさないので、固定効果モデルを用いた結果を採用するべきである。

表 3-9 回帰分析結果 (X_{it}^{eff} ありモデル, 一括評価)

固定効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.356	0.354	9361	<2e-16	***
	最小値	第一四分位値	第二四分位値	第三四分位値	最大値
α_i	-2.417	4.717	6.755	9.121	23.670
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	0.937	0.004	240.0	<2e-16	***
β_{heat}	0.526	0.020	26.6	<2e-16	***
β_{humid}	0.035	0.001	59.1	<2e-16	***
β_{holi}	0.218	0.015	14.2	<2e-16	***
$\beta_{sep30th}$	0.014	0.022	0.6	0.529	
β_{read}	-0.382	0.084	-4.6	0.000	***
β_{eff}	0.986	0.121	8.2	0.000	***
変量効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.354	0.354	9359	<2e-16	***
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
α	7.254	0.153	47.6	<2e-16	***
β_{cool}	0.937	0.004	240.0	<2e-16	***
β_{heat}	0.525	0.020	26.6	<2e-16	***
β_{humid}	0.035	0.001	59.1	<2e-16	***
β_{holi}	0.218	0.015	14.2	<2e-16	***
$\beta_{sep30th}$	0.014	0.022	0.6	0.519	
β_{read}	-0.375	0.084	-4.5	0.000	***
β_{eff}	0.972	0.120	8.1	0.000	***
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%
ハウスマン検定	統計量	自由度	P 値	帰無仮説	
	89.226	7	< 2.2e-16	棄却	

3.4.3.3 種類別評価

一括評価に続いて、ここでは送付したレポートの種類別（「A 夜型生活タイプ」「B 普段の生活が省エネタイプ」「C その他タイプ」）に分けて、電力需要削減効果を評価した結果について述べる。先ほどの一括評価による結果から、固定効果モデルと変量効果モデルで推計量に違いが生じず、その理由としてパネルデータの時点数 T が十分大きく固定効果モデルでも自由度が確保できていると考えられる。また X_{it}^{eff} ありモデルでは、ハウスマン検定で帰無仮説「個別効果 α_i が説明変数 X_{it}^k と相関を持たない」が棄却され、変量効果モデルの制約条件を満たさない。以上の点から、今回の回帰分析では固定効果モデルを用いる方がよいと判断し、以降では固定効果モデルによる結果のみ説明していく。

まずは「A 夜型生活タイプ」の評価結果について、説明変数の相関係数を表 3-10 に示す。説明変数の中で最も相関が大きい組み合わせは $X_{it}^{read} \cdot X_{it}^{eff}$ (0.57) である。次いで相関が大きいのは $X_{it}^{sep30th} \cdot X_{it}^{read}$ (0.32) で、この2つはいずれもレポートを送付する9月30日より前 ($t < 153$) には0をとるダミー変数であるために中程度の相関を持つ。それ以外の説明変数の組み合わせでは相関係数は0.30を下回っており、相関は弱い。

X_{it}^{eff} なしモデルによる回帰分析の結果を表 3-11 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は0.380で、モデルは0.1%水準で有意である。説明変数の係数については、 $\beta_{cool} \cdot \beta_{heat} \cdot \beta_{humid} \cdot \beta_{holi}$ の推定量が、いずれも0.1%の有意水準で正の値を取っている。推計量の値は、 $\beta_{cool} = 1.016$ kWh/(日・℃)、 $\beta_{heat} = 0.550$ kWh/(日・℃)、 $\beta_{humid} = 0.033$ kWh/(日・%)、 $\beta_{holi} = 0.418$ kWh/日である。一方で、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を表す β_{read} の推定量は5%有意水準で負の値を取っている。推計量の値は、 $\beta_{read} = -0.265$ kWh/日である。

X_{it}^{eff} ありモデルによる回帰分析の結果を表 3-12 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は0.380で、モデルは0.1%水準で有意である。説明変数の係数については、 $\beta_{cool} \cdot \beta_{heat} \cdot \beta_{humid} \cdot \beta_{holi}$ の推定量が、いずれも0.1%の有意水準で正の値を取っており、 X_{it}^{eff} なしモデルによる結果とほぼ同じである。 β_{eff} の推定量も、同様に0.1%の有意水準で正の値を取っており、この結果は「平均よりも省エネ的であったという情報提供によって、1日電力需要量は平均1.407 kWh/日ほど増加する」というようにレポート送付によるブーメラン効果を示している。一方で、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を表す β_{read} の推定量は0.1%の有意水準で負の値を取っており、「ブーメラン効果を除いた場合には、省エネアドバイスレポートを読むことによって、1日電力需要量は平均0.726 kWh/日ほど減少する」というようにレポート送付による電力需要削減効果を示している。

表 3-10 説明変数の相関係数 (種類別評価 A)

	X_{it}^{cool}	X_{it}^{heat}	X_{it}^{humid}	X_t^{holi}	$X_t^{sep30th}$	X_{it}^{read}	X_{it}^{eff}
X_{it}^{cool}	1.00						
X_{it}^{heat}	-0.06	1.00					
X_{it}^{humid}	-0.04	-0.05	1.00				
X_t^{holi}	-0.01	0.05	-0.06	1.00			
$X_t^{sep30th}$	-0.26	0.19	-0.26	-0.00	1.00		
X_{it}^{read}	-0.08	0.07	-0.11	0.00	0.32	1.00	
X_{it}^{eff}	-0.05	0.02	-0.07	0.00	0.18	0.57	1.00

表 3-11 回帰分析結果（固定効果・ X_{it}^{eff} なしモデル，種類別評価 A）

固定効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.382	0.380	3408	<2e-16	***
	最小値	第一 四分位値	第二 四分位値	第三 四分位値	最大値
α_i	0.177	4.745	7.171	10.046	23.635
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	1.016	0.008	134.6	<2e-16	***
β_{heat}	0.550	0.043	12.9	<2e-16	***
β_{humid}	0.033	0.001	28.4	<2e-16	***
β_{holi}	0.418	0.030	14.0	<2e-16	***
$\beta_{sep30th}$	0.045	0.043	1.0	0.294	
β_{read}	-0.265	0.110	-2.4	0.016	*
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

表 3-12 回帰分析結果（固定効果・ X_{it}^{eff} ありモデル，種類別評価 A）

固定効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.383	0.380	2930	<2e-16	***
	最小値	第一 四分位値	第二 四分位値	第三 四分位値	最大値
α_i	0.172	4.619	7.165	10.041	23.630
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	1.017	0.008	134.8	<2e-16	***
β_{heat}	0.556	0.043	13.0	<2e-16	***
β_{humid}	0.033	0.001	28.5	<2e-16	***
β_{holi}	0.417	0.030	14.0	<2e-16	***
$\beta_{sep30th}$	0.045	0.043	1.1	0.291	
β_{read}	-0.726	0.131	-5.5	0.000	***
β_{eff}	1.407	0.219	6.4	0.000	***
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

つづいて「B 普段の生活が省エネタイプ」の評価結果について、説明変数の相関係数を表 3-13 に示す。説明変数の中で最も相関が大きい組み合わせは $X_{it}^{read} \cdot X_{it}^{eff}$ (0.72) である。「B 普段の生活が省エネタイプ」は「A 夜型生活タイプ」と比べて「8 月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。」と伝えられた家庭が多いので、2 つの相関が強くなっている。それ以外の説明変数の組み合わせでは相関係数は 0.30 を下回っており、相関は弱い。

X_{it}^{eff} なしモデルによる回帰分析の結果を表 3-14 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.339 で、モデルは 0.1 % 水準で有意である。説明変数の係数については、 $\beta_{cool} \cdot \beta_{heat} \cdot \beta_{humid} \cdot \beta_{holi}$ の推定量が、いずれも 0.1 % の有意水準で正の値を取っている。推計量の値は、 $\beta_{cool} = 0.909$ kWh/(日・°C)、 $\beta_{heat} = 0.497$ kWh/(日・°C)、 $\beta_{humid} = 0.032$ kWh/(日・%)、 $\beta_{holi} = 0.191$ kWh/日である。一方で、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を表す β_{read} の推定量は有意でないが正の値を取っている。

X_{it}^{eff} ありモデルによる回帰分析の結果を表 3-15 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.339 で、モデルは 0.1 % 水準で有意である。説明変数の係数については、 $\beta_{cool} \cdot \beta_{heat} \cdot \beta_{humid} \cdot \beta_{holi}$ の推定量が、いずれも 0.1 % の有意水準で正の値を取っており、 X_{it}^{eff} なしモデルによる結果とほぼ同じである。 β_{eff} の推定量は、1 % の有意水準で正の値を取っており、この結果は「平均よりも省エネ的であったという情報提供によって、1 日電力需要量は平均 0.504 kWh/日ほど増加する」というようにレポート送付によるブーメラン効果を示している。一方で、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を表す β_{read} の推定量は有意ではないが負の値を取っている。

表 3-13 説明変数の相関係数 (種類別評価 B)

	X_{it}^{cool}	X_{it}^{heat}	X_{it}^{humid}	X_t^{holi}	$X_t^{sep30th}$	X_{it}^{read}	X_{it}^{eff}
X_{it}^{cool}	1.00						
X_{it}^{heat}	-0.06	1.00					
X_{it}^{humid}	-0.03	-0.07	1.00				
X_t^{holi}	-0.01	0.04	-0.06	1.00			
$X_t^{sep30th}$	-0.25	0.21	-0.25	-0.00	1.00		
X_{it}^{read}	-0.07	0.11	-0.07	0.00	0.27	1.00	
X_{it}^{eff}	-0.05	0.05	-0.05	0.00	0.19	0.72	1.00

表 3-14 回帰分析結果（固定効果・ X_{it}^{eff} なしモデル，種類別評価 B）

固定効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.341	0.339	5524	<2e-16	***
	最小値	第一 四分位値	第二 四分位値	第三 四分位値	最大値
α_i	-0.987	4.554	6.498	8.934	21.849
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	0.909	0.005	171.2	<2e-16	***
β_{heat}	0.497	0.023	21.5	<2e-16	***
β_{humid}	0.032	0.001	40.8	<2e-16	***
β_{holi}	0.191	0.021	9.2	<2e-16	***
$\beta_{sep30th}$	0.017	0.029	0.6	0.547	
β_{read}	0.182	0.091	2.0	0.045	*
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

表 3-15 回帰分析結果（固定効果・ X_{it}^{eff} ありモデル，種類別評価 B）

固定効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.341	0.339	4737	<2e-16	***
	最小値	第一 四分位値	第二 四分位値	第三 四分位値	最大値
α_i	-0.987	4.554	6.498	8.933	21.848
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	0.909	0.005	171.2	<2e-16	***
β_{heat}	0.499	0.023	21.6	<2e-16	***
β_{humid}	0.032	0.001	40.8	<2e-16	***
β_{holi}	0.190	0.021	9.2	<2e-16	***
$\beta_{sep30th}$	0.017	0.029	0.6	0.555	
β_{read}	-0.084	0.129	-0.7	0.513	
β_{eff}	0.504	0.173	2.9	0.004	**
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

最後に「C その他タイプ」の評価結果について、説明変数の相関係数を表 3-16 に示す。説明変数の中で最も相関が大きい組み合わせは $X_{it}^{read} \cdot X_{it}^{eff}$ (0.72) である。それ以外の説明変数の組み合わせでは相関係数は 0.30 を下回っており、相関は弱い。

X_{it}^{eff} なしモデルによる回帰分析の結果を表 3-17 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.361 で、モデルは 0.1%水準で有意である。説明変数の係数については、 $\beta_{cool} \cdot \beta_{heat} \cdot \beta_{humid}$ の推定量が、いずれも 0.1% の有意水準で正の値を取っている。推計量の値は、 $\beta_{cool} = 0.897$ kWh/(日・℃)、 $\beta_{heat} = 0.667$ kWh/(日・℃)、 $\beta_{humid} = 0.046$ kWh/(日・%)である。一方で、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を表す β_{read} の推定量は 0.1% の有意水準で正の値を取っている。推計量の値は、 $\beta_{read} = 0.507$ kWh/日である。

X_{it}^{eff} ありモデルによる回帰分析の結果を表 3-18 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.362 で、モデルは 0.1%水準で有意である。説明変数の係数については、 $\beta_{cool} \cdot \beta_{heat} \cdot \beta_{humid}$ の推定量が、いずれも 0.1% の有意水準で正の値を取っており、 X_{it}^{eff} なしモデルによる結果とほぼ同じである。 β_{eff} の推定量は、0.1% の有意水準で正の値を取っており、この結果は「平均よりも省エネ的であったという情報提供によって、1日電力需要量は平均 1.062 kWh/日ほど増加する」というようにレポート送付によるブーメラン効果を示している。一方で、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を表す β_{read} の推定量は有意ではないが負の値を取っている。

表 3-16 説明変数の相関係数 (種類別評価 C)

	X_{it}^{cool}	X_{it}^{heat}	X_{it}^{humid}	X_t^{holi}	$X_t^{sep30th}$	X_{it}^{read}	X_{it}^{eff}
X_{it}^{cool}	1.00						
X_{it}^{heat}	-0.05	1.00					
X_{it}^{humid}	-0.03	-0.05	1.00				
X_t^{holi}	-0.00	0.08	-0.06	1.00			
$X_t^{sep30th}$	-0.26	0.18	-0.27	-0.00	1.00		
X_{it}^{read}	-0.07	0.05	-0.06	0.00	0.28	1.00	
X_{it}^{eff}	-0.05	0.06	-0.03	0.00	0.20	0.72	1.00

表 3-17 回帰分析結果（固定効果・ X_{it}^{eff} なしモデル，種類別評価 C）

固定効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.363	0.361	2046	<2e-16	***
	最小値	第一 四分位値	第二 四分位値	第三 四分位値	最大値
α_i	-3.055	4.815	6.643	8.233	22.113
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	0.897	0.009	101.7	<2e-16	***
β_{heat}	0.667	0.084	7.9	0.000	***
β_{humid}	0.046	0.001	33.4	<2e-16	***
β_{holi}	-0.008	0.036	-0.2	0.817	
$\beta_{sep30th}$	-0.044	0.050	-0.9	0.382	
β_{read}	0.507	0.149	3.4	0.001	***
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

表 3-18 回帰分析結果（固定効果・ X_{it}^{eff} ありモデル，種類別評価 C）

固定効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.363	0.362	1756	<2e-16	***
	最小値	第一 四分位値	第二 四分位値	第三 四分位値	最大値
α_i	-3.049	4.821	6.649	8.239	22.120
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	0.897	0.009	101.7	<2e-16	***
β_{heat}	0.658	0.084	7.8	0.000	***
β_{humid}	0.046	0.001	33.3	<2e-16	***
β_{holi}	-0.008	0.036	-0.2	0.817	
$\beta_{sep30th}$	-0.045	0.050	-0.9	0.373	
β_{read}	-0.046	0.210	-0.2	0.828	
β_{eff}	1.062	0.285	3.7	0.000	***
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

以上、「A 夜型生活タイプ」「B 普段の生活が省エネタイプ」「C その他タイプ」とレポートを種類別に分けて電力需要削減効果を評価したときの、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を表す β_{read} の推定量を表 3-19 にまとめる。ここではブーメラン効果を考慮した X_{it}^{eff} ありモデルによる推定結果を示す。「A 夜型生活タイプ」の β_{read} は有意水準 0.1 %で負の値をとっており、推定量の値は-0.726 kWh/日となり、他のレポート種類と比べて削減効果が大きい。一方、「B 普段の生活が省エネタイプ」と「C その他タイプ」の β_{read} は負の値を取っている、変数の有意性は確認できなかった。

また、レポート種類別で評価したときの、ブーメラン効果を表す β_{eff} の推定量を表 3-20 にまとめる。「A 夜型生活タイプ」の β_{eff} は有意水準 0.1 %で 1.407 kWh/日、「B 普段の生活が省エネタイプ」は有意水準 1 %で 0.504 kWh/日、「C その他タイプ」は有意水準 0.1 %で 1.062 kWh/日、といずれの種類のリポートでも β_{eff} の推定量は有意に正の値を取っており、レポート送付によるブーメラン効果が確認できた。先行研究[68]で推定されたブーメラン効果は 0.89 kWh/日であり、今回推定されたブーメラン効果は先行研究の推計値と近い値を取っている。

表 3-19 種類別評価における β_{read} の推定量 (X_{it}^{eff} ありモデル)

レポート種類	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
A	-0.726	0.131	-5.5	0.000	***
B	-0.084	0.129	-0.7	0.513	
C	-0.046	0.210	-0.2	0.828	

有意水準 *** 0.1% ** 1% * 5% . 10%

表 3-20 種類別評価における β_{eff} の推定量 (X_{it}^{eff} ありモデル)

レポート種類	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
A	1.407	0.219	6.4	0.000	***
B	0.504	0.173	2.9	0.004	**
C	1.062	0.285	3.7	0.000	***

有意水準 *** 0.1% ** 1% * 5% . 10%

3.4.3.4 家庭別評価

ここでは「B 普段の生活が省エネタイプ」に着目して、レポートを送付した家庭それぞれの電力需要削減効果の評価した結果について述べる。

まず、式 3-22 から各家庭が省エネアドバイスレポートを読むことによる電力需要への影響度 β_{read_i} を推定する。ここでは、種類別評価の時と同様に固定効果モデルによる結果のみを示す。パネルデータの回帰分析結果について β_{read_i} 以外を表 3-21 に示す。回帰式について、調整済み R² 値は 0.343 で、モデルは 0.1 %水準で有意である。説明変数の係数については、 $\beta_{cool} \cdot \beta_{heat} \cdot \beta_{humid} \cdot \beta_{holi}$ の推定量が、いずれも 0.1 %の有意水準で正の値を取っている。推定量の値は、 $\beta_{cool} = 0.909$ kWh/(日・℃)、 $\beta_{heat} = 0.524$ kWh/(日・℃)、 $\beta_{humid} = 0.032$ kWh/(日・%)、 $\beta_{holi} = 0.189$ kWh/日である。

つづいて、回帰分析によるレポートが送付された家庭 j ($j = 1, 2, \dots, J$) における β_{read_i} の推定量 $\hat{\beta}_{read_j}$ を表 3-22 に示す。「B 普段の生活が省エネタイプ」のレポートを送付した 37 世帯のうち 5 世帯は、アンケートが未返送あるいは記入不備のためレポートを読んだ日付が不明であった。そのため、これら 5 世帯は評価対象から除外し、残る 32 世帯についてレポートの効果を推定した。なお、表中では推定量が小さい順に並べている。 $\hat{\beta}_{read_j} < 0$ でレポート送付によって電力需要が減少する傾向を示しているのは 32 世帯のうち 17 世帯で、このうち有意水準 1 %で電力需要が減少しているのは 2 世帯である。残る 15 世帯が $\hat{\beta}_{read_j} > 0$ でレポート送付によって電力需要が増加する傾向を示しており、このうち 6 世帯が有意水準 1 %で電力需要が増加している。

以上のように、家庭別にレポートの効果を推定すると、レポートを読むことによって電力需要が減少する傾向を示す家庭と逆に増加する傾向を示す家庭がおおよそ半々に分かれることを示す。

表 3-21 回帰分析結果 (家庭別評価)

固定効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.343	0.341	902.5	<2e-16	***
	最小値	第一四分位値	第二四分位値	第三四分位値	最大値
α_i	-0.988	4.553	6.497	8.933	21.847
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	0.909	0.005	171.4	<2e-16	***
β_{heat}	0.524	0.024	21.9	<2e-16	***
β_{humid}	0.032	0.001	40.9	<2e-16	***
β_{holi}	0.189	0.021	9.2	<2e-16	***
$\beta_{sep30th}$	0.011	0.029	0.4	0.693	
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

表 3-22 β_{read_j} の推定量

推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
-2.541	0.499	-5.1	0.000	***
-2.150	0.485	-4.4	0.000	***
-1.177	0.486	-2.4	0.016	*
-0.889	0.507	-1.8	0.079	.
-0.867	0.480	-1.8	0.071	.
-0.844	0.538	-1.6	0.116	
-0.733	0.480	-1.5	0.127	
-0.681	0.480	-1.4	0.156	
-0.501	0.480	-1.0	0.297	
-0.456	0.493	-0.9	0.355	
-0.430	0.480	-0.9	0.370	
-0.327	0.513	-0.6	0.524	
-0.203	0.474	-0.4	0.669	
-0.156	0.493	-0.3	0.751	
-0.135	0.550	-0.2	0.806	
-0.096	0.474	-0.2	0.840	
-0.030	0.474	-0.1	0.950	
0.516	0.474	1.1	0.277	
0.562	0.514	1.1	0.274	
0.600	0.480	1.3	0.211	
0.604	0.480	1.3	0.208	
0.649	0.486	1.3	0.182	
0.692	0.531	1.3	0.193	
0.868	0.493	1.8	0.078	.
1.036	0.493	2.1	0.035	*
1.214	0.493	2.5	0.014	*
1.328	0.486	2.7	0.006	**
1.515	0.486	3.1	0.002	**
1.540	0.480	3.2	0.001	**
1.653	0.480	3.4	0.001	***
2.219	0.487	4.6	0.000	***
2.483	0.474	5.2	0.000	***
有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

つづいて、 $\hat{\beta}_{read_j}$ を被説明変数とした回帰分析の結果を示す。

レポートの感想に基づく回帰分析について、説明変数の相関係数を表 3-23 に示す。「他世帯との比較」の認識度 $X_j^{compare}$ ・「1日の電力の使いかた」の認識度 X_j^{use} には中程度の正の相関(0.55)があり、これは「他世帯との比較」で指摘された内容に事前に気づいていなかった家庭は、同様に「1日の電力の使いかた」で指摘された内容にも事前に気づいていなかった」ことを意味している。

回帰分析の結果を表 3-24 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は0.160で、モデルは5%水準で有意である。説明変数の係数については、 β_{use} の推定量が5%の有意水準で負の値(-0.740 kWh/日)を取っている。一方で、 $\beta_{compare}$ の推定量のP値は0.823と大きく有意でない。つづいて、モデルから説明変数 $X_j^{compare}$ を除いた場合での回帰分析の結果を表 3-25 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は0.186で、モデルは1%水準で有意である。説明変数の係数については、 β_{use} の推定量が1%の有意水準で負の値(-0.702 kWh/日)を取っている。

回帰分析の結果から、 X_j^{use} が大きくなるほど $\hat{\beta}_{read_j}$ が小さくなるという関係が導かれる。 X_j^{use} は、「十分気づいていた」(1) < 「なんとなく気づいていた」(2) < 「余り気づいてなかった」(3) < 「全然気づいてなかった」(4) というように、大きくなるほど「1日の電力の使いかた」で指摘された内容に事前に気づいていなかったことを示す。また $\hat{\beta}_{read_j}$ は省エネアドバイスレポートを読むことによる電力需要への影響度を表し、 $\hat{\beta}_{read_j} < 0$ のときレポート送付によって電力需要が削減されることを示す。以上より、「1日の電力の使いかた」で指摘された内容に事前に気づいていなかった家庭のほうが、レポート送付によって電力需要が削減される」という関係を意味している。

表 3-23 説明変数の相関係数（レポートの感想に基づく回帰分析）

	$X_j^{compare}$	X_j^{use}
$X_j^{compare}$	1.00	
X_j^{use}	0.55	1.00

表 3-24 回帰分析結果（レポートの感想に基づく回帰分析）

	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.214	0.160	3.950	0.030	*
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
α	1.797	0.730	2.5	0.020	*
$\beta_{compare}$	0.065	0.287	0.2	0.823	
β_{use}	-0.740	0.300	-2.5	0.020	*
有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%	

表 3-25 回帰分析結果（レポートの感想に基づく回帰分析 X_j^{use} モデル）

	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.212	0.186	8.106	0.007	**
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
α	1.877	0.629	3.0	0.006	**
β_{use}	-0.702	0.247	-2.8	0.008	**
有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%	

省エネ意識に基づく回帰分析について、説明変数の相関係数を表 3-26 に示す。「風呂の残り湯を洗濯に使うかどうか」 X_j^{bath} と「テレビを節電モードに設定しているかどうか」 X_j^{tv} には中程度の正の相関(0.38)がある。この2つはいずれも「まったくおこなっていない」という回答の割合が多く、相対的に取り組みにくい省エネ行動であると考えられ、省エネ意識の低い人はいずれの行動もおこなわない傾向を有するために相関が生じているものと考えられる。残りの組み合わせは相関が弱い。

回帰分析の結果を表 3-27 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は-0.073 である。説明変数の係数については、いずれの推定量も有意でない。これらの説明変数を1つずつ抽出して単回帰分析を行った場合でも有意な説明変数は現れず、電力需要の削減効果と省エネ意識の間に相関関係は確認できなかった。

表 3-26 説明変数の相関係数 (省エネ意識に基づく回帰分析)

	X_j^{shower}	X_j^{bath}	X_j^{walk}	X_j^{tv}
X_j^{shower}	1.00			
X_j^{bath}	0.17	1.00		
X_j^{walk}	0.06	0.00	1.00	
X_j^{tv}	0.12	0.38	0.03	1.00

表 3-27 回帰分析結果 (省エネ意識に基づく回帰分析)

	R^2	補正 R^2	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.066	-0.073	0.475	0.753	
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
α	1.169	0.858	1.362	0.184	
β_{shower}	-0.086	0.262	-0.329	0.745	
β_{bath}	0.040	0.164	0.243	0.810	
β_{walk}	-0.194	0.204	-0.953	0.349	
β_{tv}	-0.149	0.174	-0.854	0.400	
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

クラスタ分析によって得られる電力需要の特徴量に基づく回帰分析について、説明変数の相関係数を表 3-28 に示す。説明変数の中で強い相関を持つのは $Eday_{avej} \cdot Eday_{typicalj}$ (0.95), $Eday_{avej} \cdot Eday_{mostj}$ (0.91), $Eday_{typicalj} \cdot Eday_{mostj}$ (0.78) の組み合わせである。これらはいずれも各家庭の 1 日電力需要量に関する変数であり、そのために強い正の相関を持つ。中程度の相関を持つのは $D_{typicalj} \cdot D_{mostj}$ (-0.37), $Eday_{typicalj} \cdot R_j$ (0.35) であり、残りの組み合わせは相関が弱い。

回帰分析の結果を表 3-29 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.090 である。説明変数の係数については、いずれの推定量も有意でない。次に、P 値の小さい説明変数 $D_{typicalj} \cdot D_{mostj}$ を除いた場合での回帰分析の結果を表 3-30 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.090 で、モデルは 10 %水準で有意である。説明変数の係数については、相変わらずいずれの推定量も有意でない。

そこで、P 値の小さい説明変数 $Eday_{avej}$ を除き、 $Eday_{typicalj} \cdot Eday_{mostj} \cdot R_j$ を説明変数とする回帰分析の結果を表 3-31 に示す。説明変数の定義を今一度確認すると、 $Eday_{typicalj}$ は 8 月の「普段の生活」（標準電力需要パターン）の 1 日電力需要量[kWh/日]、 $Eday_{mostj}$ は 8 月の「多く電力を使った日」（標準以外で 1 日電力需要量が最も多いパターン）の 1 日電力需要量[kWh/日]、 R_j は「普段の生活」と「多くの電力を使った日」の需要量比率[-]である。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.161 で、モデルは 5%水準で有意である。説明変数の係数については、 β_{Etyp} の推定量が 5%の有意水準で負の値 (-0.530) を取っている。この結果は「普段の生活」の 1 日電力需要量が大きい家庭ほどレポートを読むことによる電力需要の削減効果が大きいことを意味している。この理由として、2つの因果関係が考えられる。1つ目は直接的な因果関係で「1日の電力の使いかた」のグラフから「普段の生活」（標準電力需要パターン）の 1 日電力需要量 $Eday_{typicalj}$ が大きいことを読み取って、電力需要を削減する行動を促したと考えられる。2つ目は間接的な因果関係で、 $Eday_{typicalj}$ は $Eday_{avej}$ と強い正の相関を持つので、 $Eday_{typicalj}$ が大きい家庭は「他世帯との比較」において「8月は、平均的な世帯に比べて多くの電力を使ったようです。」という記述が書かれており、この指摘も電力需要を削減する行動を促したと考えられる。

また、 β_R の推定量も 10 %の有意水準で負の値 (-2.468 kWh/日) を取っている。この結果は「普段の生活」に対する「多くの電力を使った日」の 1 日電力需要量の比率が大きい家庭ほど、レポートを読むことによる電力需要の削減効果が大きいことを意味している。この理由として、「1日の電力の使いかた」のグラフから「普段の生活」と「多くの電力を使った日」の差を読み取って、この情報が電力需要を削減する行動を促したと考えられる。

以上の考察から、クラスタ分析によって得られた「普段の生活」の 1 日電力需要量に関する情報、「普段の生活」と「多くの電力を使った日」の電力需要量の比率の情報が、レポート送付による電力需要の削減効果に寄与していることが考えられる。

またこの結果は、「B 普段の生活が省エネタイプ」のレポートを送付したときに高い電力需要削減効果が得られると予想される家庭を、その家庭の電力需要の特徴によって判別できることを示唆している。「普段の生活」の 1 日電力需要量大きい家庭や「普段の生活」と「多くの電力を使った日」の電力需要量の比率が大きい家庭に対して、優先的に「B 普段の生活が省エネタイプ」のレポートを送付することで、今回の実証実験で得られたよりも大きな電量需要削減効果を発揮することが期待される。

表 3-28 説明変数の相関係数（電力需要の特徴量に基づく回帰分析）

	$E_{day_{ave_j}}$	$E_{day_{typical_j}}$	$E_{day_{most_j}}$	R_j	$D_{typical_j}$	D_{most_j}
$E_{day_{ave_j}}$	1.00					
$E_{day_{typical_j}}$	0.95	1.00				
$E_{day_{most_j}}$	0.91	0.78	1.00			
R_j	-0.07	-0.35	0.28	1.00		
$D_{typical_j}$	-0.28	-0.21	-0.10	0.05	1.00	
D_{most_j}	0.23	0.21	0.02	-0.26	-0.37	1.00

表 3-29 回帰分析結果（電力需要の特徴量に基づく回帰分析）

	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.266	0.090	1.510	0.216	.
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
α	6.518	3.301	2.0	0.059	.
β_{Eave}	-0.291	0.385	-0.8	0.457	.
β_{Etyp}	-0.314	0.427	-0.7	0.469	.
β_{Emost}	0.303	0.179	1.7	0.104	.
β_R	-2.336	1.495	-1.6	0.131	.
β_{Dtyp}	-0.053	0.075	-0.7	0.486	.
β_{Dmost}	0.003	0.110	0.0	0.978	.
有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%	.

表 3-30 回帰分析結果（電力需要の特徴量に基づく回帰分析 $D_{typical_j}$ ・ D_{most_j} なしモデル）

	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.251	0.140	2.265	0.088	.
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
α	5.362	2.685	2.0	0.056	.
β_{Eave}	-0.153	0.268	-0.6	0.574	.
β_{Etyp}	-0.367	0.385	-1.0	0.349	.
β_{Emost}	0.242	0.147	1.6	0.111	.
β_R	-2.175	1.418	-1.5	0.137	.
有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%	.

表 3-31 回帰分析結果（電力需要の特徴量に基づく回帰分析 $Eday_{typical_j} \cdot Eday_{most_j} \cdot R_j$ モデル）

	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.242	0.161	2.984	0.048	*
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
α	5.932	2.460	2.4	0.023	*
β_{Etyp}	-0.530	0.253	-2.1	0.045	*
β_{Emost}	0.229	0.143	1.6	0.122	
β_R	-2.468	1.306	-1.9	0.069	.
有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%	

3.4.3.5 期間分割した種類別評価

ここではレポートを読んでから 2 週間までの期間とそれ以降の期間とで分割して、レポート種類別に電力需要削減効果を評価した結果について述べる。3.4.3.3 と同様に回帰分析には固定効果モデルを用いることとし、また 3.4.3.3 でブーメラン効果が有意に電力需要を増加させていることから「 $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ ありモデル」による結果のみを説明していく。

まずは「A 夜型生活タイプ」の評価結果について、説明変数の相関係数を表 3-32 に示す。新しく与えた説明変数 $X_{it}^{read_within2w}$ ・ $X_{it}^{read_after2w}$ ・ $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ が含まれない組み合わせについては、3.4.3.3 の表 3-10 で示した値と同じでいずれの組み合わせも相関は弱いことを確認しているの、ここでは $X_{it}^{read_within2w}$ ・ $X_{it}^{read_after2w}$ ・ $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ のうち少なくとも1つが含まれる組み合わせのみを示す。最も相関が大きい組み合わせは $X_{it}^{read_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_within2w}$ (0.58) で、次いで相関が大きいのは $X_{it}^{read_after2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ (0.56) である。これらはそれぞれレポートを読んでから 2 週間までの期間とそれ以降の期間を示すために中程度の相関を持つ。それ以外の説明変数の組み合わせでは相関係数は 0.30 を下回っており、相関は弱い。

$X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ ありモデルによる回帰分析の結果を表 3-33 に示す。回帰式について、調整済み R^2 値は 0.380 で、モデルは 0.1 %水準で有意である。説明変数の係数については、 β_{cool} ・ β_{heat} ・ β_{humid} ・ β_{holi} の推定量が、いずれも 0.1 %の有意水準で正の値を取っており、3.4.3.3 の X_{it}^{eff} ありモデルによる結果 (表 3-12) とほぼ同じである。 $\beta_{eff_within2w}$ ・ $\beta_{eff_after2w}$ の推定量も、同様に 0.1 %の有意水準で正の値を取っており、この結果は「平均よりも省エネ的であったという情報提供によって、レポートを読んでから 2 週間以内は 1 日電力需要量が平均 1.332 kWh/日ほど増加し、2 週間以降は平均 1.468 kWh/日ほど増加する」というようにレポート送付によるブーメラン効果が時間経過によって微増することを示している。一方で、 $\beta_{read_within2w}$ ・ $\beta_{read_after2w}$ の推定量は 0.1 %の有意水準で負の値を取っており、「ブーメラン効果を除いた場合には、省エネアドバイスレポートを読むことによって、読んでから 2 週間以内は 1 日電力需要量が平均 0.670 kWh/日ほど減少し、2 週間以降は平均 0.773 kWh/日ほど減少する」というようにレポート送付による電力需要削減効果も時間経過によって微増することを示している。

表 3-32 説明変数の相関係数 (期間分割した種類別評価 A)

	X_{it}^{cool}	X_{it}^{heat}	X_{it}^{humid}	X_{it}^{holi}	$X_t^{sep30th}$
$X_{it}^{read_within2w}$	-0.06	0.00	-0.08	0.00	0.22
$X_{it}^{read_after2w}$	-0.06	0.09	-0.07	0.00	0.24
$X_{it}^{eff_within2w}$	-0.03	-0.01	-0.05	0.00	0.12
$X_{it}^{eff_after2w}$	-0.03	0.03	-0.05	0.00	0.13
	$X_{it}^{read_within2w}$	$X_{it}^{read_after2w}$	$X_{it}^{eff_within2w}$	$X_{it}^{eff_after2w}$	
$X_{it}^{read_within2w}$	1.00				
$X_{it}^{read_after2w}$	-0.01	1.00			
$X_{it}^{eff_within2w}$	0.58	-0.01	1.00		
$X_{it}^{eff_after2w}$	-0.01	0.56	0.00	1.00	

表 3-33 回帰分析結果 (固定効果・ $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ ありモデル, 期間分割した種類別評価 A)

固定効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.383	0.380	2279	<2e-16	***
	最小値	第一四分位値	第二四分位値	第三四分位値	最大値
α_i	0.172	4.571	7.165	10.130	23.630
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	1.017	0.008	134.8	<2e-16	***
β_{heat}	0.556	0.043	13.0	<2e-16	***
β_{humid}	0.033	0.001	28.5	<2e-16	***
β_{holi}	0.417	0.030	14.0	<2e-16	***
$\beta_{sep30th}$	0.045	0.043	1.1	0.292	
$\beta_{read_within2w}$	-0.670	0.183	-3.7	0.000	***
$\beta_{read_after2w}$	-0.773	0.167	-4.6	0.000	***
$\beta_{eff_within2w}$	1.332	0.309	4.3	0.000	***
$\beta_{eff_after2w}$	1.468	0.286	5.1	0.000	***
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

つづいて「B 普段の生活が省エネタイプ」の評価結果について、説明変数の相関係数を表 3-34 に示す。

$X_{it}^{read_within2w}$ ・ $X_{it}^{read_after2w}$ ・ $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ が含まれない組み合わせについては、3.4.3.3 の表 3-13 で示した値と同じでいずれの組み合わせも相関は弱い。 $X_{it}^{read_within2w}$ ・ $X_{it}^{read_after2w}$ ・ $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ のうち少なくとも 1 つが含まれる組み合わせの中で、最も相関が大きい組み合わせは $X_{it}^{read_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_within2w}$ (0.73) で、次いで相関が大きいのは $X_{it}^{read_after2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ (0.72) である。「B 普段の生活が省エネタイプ」は「A 夜型生活タイプ」と比べて「8 月は、平均的な世帯に比べて(かなり)省エネであったようです。」と伝えられた家庭が多いので、2 つの相関が強くなっている。それ以外の説明変数の組み合わせでは相関係数は 0.30 を下回っており、相関は弱い。

$X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ ありモデルによる回帰分析の結果を表 3-35 に示す。回帰式について、調整済み R² 値は 0.339 で、モデルは 0.1 %水準で有意である。説明変数の係数については、 β_{cool} ・ β_{heat} ・ β_{humid} ・ β_{holi} の推定量が、いずれも 0.1 %の有意水準で正の値を取っており、3.4.3.3 の X_{it}^{eff} ありモデルによる結果(表 3-15) とほぼ同じである。省エネアドバイスレポートに関する説明変数については、 $\beta_{eff_after2w}$ の推定量が 1 %の有意水準で正の値を取っており、この結果は「平均よりも省エネ的であったという情報提供によって、レポートを読んでから 2 週間以降は 1 日電力需要量が平均 0.598 kWh/日ほど増加する」というようにレポート送付によるブーメラン効果が時間経過によって現れることを示している。 $\beta_{eff_within2w}$ の推定量も有意ではないが正の値を取っている。一方で、 $\beta_{read_within2w}$ ・ $\beta_{read_after2w}$ の推定量は有意ではないが負の値を取っている。

表 3-34 説明変数の相関係数（期間分割した種類別評価 B）

	X_{it}^{cool}	X_{it}^{heat}	X_{it}^{humid}	X_t^{holi}	$X_t^{sep30th}$
$X_{it}^{read_within2w}$	-0.04	0.03	-0.05	0.00	0.18
$X_{it}^{read_after2w}$	-0.05	0.13	-0.05	0.00	0.19
$X_{it}^{eff_within2w}$	-0.03	0.02	-0.04	0.00	0.13
$X_{it}^{eff_after2w}$	-0.04	0.06	-0.04	0.00	0.14
	$X_{it}^{read_within2w}$	$X_{it}^{read_after2w}$	$X_{it}^{eff_within2w}$	$X_{it}^{eff_after2w}$	
$X_{it}^{read_within2w}$	1.00				
$X_{it}^{read_after2w}$	-0.01	1.00			
$X_{it}^{eff_within2w}$	0.73	-0.01	1.00		
$X_{it}^{eff_after2w}$	-0.01	0.72	0.00	1.00	

表 3-35 回帰分析結果（固定効果・ $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ ありモデル，期間分割した種類別評価 B）

固定効果モデル	R ²	補正 R ²	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.341	0.339	3684	<2e-16	***
	最小値	第一四分位値	第二四分位値	第三四分位値	最大値
α_i	-0.987	4.530	6.506	8.922	21.848
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	0.909	0.005	171.2	<2e-16	***
β_{heat}	0.498	0.023	21.5	<2e-16	***
β_{humid}	0.032	0.001	40.8	<2e-16	***
β_{holi}	0.190	0.021	9.2	<2e-16	***
$\beta_{sep30th}$	0.017	0.029	0.6	0.551	
$\beta_{read_within2w}$	-0.094	0.180	-0.5	0.601	
$\beta_{read_after2w}$	-0.075	0.166	-0.5	0.650	
$\beta_{eff_within2w}$	0.397	0.244	1.6	0.104	
$\beta_{eff_after2w}$	0.598	0.226	2.6	0.008	**
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

最後に「C その他タイプ」の評価結果について，説明変数の相関係数を表 3-36 に示す。 $X_{it}^{read_within2w}$ ・ $X_{it}^{read_after2w}$ ・ $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ が含まれない組み合わせについては，3.4.3.3 の表 3-16 で示した値と同じでいずれの組み合わせも相関は弱い。 $X_{it}^{read_within2w}$ ・ $X_{it}^{read_after2w}$ ・ $X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ のうち少なくとも 1 つが含まれる組み合わせの中で，最も相関が大きい組み合わせは $X_{it}^{read_after2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ (0.74) で，次いで相関が大きいのは $X_{it}^{read_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_within2w}$ (0.71) である。それ以外の説明変数の組み合わせでは相関係数は 0.30 を下回っており，相関は弱い。

$X_{it}^{eff_within2w}$ ・ $X_{it}^{eff_after2w}$ ありモデルによる回帰分析の結果を表 3-37 に示す。回帰式について，調整

済み R^2 値は 0.339 で、モデルは 0.1 %水準で有意である。説明変数の係数については、 $\beta_{cool} \cdot \beta_{heat} \cdot \beta_{humid} \cdot \beta_{holi}$ の推定量が、いずれも 0.1 %の有意水準で正の値を取っており、3.4.3.3 の X_{it}^{eff} ありモデルによる結果（表 3-18）とほぼ同じである。 $\beta_{eff_within2w} \cdot \beta_{eff_after2w}$ の推定量は、それぞれ 1 %・5 %の有意水準で正の値を取り、この結果は「平均よりも省エネ的であったという情報提供によって、レポート読んでから 2 週間以内は 1 日電力需要量が平均 1.309 kWh/日ほど増加し、2 週間以降は平均 0.853 kWh/日ほど増加する」というようにレポート送付によるブーメラン効果が時間経過によって減少することを示している。一方で、 $\beta_{read_within2w}$ の推定量は有意ではないが負の値、 $\beta_{read_after2w}$ は有意ではないが正の値を取る。

表 3-36 説明変数の相関係数（期間分割した種類別評価 C）

	X_{it}^{cool}	X_{it}^{heat}	X_{it}^{humid}	X_t^{holi}	$X_t^{sep30th}$
$X_{it}^{read_within2w}$	-0.05	-0.01	-0.05	0.00	0.19
$X_{it}^{read_after2w}$	-0.05	0.08	-0.04	0.00	0.21
$X_{it}^{eff_within2w}$	-0.04	-0.01	-0.03	0.00	0.13
$X_{it}^{eff_after2w}$	-0.04	0.08	-0.01	0.00	0.15
	$X_{it}^{read_within2w}$	$X_{it}^{read_after2w}$	$X_{it}^{eff_within2w}$	$X_{it}^{eff_after2w}$	
$X_{it}^{read_within2w}$	1.00				
$X_{it}^{read_after2w}$	-0.01	1.00			
$X_{it}^{eff_within2w}$	0.71	-0.01	1.00		
$X_{it}^{eff_after2w}$	-0.01	0.74	0.00	1.00	

表 3-37 回帰分析結果（固定効果・ $X_{it}^{eff_within2w} \cdot X_{it}^{eff_after2w}$ ありモデル、期間分割した種類別評価 C）

固定効果モデル	R^2	補正 R^2	F 値	P 値	有意性
回帰式	0.364	0.362	1366	<2e-16	***
	最小値	第一四分位値	第二四分位値	第三四分位値	最大値
α_i	-3.050	4.885	6.648	8.469	22.118
	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
β_{cool}	0.897	0.009	101.7	<2e-16	***
β_{heat}	0.661	0.085	7.8	0.000	***
β_{humid}	0.046	0.001	33.3	<2e-16	***
β_{holi}	-0.008	0.036	-0.2	0.816	
$\beta_{sep30th}$	-0.045	0.050	-0.9	0.372	
$\beta_{read_within2w}$	-0.134	0.286	-0.5	0.640	
$\beta_{read_after2w}$	0.038	0.279	0.1	0.891	
$\beta_{eff_within2w}$	1.306	0.399	3.3	0.001	**
$\beta_{eff_after2w}$	0.853	0.374	2.3	0.023	*
	有意水準	*** 0.1%	** 1%	* 5%	. 10%

以上、種類別にレポートを読んだから 2 週間までの期間とそれ以降の期間とで分割して電力需要削減効果を評価したときの、省エネアドバイスレポートを読むことによる影響を表す $\beta_{read_within2w} \cdot \beta_{read_after2w}$ の推定量を表 3-38 にまとめる。 $\beta_{read_within2w}$ と $\beta_{read_after2w}$ の大小関係を比較すると、「A 夜型生活タイプ」は $\beta_{read_after2w}$ の方が大きく、「B 普段の生活が省エネタイプ」はほとんど差がなく、「C その他タイプ」は $\beta_{read_after2w}$ の方が小さい。これは電力需要削減効果について、レポートを読んだから時間が経過することによる変化がレポートの種類によって異なることを意味し、「A 夜型生活タイプ」は削減効果が増加し、「B 普段の生活が省エネタイプ」は変化がなく、「C その他タイプ」は削減効果が減少する傾向にあることを意味する。「C その他タイプ」では具体的な生活行動と関連させたアドバイスはしておらず、削減効果がレポートを読んだ直後の期間に限られたと考えられる。一方で、生活行動と関連させた省エネアドバイスを提案している「A 夜型生活タイプ」・「B 普段の生活が省エネタイプ」の場合には、削減効果が持続することが示唆された。「A 夜型生活タイプ」で時間経過とともに削減効果が増大した点については、夜型から朝型への生活リズムのシフトを提案しているために、アドバイスの実施までに時間を要したものと考えられる。

また、期間分割してレポート種類別で評価したときの、ブーメラン効果を表す $\beta_{eff_within2w} \cdot \beta_{eff_after2w}$ の推定量を表 3-39 にまとめる。 $\beta_{eff_within2w}$ と $\beta_{eff_after2w}$ の大小関係を比較すると、「A 夜型生活タイプ」「B 普段の生活が省エネタイプ」は $\beta_{eff_after2w}$ の方が大きく、「C その他タイプ」は $\beta_{eff_after2w}$ の方が小さい。これはブーメラン効果についても同様に、レポートを読んだから時間が経過することによる変化がレポートの種類によって異なることを意味し、「A 夜型生活タイプ」「B 普段の生活が省エネタイプ」はブーメラン効果が強まり、「C その他タイプ」はブーメラン効果が弱まることを意味する。

以上の結果から、レポートを送付することによる影響の時間変化がレポートの種類によって異なることが明らかになった。実証実験を実施した時期の都合上、今回の分析ではレポートを読んだ後の 1 日電力需要量データはおよそ 1 か月分に限られている。より長期的な時間変化を評価するためには、継続的な分析が求められる。

表 3-38 期間分割した種類別評価における $\beta_{read_within2w} \cdot \beta_{read_after2w}$ の推定量 ($X_{it}^{eff_within2w} \cdot X_{it}^{eff_after2w}$ ありモデル)

レポート種類	レポートを読んだから	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
A	2 週間以内	-0.670	0.183	-3.7	0.000	***
	2 週間以降	-0.773	0.167	-4.6	0.000	***
B	2 週間以内	-0.094	0.180	-0.5	0.601	
	2 週間以降	-0.075	0.166	-0.5	0.650	
C	2 週間以内	-0.134	0.286	-0.5	0.640	
	2 週間以降	0.038	0.279	0.1	0.891	

有意水準 *** 0.1% ** 1% * 5% . 10%

表 3-39 期間分割した種類別評価における $\beta_{eff_within2w} \cdot \beta_{eff_after2w}$ の推定量 ($X_{it}^{eff_within2w} \cdot X_{it}^{eff_after2w}$ ありモデル)

レポート 種類	レポートを 読んでから	推定量	標準偏差	t 値	P 値	有意性
A	2 週間以内	1.332	0.309	4.3	0.000	***
	2 週間以降	1.468	0.286	5.1	0.000	***
B	2 週間以内	0.397	0.244	1.6	0.104	
	2 週間以降	0.598	0.226	2.6	0.008	**
C	2 週間以内	1.306	0.399	3.3	0.001	**
	2 週間以降	0.853	0.374	2.3	0.023	*

有意水準 *** 0.1% ** 1% * 5% . 10%

3.5 まとめ

第3章では、第2章で取り上げた電力需要データの分析手法を応用して、生活行動と電力需要の関係性に関する情報をフィードバックする省エネアドバイスレポートを提案し、この省エネアドバイスレポートを実際に送付して家庭の電力需要削減効果を評価する実証実験について述べた。3種類用意したレポートのうち「B 普段の生活が省エネタイプ」のレポートでは、「普段の生活」（標準電力需要パターン）と「多くの電力を使った日」（標準以外で1日電力需要量が最も大きいパターン）での1日の電力の使いかた（電力需要カーブ）を示して、これらの日の生活行動の振り返りを提案することで、電力需要が増加する要因に対する気づきを促している。省エネアドバイスレポートに同封したアンケートによって、レポートに対する感想を質問した。また家庭電力需要のパネルデータを用いた回帰分析によって、レポートを読むことによる電力需要への影響を評価した。

「B 普段の生活が省エネタイプ」のレポートについての結果を整理する。アンケート結果では、8割の家庭がレポートは「参考になった」と回答した一方、「あまり参考にならなかった」と回答した家庭の意見から「家庭全体ではなく用途別の電力需要の情報提供が求められている」ことが分かった。「普段の生活」と「多くの電力を使った日」での1日の電力の使いかたは、事前に気付いていた家庭と気づいてなかった家庭の割合はおおよそ半々であった。生活行動の振り返りは、「実施する予定」と回答した家庭が約60%であった。パネルデータの回帰分析結果では、レポート種類別でレポートを読んだ影響を評価する「種類別評価」のとき、ブーメラン効果を考慮した場合には有意ではないが電力需要は削減される傾向を示す。また家庭別でレポートを読んだ影響を評価する「家庭別評価」の結果から、「普段の生活」の1日電力需要量に関する情報、「普段の生活」と「多くの電力を使った日」の電力需要量の比率の情報が、レポート送付による電力需要の削減効果に寄与していることが示唆された。以上の結果から、生活行動パターンと電力需要の関係性に関する情報を提供することによって、一部の家庭で電力需要を削減する効果を発揮する可能性を示し、ここから「B 普段の生活が省エネタイプ」のレポートを送付したときに高い電力需要削減効果が得られると予想される家庭を電力需要の特徴によって判別できることが示唆された。さらに、いずれのレポート種類においてもブーメラン効果を表す推定量が有意に正の値を取り、「平均よりも省エネ的であった」という情報提供によって1日電力需要量が増加することを明らかにした。このブーメラン効果の推定量は先行研究における推定量と近い値を取ることを確認した。

最後に、省エネアドバイスレポートの課題について述べる。今回の実証実験は「新しく開発した電力需要データの分析手法に基づく、生活行動と電力需要の関係性に関する情報をフィードバックすることによる家庭の省エネルギー効果を検証する」ための初めての試みであり、実証実験に参加する家庭を募集して、参加を希望した家庭を実験群とするオプト・イン型で実施された。オプト・イン型の実証実験では電力需要削減効果が出やすい傾向にあると考えられ、レポートを送付する家庭を増やしたときに同等の電力需要削減効果を発揮するとは限らない。また今回のレポート送付は一度きりであり、電力需要削減効果も一過性のものである可能性が否めない。省エネアドバイスレポートの長期的な電力需要削減効果を評価するためには、レポートを継続的に送付することが必要である。この点に関して、今回レポートを送付した家庭の約90%がレポートの定期無料送付サービスを「希望する」と回答したことは、好材料といえる。今後も継続的に省エネアドバイスレポートの実証実験を通じてレポート送付の効果を評価し、より効果的な情報提供のあり方について検討することが求められる。

第4章 アンケート調査に基づく家庭エネルギー需要の推計

4.1 概要

第2章・第3章では、省エネアドバイスを目的とする家庭電力需要データの分析と、分析から得られた情報を提供する省エネアドバイスレポートの実証について述べた。ここで研究対象とした実際の家庭におけるエネルギー消費は、スマートメーターの普及を背景として今後もさらなる活用が期待されるが、一方で計測データのみを用いる研究アプローチには限界も存在する。第一に、計測データの多くは個人情報保護の観点から世帯属性・生活行動に関する情報が紐付いておらず、その家庭にどのような人が住んでいてどんな行動をしてエネルギー消費が発生するかについては不明である。第二に、現在利用されるスマートメーターの多くは電力消費データのみを計測対象としており、ガス給湯を利用する場合の給湯消費データは少ない。このような理由から、家庭用分散型エネルギーシステムの性能評価においては、計測データよりも、モデルによって推計された家庭エネルギー需要の方が適している。モデルによる推計の場合には、居住者の世帯属性や生活行動を仮想的に設定することができ、電力だけでなく給湯需要も推計することができる。

そこで、筆者は家庭におけるエネルギー（電力・給湯）需要を推計するモデルを新たに開発した[70]。第4章では、この家庭エネルギー需要推計モデルについて述べる。第4章の構成を図4-1に示す。4.1（本節）では、第4章の概要について述べる。

4.2・4.3では、推計モデルで入力値として用いるアンケート調査およびモデルの推計手法について述べる。開発したモデルは、家庭内での居住者の生活行動を再現して、その情報から家庭のエネルギー需要をボトムアップ型で推計する。このような推計形式のモデルは1.2.2で挙げたように多くの先行研究が存在するが、このたび開発したモデルの新規性は「家族構成員間の生活行動の関連性」「生活行動と対応する個々の家電製品・給湯の使用状況」の実態を考慮して需要推計を行う点にある。これまでの研究では生活行動や家電製品・給湯の使用状況の実態が不明であり、この点がモデルの適用範囲を制限していた。そこで、これらの生活行動の実態を把握するために、家庭における生活行動と家電製品・給湯の使用状況に関するアンケート調査を実施して、特定の1日における15分ごとの居場所・生活行動や家電製品・給湯の使用状況などを質問した。家庭エネルギー需要の推計を目的とする独自のアンケート調査の実施は国内初の試みである。4.2では、このアンケート調査の設計、回答者のスクリーニング方法と個人属性の構成について述べる。つづいて、このアンケートの回答結果を入力データとして、開発したモデルを用いて15分間隔での家庭電力・給湯需要カーブを推計する。4.3では、モデルによる需要推計の手法について述べる。

そして、推計した需要を比較して、季節・家族構成・生活様式の違いが需要カーブや1日の需要量に与える影響を調べた。また、推計結果から家庭の年間二次エネルギー消費量を求め、統計値と比較して推計の妥当性評価をした。さらに、今回の推計結果と、家族構成員間の生活行動の関連性を考慮しない場合の家庭の電力・給湯需要の推計結果とを比較して、家族構成員間の生活行動の関連性によるエネルギー需要への影響を調べた。4.4では、推計結果とその考察について述べる。

4.2 アンケート調査の実施

- ・ 「家族構成員間の生活行動の関連性」「生活行動と対応する個々の家電製品・給湯の使用状況」の実態を考慮して、需要推計を行う
- ・ 特定の1日における15分ごとの居場所・生活行動や家電製品・給湯の使用状況などを質問する

4.3 家庭エネルギー需要推計モデル

- ・ アンケートの回答結果を入力データとして、15分間隔での家庭電力・給湯需要カーブを推計するモデルを開発する

4.4 推計結果

- ・ 家族構成・生活様式の違いによる需要カーブや1日需要量への影響を調べる
- ・ 推計結果から得られる年間二次エネルギー消費量を統計値と比較して、推計の妥当性を評価する
- ・ 本研究と先行研究の推計結果を比較して、家族構成員間の生活行動の関連性が需要に与える影響を調べる

図 4-1 第4章の構成

4.2 アンケート調査の実施

4.2.1 概要

「家族構成員間の生活行動の関連性」「生活行動と対応する個々の家電製品・給湯の使用状況」の実態を把握することを目的として、家庭における生活行動や家電製品・給湯の使用状況に関するアンケート調査を実施した。まずは、この2つの目的を達成するうえでのアンケート調査の特徴について述べておく。まず「家族構成員間の生活行動の関連性」の実態を把握するために、女性の回答者に対しては本人の家庭内での生活行動だけでなく、彼女の夫や子供が家庭内でとったおおまかな生活行動についても質問した。日本では専業主婦の割合が高く、彼女たちは在宅時間が長く家庭内の家事労働の中心的な担い手であるため、家族の大まかな生活リズムについても把握している傾向が強いと考えられる。そこで、女性に回答してもらった家族の生活行動から、家族構成員の間に存在する生活行動の関連性を調べる。また「生活行動と対応する個々の家電製品・給湯の使用状況」の実態を把握するために、本人の居場所・行動だけでなく、家電製品や給湯の使用についても質問した。

アンケート調査は、インターネット調査会社マクロミルに依頼して行なったウェブアンケートの形式で実施した。調査対象地域は日本全国とし、調査対象者は(1)20歳以上の学生以外の男性(単身者も含む)と(2)30歳以上の専業主婦とし、2014年の冬・夏にそれぞれ別々に調査対象者を募った。前述のとおり、今回のアンケート調査では女性の回答者が自宅での家族の行動を把握していることが重要となるため、女性の回答者を在宅時間が長いと思われる専業主婦に限定するとともに、回答者集団の男女比は4:6と女性比率を高く設定した。また、幅広い世代のエネルギー需要を推計するため女性(専業主婦)は年齢が30代・40代・50代・60代以上で回答者数が均等になるようにした。様々な年代の子持ち世帯の回答を多くするために、20代女性は調査対象から外し、より年長の回答者にサンプル数を割り当てている。調査の対象期間・回収数・有効回答数を表4-1に示す。

表 4-1 アンケート調査の対象時期・回収数・有効回答数

調査時期	冬	夏
対象期間	2014年1月16日～23日	2014年8月18日～25日
回収数	612	615
有効回答数	531	442
内訳	男性：平日 107, 休日 83 主婦：平日 167, 休日 174	男性：平日 86, 休日 69 主婦：平日 148, 休日 139

4.2.2 調査内容

調査内容は以下のとおりである。調査対象者は 2 グループに分け、片方のグループには直近の平日 1 日、もう片方のグループには直近の休日 1 日を対象日として、1 日の居場所、行動、家電製品・給湯の使用状況について回答してもらった。ここでいう「直近」の日には回答している当日は含まず、前日以前の日について回答してもらった。

【調査内容】

1. 個人属性
2. 対象日（直近の平日または休日 1 日）における 15 分ごとの居場所、行動、家電製品・給湯の使用状況
3. 夫・子供の個人属性、対象日における 15 分ごとの大まかな行動（主婦のみ回答）
4. 各部屋で使用している空調機器の種類

4.2.2.1 個人属性

個人属性に関する質問では、本人の職業・同居している家族の構成・同居している家族の人数・同居している子供の人数・住宅の建て方について質問した。またマクロミルの登録データから回答者の居住地（都道府県）・年齢の情報を取得した。

なお、回答者の居住地に関する情報はエネルギー需要推計の際には用いず、エネルギー需要推計の地域差は空調熱負荷計算の地域条件（4.3.4.2）によって設定する。

4.2.2.2 15分ごとの居場所、行動、家電製品・給湯の使用状況

対象日（直近の平日または休日1日）における15分ごとの「居場所」「行動」「家電製品・給湯の使用状況」を質問した。

まずは、エネルギー需要推計に「居場所」「行動」「家電製品・給湯の使用状況」に関する情報が必要である理由について述べる。家庭では様々な用途でエネルギー需要が発生するが、本研究では家庭エネルギー需要の用途を、照明・空調・家電（厨房を含む）・給湯の4種類とした。照明・空調は、よく知られているように、住宅の光環境（明るさ）と熱環境（温度・湿度）を適正に調整するためのエネルギー需要を指す。日本では、一般的な照明・空調機器は部屋単位で操作されるため、照明・空調需要は居住者が「居場所（どの部屋にいるか）」によって決定する。家電は照明・空調以外の家電製品による電力需要を指し、給湯は文字通りお湯を沸かすためのエネルギー需要を指す。家電・給湯需要は居住者の「家電製品・給湯の使用状況（どんな家電製品やお湯を使用するか）」によって決まり、この家電製品・給湯の使用状況は「住宅内での行動（何をしているか）」によって規定される。以上より、家庭エネルギー需要を推計するためには、居住者の「居場所」「行動」「家電製品・給湯の使用状況」を把握する必要がある。

質問の流れを図4-2に示す。質問は、居場所→行動→家電製品・給湯の使用状況の順に行なった。

まず、1日24時間を15分ごとに区切って96個の時間帯に分け、それぞれの時間帯において外出していたか在宅していたか、在宅の場合はどの部屋に居たか（寝室、子供部屋、居間・食堂、台所、和室、洗面室、浴室、廊下・階段・玄関、その他の部屋、屋外・ベランダ）を質問した。1つの時間帯で回答できる居場所は1か所とし、1つの時間帯に複数の場所に居た場合は最も長時間にわたって居た場所を回答してもらった。

つづいて在宅していた時間帯については、そこで何をしていたかを質問した。居場所に関する質問と同じように、1つの時間帯で回答できる行動類型は1種類とし、1つの時間帯の間に複数の行動をした場合は最も長時間にわたってしていた行動を回答してもらった。ただし、テレビを視聴しながら食事するというような所謂「ながら見行動」を想定して、「テレビ」に関しては「テレビ」以外の行動と一緒に合計2種類の行動を回答できるようにした。

最後にそれぞれの行動をしていた時間帯について、そのときに家電製品や給湯を使用したかを質問した。行動類型と対応する家電製品・給湯の種類を表4-2に示す。

また、居場所、行動、家電製品・給湯の使用状況に関する質問フォームのデザインを図4-3・図4-4・図4-5に示す。質問フォームのマス目をマウスでドラッグ&ドロップすることでマス目の色がグレーからオレンジに変わり、対応する時間帯の回答がされたことを意味する。

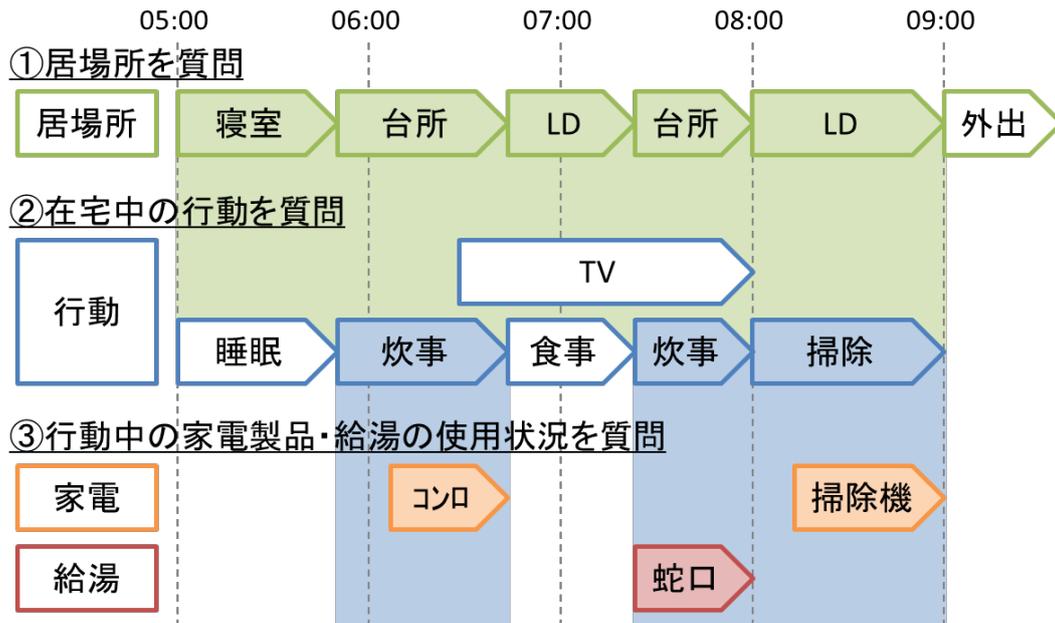


図 4-2 質問の流れ

表 4-2 行動類型と対応する家電製品・給湯の種類

行動類型	具体例	家電製品	給湯
睡眠	30分以上連続した睡眠, 仮眠, 昼寝		
食事	朝食, 昼食, 夕食		
身の回りの用事	入浴, 洗顔, 整髪, 歯磨き, トイレ, 着替え, 化粧	ドライヤー	シャワー, 蛇口
炊事	食事の支度・後片付けをする, 台所まわりの機器を使用する	電子レンジ, 電気ポット, コンロ, 炊飯器*, 食洗機*	蛇口
掃除	掃除用具を使用する, 部屋の片付けをする	掃除機	
その他の家事	洗濯, 子供の世話など, 「炊事」「掃除」に該当しない家事	洗濯機*, 乾燥機*, アイロン	
テレビ	テレビを見る. ビデオ・DVD・HDDレコーダーの視聴も含む	テレビ**	
その他の行動	以上の行動に該当しない行動		

* 炊飯器・食洗機・洗濯機・乾燥機は予約運転を考慮して, それぞれ「炊事」や「その他の家事」をした時間帯に関係なく, 1日すべての時間について使用状況を質問した.

** 行動「テレビ」を回答した時間帯は, 常に家電製品のテレビが使用されるとした.

Q12 午前のそれぞれの時間帯に、**あなたがいた場所**をお答えください。
 ※一つの時間帯の間に複数の場所にした場合は、もっとも長時間いた場所をお答えください。

		0時	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時				
		0分・15分	15分・30分	30分・45分	45分・00分												
在宅している	寝室	<input checked="" type="checkbox"/>															
	子供部屋	<input type="checkbox"/>															
	居間・食堂	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
	台所	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
	和室	<input type="checkbox"/>															
	洗面室	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
	浴室	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
	廊下・階段・玄関	<input type="checkbox"/>															
	その他の部屋	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
	室外・ベランダ	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>										
外出している	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

図 4-3 居場所に関する質問フォーム

Q14 午前の在宅していた時間帯に、**あなたがしていた行動**をお答えください。
 ※前問であなたが「在宅していた」と回答された時間帯のみ回答可能です。
 ※一つの時間帯の間に複数の行動を連続して行った場合は、もっとも長時間していた行動をお答えください。

		0時	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時				
		0分・15分	15分・30分	30分・45分	45分・00分	0分・15分	15分・30分	30分・45分	45分・00分	0分・15分	15分・30分	30分・45分	45分・00分	0分・15分	15分・30分	30分・45分	45分・00分
睡眠		<input checked="" type="checkbox"/>															
食事		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>											
身の回りの用事 (入浴、洗顔、洗髪など)		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>									
家事	炊事	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>											
	掃除	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>													
	その他の家事	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>													
テレビ		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>												
その他の行動		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>														

図 4-4 行動に関する質問フォーム

Q18 あなたが、**ドライヤー**を使った時間帯をお答えください。
 ※前問であなたが「身の回りの用事」をしていたと回答された時間帯のみ回答可能です。

		0時	1時	2時	3時	4時	5時	6時	7時	8時	9時	10時	11時				
		0分・15分	15分・30分	30分・45分	45分・00分	0分・15分	15分・30分	30分・45分	45分・00分	0分・15分	15分・30分	30分・45分	45分・00分	0分・15分	15分・30分	30分・45分	45分・00分
ドライヤー(午前)		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>															
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>												

4.2.2.3 夫・子供の個人属性，対象日における15分ごとの大まかな行動

専業主婦の回答者には本人に関する情報だけでなく，夫と子供（長子）の個人属性と生活行動について質問した²。まず，夫・子供の年齢・職業について質問した。さらに対象日において夫と子供が睡眠・食事・入浴・外出していた時間帯を分かる範囲で答えてもらった。この質問の回答は，4.3.2にて詳述するように，個人別に収集した生活行動データ（15分ごとの「居場所」「行動」「家電製品・給湯の使用状況」）から家族全体での生活行動データを生成するために用いる。

4.2.2.4 各部屋で使用している空調機器の種類

各部屋（寝室，子供部屋，居間・食堂，台所，和室，洗面室，浴室，その他の部屋）で使用する空調機器の種類について質問した。暖房機器の種類は「エアコン」「電気ストーブ」「石油ストーブ」「ガスストーブ」「石油ファンヒーター」「ガスファンヒーター」「電気カーペット」「温水床暖房」「温水暖房（床以外）」「電気床暖房」「コタツ」とし，冷房機器の種類は「エアコン」「扇風機・サーキュレーター」とした。

² 子ども全員分の行動を質問するのは回答者の負担が大きいと判断し，長子についてのみ質問した。

4.2.3 回答者のスクリーニング

アンケートの全回答者の中から偏った生活行動の回答者を取り除くための「スクリーニング」の方法について説明する。回答者の中には、アンケートを真面目に回答せず、いい加減に済ませてしまう人が多少含まれてしまう。また真面目に回答した場合であっても、「たまたま1日中外出していた」というように質問の対象日に偏った生活行動であった回答者も存在する。そこで、以下の5つの条件のうち1つでも該当した回答者は取り除き、残った回答者を「有効回答者」とする。

- 「睡眠」をした時間が4時間を下回る、あるいは12時間を上回る。
- 「食事」をした時間がない。
- 「身の回りの用事」をした時間がない。
- 「外出」をした時間が20時間を上回る。
- 在宅中に、特定の1つの部屋³に在室した時間が20時間を上回る。

³ 寝室、子供部屋、居間・食堂、台所、和室、洗面室、浴室、廊下・階段・玄関、その他の部屋、屋外・ベランダのいずれか1つ。

4.2.4 回答者の個人属性の構成

つづいて、スクリーニングして残った有効回答者について、個人属性の構成を確認する。

居住地の構成を図 4-6 に示す。全体的には統計（平成 22 年国勢調査[55]）と似た傾向を示している。ただし今回の調査では、北海道・関東・近畿地方がわずかに多く、東北・中部・四国・九州地方が少なくなっている。

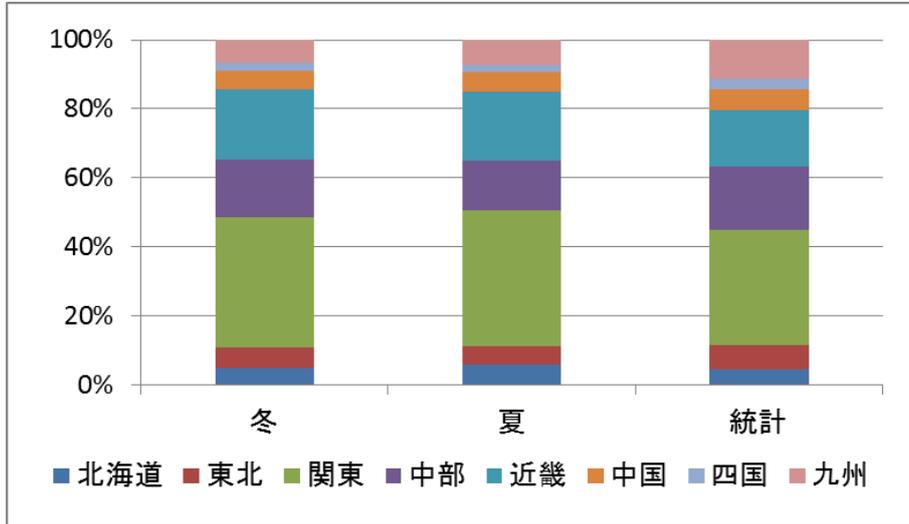


図 4-6 居住地の構成

世帯類型の構成を図 4-7 に示す。夫婦 2 人世帯と回答者夫婦＋子供の世帯が全体の 8 割弱を占めている。一方で単身世帯は 5%程度と少ないが、これはアンケート回答者の 6 割を専業主婦に割り当てたためである。

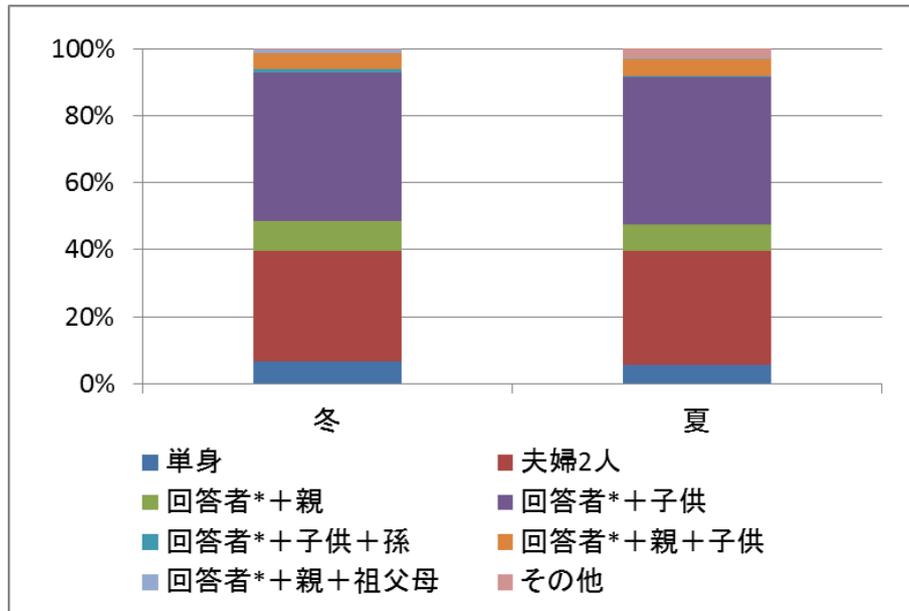


図 4-7 世帯類型の構成

* 「回答者」は未婚・離婚・死別の場合は回答者本人のみ、それ以外の場合は回答者夫婦を意味する。

家族人数の構成を図 4-8 に示す。回答者の 8 割以上が 2 人～4 人世帯である。一人暮らしの回答者が少ないのも、前述の世帯類型における単身世帯と同じように、専業主婦の回答者が多いためと考えられる。この構成は統計（平成 25 年国民生活基礎調査[71]）の単身世帯を除いた世帯の家族人数の構成と似た分布を示している。

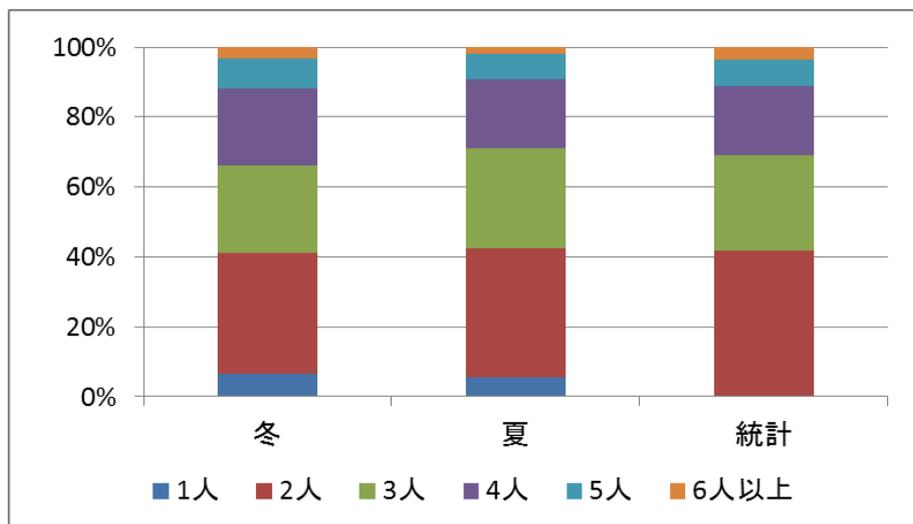


図 4-8 家族人数の構成

世帯所得の構成を図 4-9 に示す。世帯所得の中央値は 500～600 万（冬）と 400～500 万（夏）であり、平成 26 年国民生活基礎調査[10]の世帯所得の中央値（415 万円）から大きく外れない。

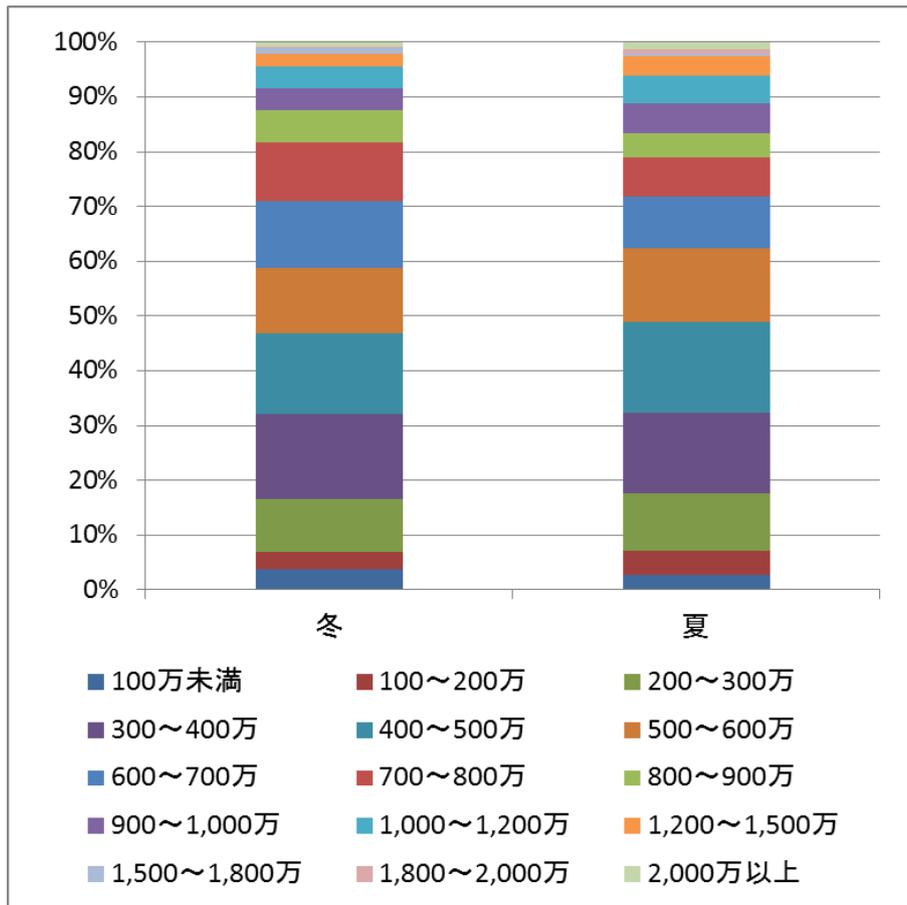


図 4-9 世帯所得の構成

住居種類の構成を図 4-10 に示す。統計（平成 25 年住宅・土地統計調査[72]）と大きな乖離はない。戸建住宅の割合が大きくなっているが、これは単身世帯の割合が小さいのが原因と考えられる。

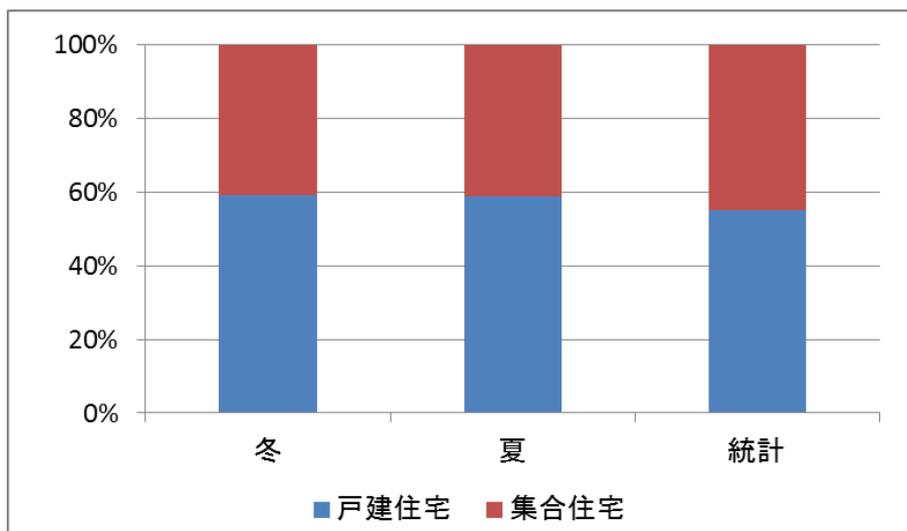


図 4-10 住居種類の構成

4.3 家庭エネルギー需要推計モデル

4.3.1 概要

つづいて、アンケート調査の回答結果から家庭エネルギー需要を推計するモデルを開発する。モデルによるエネルギー需要の推計手順を図 4-11 に示す。

今回のアンケート調査では、冬・夏で合計 1000 人余りの生活行動データ（15 分ごとの「居場所」「行動」「家電製品・給湯の使用状況」）を個人別に収集した。この個人別の生活行動データを統合して、家族の生活行動データを生成する。4.3.2 に生成手法について述べる。

つづいて、生成した家族の生活行動データから家庭エネルギー需要を推計する。4.2.2 で前述のとおり本研究では家庭エネルギー需要の用途を照明・空調・家電・給湯の 4 種類に分類し、家電製品の使用状況から家電電力需要、給湯の使用状況から給湯需要、居場所から照明電力需要をそれぞれ 15 分間隔で推計する。このとき、個々の家電製品・給湯の使用状況や居場所による 15 分あたりのエネルギー消費量を意味する「消費エネルギー単位」を導入する。4.3.3 に消費エネルギー単位の詳細と設定値について述べる。

残った空調電力については、シミュレーションモデルを用いた空調負荷計算によって推計する。住宅熱負荷計算では、住宅の間取りや気象条件だけでなく、居住者の在室状況（居場所）や照明・家電製品の使用状況を内部発熱として入力する。空調は部分間欠運転（家全体ではなく、必要な部屋だけ空調を運転させること）とし、居場所は空調の運転停止にも影響すると想定した。4.3.4 に住宅の空調負荷計算の詳細について述べる。

以上の手順に基づいて、異なる季節・家族構成・生活様式における電力・給湯需要カーブ（15 分ごとの電力・給湯需要の時系列データ）と 1 日の電力・給湯需要量を推計した。4.3.5 に季節・家族構成・生活様式のバリエーションについて述べる。

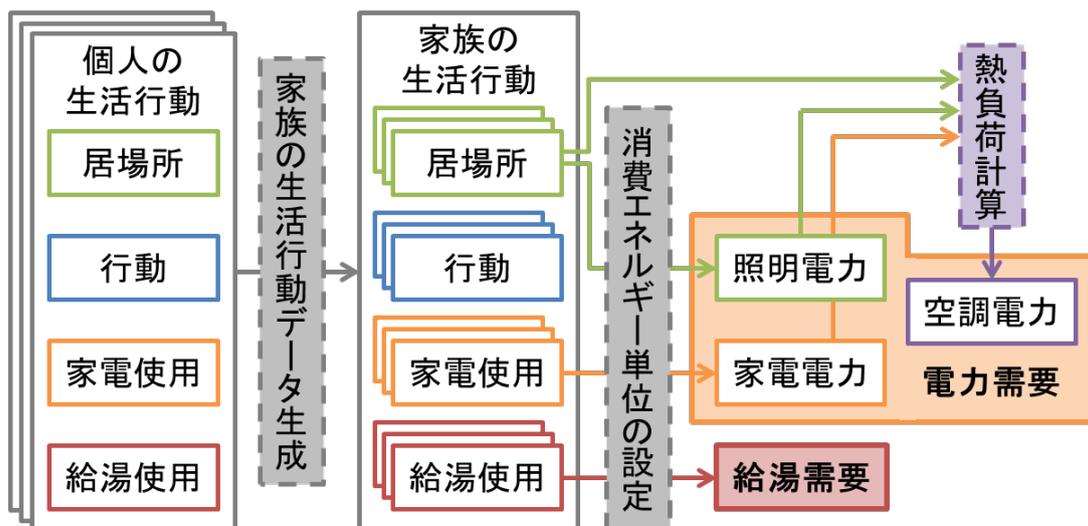


図 4-11 モデルによる家庭エネルギー需要の推計手順

4.3.2 家族の生活行動データ生成

今回のアンケート調査における主婦の回答者には本人の生活行動だけでなく、夫と子供の大まかな生活行動（睡眠・食事・入浴・外出していた時間帯）についても回答してもらっている。そこで、空白となっている夫・子供の居場所と家電製品・給湯の使用状況、および回答されていない時間帯の行動を補完することで、家族全体の生活行動データを生成する⁴。

まず夫については、睡眠・食事・入浴・外出の時間帯が近い人を今回のアンケート調査における男性の回答者の中から探し、彼の情報を用いて居場所、家電製品・給湯の使用状況、空白の時間帯における行動を補完する。夫として選ばれる男性回答者はその人の大まかな生活リズム（睡眠・食事・入浴・外出の時間帯）によって判断され、その人が既婚者か未婚者かは考慮していない。すなわち、実際には未婚である男性が家族の夫として仮想的に選ばれる場合もあるが、日本では家庭内で夫婦の役割を分担する傾向が強く、夫の主な役割とされる仕事は未婚・既婚に関係がないので、影響は限定的であると判断した。

子供については未成年のアンケート回答者がいないため、2010年10月に実施されたNHK放送文化研究所の国民生活時間調査[36]の時間帯別行動割合に従って確率的に補完を行なう。補完の具体的手法としては、国民生活時間調査から15分ごとの家事・テレビ・その他の行動の行為者割合 $R_{housework}(t) \cdot R_{tv}(t) \cdot R_{other}(t)$ を得る($t = 1, 2, \dots, 96$)。そして、空白の時間帯（睡眠・食事・入浴・外出をしていない時間帯）において家事・テレビ・その他の行動をしている確率 $P_{housework}(t) \cdot P_{tv}(t) \cdot P_{other}(t)$ を行為者割合から式4-1・式4-2・式4-3で与える。

$$P_{housework}(t) = \frac{R_{housework}(t)}{R_{housework}(t) + R_{tv}(t) + R_{other}(t)} \quad \text{式 4-1}$$

$$P_{tv}(t) = \frac{R_{tv}(t)}{R_{housework}(t) + R_{tv}(t) + R_{other}(t)} \quad \text{式 4-2}$$

$$P_{other}(t) = \frac{R_{other}(t)}{R_{housework}(t) + R_{tv}(t) + R_{other}(t)} \quad \text{式 4-3}$$

仮に2010年と現在で子供の生活行動が変容しているとしても、子供は学校にいる時間がほとんどであり、家庭への影響は限定的であると考えられる。なお夏の調査対象時期が夏休み期間と重なったため、平日における子供の外出時間が実際よりも短くなっている。そこで国民生活時間調査の外出割合 $R_{out}(t)$ に従って外出時間を補正した。具体的には、それぞれの子供に対しての変数 R を0~1の一様連続分布で与え、 $R_{out}(t) > R$ となる時間帯を外出時間とする。夏休み期間中は、子供とともに母親である主婦の外出時間も短くなることが考えられる。しかしながら今回のアンケート調査は専業主婦を対象としており、専業主婦の外出時間はもともと短いので影響は限定的と考えられる。主婦の1日の平均在室時間(図4-19)

⁴ 本来であれば家族全員に1日の居場所、行動、家電製品・給湯の使用状況を質問するほうがよいが、このようなアンケート調査は困難である。そこで、今回は個人別に行なったアンケート調査を紐づけるという手法を採用した。

を見ると、冬の平日における平均外出時間が 1.79 時間/日であるのに対して、夏の平日における平均外出時間は 2.95 時間/日となっていて、子供の長期休み期間中であっても専業主婦の外出時間が短くなるようなことは確認できない。したがって、子供以外については、外出時間の補正は行わない。

また次子以降の子供の行動については、国民生活時間調査にもとづいて長子についての回答結果の睡眠・入浴・外出の時間帯を補正することで再現する。

4.3.3 消費エネルギー単位の設定

4 種類の家庭エネルギー需要の用途（照明・空調・家電・給湯）のうち，ここでは空調以外の 3 種類，すなわち家電・給湯・照明によるエネルギー需要の推計手法について述べる．空調によるエネルギー需要については 4.3.4 で述べる．

家電電力・給湯需要については，個々の家電製品・給湯の使用状況がアンケート調査により明らかになっているので，あとは個々の家電製品・給湯を使用したときに消費される電力や熱量を設定すれば良い．本研究ではこの電力・熱量の設定値のことを「消費エネルギー単位」と呼ぶこととする．ここでいう「消費エネルギー単位」とは，家電製品・蛇口・シャワーなどを間欠的に使用する（15 分のうち数分使用する）場合も想定したときの，15 分間平均での消費電力[W]・消費熱量[W]を表す．

同様に照明電力については，照明の消費電力を部屋ごとに設定し，15 分ごとの居場所から照明の使用状況を求めることで推計する．

4.3.3.1 家電

まず，先行研究[73][74]やカタログデータから家電製品の消費電力 P_e [W]を得る．これらの家電製品は標準的なサイズのものを想定し，消費電力の計測値・カタログ値に関する公開データのものを使用した⁵．

次に，それぞれの家電製品について使用時間 T_e [分/15 分]（15 分のうち何分間その家電製品を使用しているか）を設定する．短時間での使用が想定されるドライヤー・電子レンジは 5 分/15 分，一方で常に電源が入っていると想定される温水便座・冷蔵庫は常時消費電力が発生するとし，残りの家電製品の使用時間は 15 分/15 分とした．

これにより，消費電力 P_e と使用時間 T_e の積から，家電製品の消費エネルギー単位 UE_e [W]（家電製品を間欠的に使用する場合も想定した時の 15 分平均での消費電力）を求めることができる（式 4-4）．

$$UE_e = \frac{P_e \cdot T_e}{15} \quad \text{式 4-4}$$

さらに，アンケートで質問していない家電製品による消費電力として，居住者 1 人あたり 50 W を常時加える．その他の家電製品による消費電力を設定するにあたっては，資源エネルギー庁資料[75]の家庭部門における機器別電気使用量を参考にした．2009 年の家庭部門における 1 世帯あたりの機器別電気使用量を図 4-12 に示す．アンケートで質問していない家電製品（電子計算機・ネットワーク機器類・DVD レコーダー・ビデオテープレコーダー・電子機器その他）による電気使用量は，4,618 kWh/年・世帯 × 25.5 % = 134.4 W/世帯である．これを 2009 年の 1 世帯あたりの平均家族人数 (2.62 人/世帯) で割ると，居住者 1 人あたりの消費電力を 51.3 W/人 と求めることができる．

⁵ 個々の家庭に即したエネルギー需要を推計するためには，家電製品の性能は各家庭で利用されている機種種のデータを採用したり，あるいは家族人数に応じて異なるサイズのデータを設定したりする必要がある．しかしながら，このモデルによるエネルギー需要推計の目的は，ライフステージの進行によって生活リズムが変わることによる電力/給湯需要への影響を明らかにし，またその時の家庭用燃料電池システムの運転性能を評価することにある．そのため，家電製品の性能や後述する空調熱負荷計算における住宅の間取り・性能は標準的なもの 1 種類を想定している．

消費電力・使用時間・消費エネルギー単位の設定値を表 4-3 に示す⁶。

表 4-3 家電の消費電力・使用時間・消費エネルギー単位

行動	家電種類	消費電力 P_e [W]	使用時間 T_e [分/15分]	消費エネルギー 単位 UE_e [W]	備考
身の回りの用事	ドライヤー	775	5	258	※1
	温水便座	35	常時	35	※2
炊事	電子レンジ	1141	5	380	※1
	電気ポット	1201	15	1201	※1
	炊飯器（炊飯）	1200	15	1200	※2
	食洗機（洗浄）	65	15	65	※3
	食洗機（乾燥）	1100	15	1100	※3
	冷蔵庫	80	常時	80	※2
掃除	掃除機	776	15	776	※1
その他の家事	洗濯機	320	15	320	※4
	乾燥機	1100	15	1100	※4
	アイロン	1068	15	1068	※1
テレビ	テレビ	107	15	107	※1
その他	その他の 家電製品	居住者 1 人につき常時		50	

※1 山口ら[73]で実測された消費電力に基づいて設定した。

※2 空気調和・衛生工学会[74]のエネルギー需要モデルで想定された消費電力に基づいて設定した。

※3 パナソニック製の食器洗い乾燥機「NP-TR7」のカタログ消費電力に基づいて設定した。

※4 パナソニック製の洗濯乾燥機「NA-FW100S1」のカタログ消費電力に基づいて設定した。

⁶ 同様の手順で台所コンロの使用によるガス消費量を算出することができる。ガスコンロを使用したときの消費エネルギー単位（15分間でのガス消費量）は $0.0336\text{m}^3/15$ 分とし、使用時間は15分と設定する。このガス需要は電力・給湯需要推計に影響しないが、4.4.4で後述する推計結果の妥当性評価において家電による二次エネルギー消費量として計上される（ガス発熱量は $45\text{MJ}/\text{m}^3$ とする）。

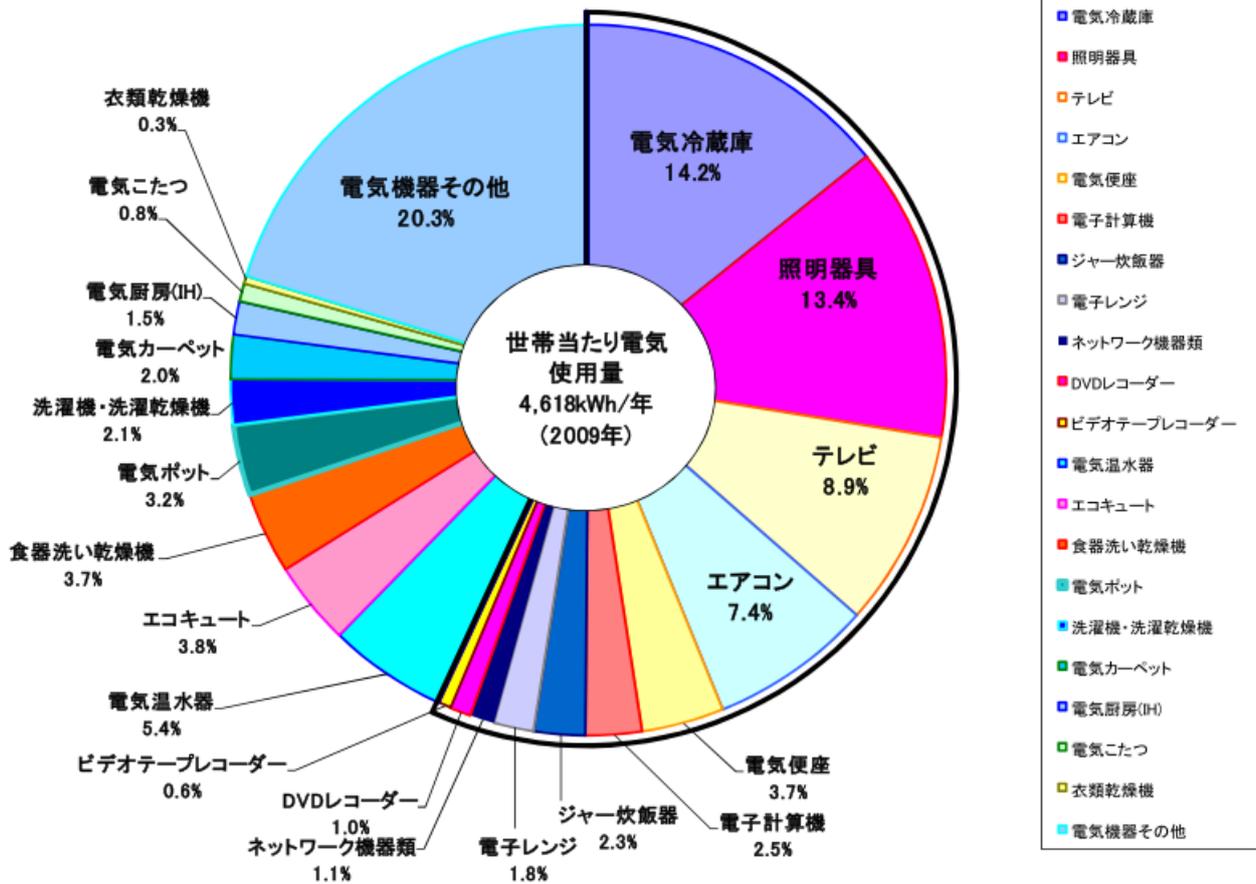


図 4-12 家庭部門における世帯あたりの機器別電気使用量 (2009年) [75]

4.3.3.2 給湯

一般的な蛇口やシャワー1つを1分間使用したとき流量は12 L/分程度[77]である。ただし家族の複数人が同時に蛇口やシャワーを使用した場合には流量が低下することも生じるので、本研究では蛇口やシャワーを15分間出しっぱなしにしたときに消費する湯量 P_{hw} を150 L/15分とする。ただし湯はりについては、一般的な浴槽の容量が180 L程度[77]で、浴槽の湯はりにかかる時間が15分であるとして、流量を180 L/15分とする。また家電と同様に、用途に応じて使用時間 T_{hw} [分/15分]を設定する。

ここからさらに、水の常温と湯温を設定することで、各用途での給湯による消費エネルギー単位 UE_{hw} [W]（蛇口・シャワーを間欠的に使用する場合も想定した時の15分平均での消費熱量）を求めることができる（式 4-5）。ここで、湯温 θ_{hot} は42 °Cとし、水の常温 θ_{cold} [°C]は季節別に異なる値（東京都水道局への問い合わせによって得られた代表的な水温データ[78]に基づいて、冬 9.2 °C、夏 23.0 °C、中間期 16.8 °Cとする）を設定する。また、水の比熱を C_w （=4200 J/L・K）とする。

$$UE_{hw} = \frac{P_{hw} \cdot T_{hw}}{15} \times \frac{(\theta_{hot} - \theta_{cold}) \cdot C_w}{900} \quad \text{式 4-5}$$

消費湯量・使用時間・消費エネルギー単位の設定値を表 4-4 に示す。

表 4-4 給湯の消費湯量・使用時間・消費エネルギー単位

行動	用途	消費湯量 P_{hw} [L/15分]	使用時間 T_{hw} [分/15分]	消費エネルギー単位 UE_{hw} [W]		
				冬	夏	中間期
身の回りの用事	湯はり	180	15	27552	15960	21168
	追いだき	150	3	4592	2660	3528
	蛇口	150	1.5	2296	1330	1764
	シャワー	150	3	4592	2660	3528
炊事	蛇口	150	3	4592	2660	3528

4.3.3.3 照明

照明の使用について、ある部屋に在室者が1人以上いて、かつその居住者の行動が「睡眠」以外である時間帯において、その部屋の照明が使用されるとする。照明の使用によって消費される電力は、省エネ法の判断基準[79]の「レベル0」での照明の消費電力に基づいて設定する。これは2008年時点における標準的照明プランを想定したもので、4人世帯の戸建住宅で「一室一灯」をベースに配置し蛍光灯と白熱電球が混在したプランである。現在は電球型蛍光灯・LED照明が生産の主流であるが、既築住宅に最新型照明を導入するには電気工事が必要な場合がある点、小型ダウンライトは白熱電球の利用が続いている点などから、現在においてもこの照明プランが省エネ法のベースラインと位置付けられている。また住宅の間取りは後述する日本建築学会住宅用標準問題（4.3.4.3に後述）のものとは一致しないが、部屋数と面積はほぼ等しく十分適合可能であると判断した。照明の消費電力の設定値を表4-5に示す。

表 4-5 照明の消費電力

部屋	消費電力[W]
寝室	186
子供部屋	70
居間・食堂	168
台所	66
和室	100
洗面室	54
浴室	24
廊下・階段・玄関	54
その他の部屋	70

4.3.4 空調熱負荷計算

空調電力を推計するための空調熱負荷計算の手順を図 4-13 に示す。空調のために消費される電力需要は空調熱負荷をエアコンの COP で割ることで求めることができる。ここで、空調熱負荷は全てエアコンによって賄われると仮定している⁷。

空調熱負荷（空調機器から室内に供給される温熱または冷熱）は住宅の熱負荷シミュレーションによって計算することができ、今回は BEST 専門版[80]（以降、BEST と略称する）を使用した。BEST は 4 種類の条件（地域条件・建物条件・生活条件・計算条件）を入力データとして、室内の温湿度を一定範囲に保つために必要な熱負荷を算出することができる。住宅の熱負荷計算用ソフトは他にも配布されている（HASPEE[81]、AE-Sim/Heat[82]など）なかで BEST を採用した理由は、BEST では時々刻々の熱負荷が最小 1 分刻みで計算可能である点である。本研究は家庭エネルギー需要を 15 分間隔で推計することを目的としており、そのための空調熱負荷計算には BEST の使用が最も適している。

一方エアコン COP は部屋面積に応じた定格 COP と外気温変化による補正係数を乗じた値で表される。

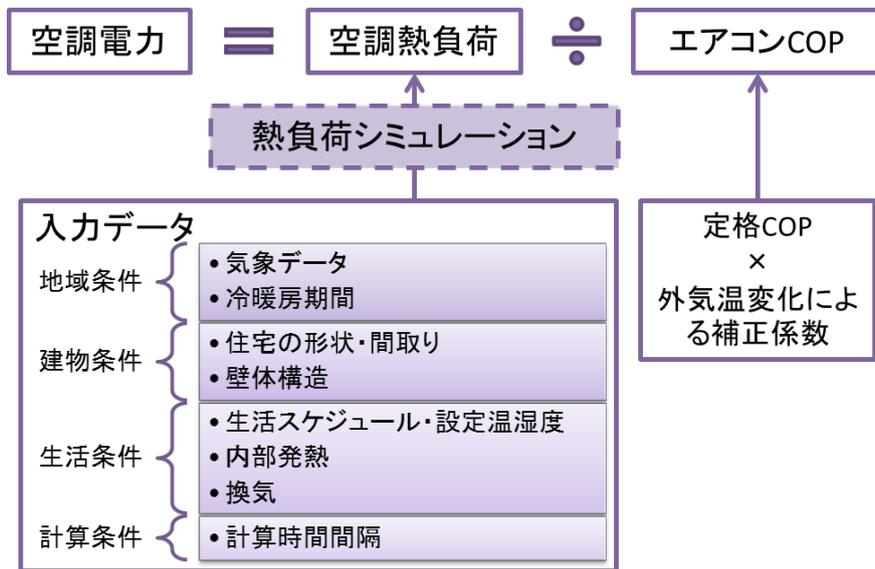


図 4-13 空調熱負荷計算の手順

⁷ 実際の家庭においてはエアコン以外の空調機器も使用され、4.2.2.4 で示したようにアンケート調査において各部屋で使用している空調機器の種類を質問している。今回の推計の目的は生活行動とエネルギー需要の関係性を明らかにすることであるので、推計においては空調機器のバリエーションは与えずエアコンに限定した。なお各部屋で使用している空調機器種類に関する調査結果は、推計値と統計値を比較してモデルの妥当性を評価する際の補正に利用している。

4.3.4.1 熱負荷計算の手順

住宅の熱負荷は、各部屋と隣室・屋外・外壁との熱のやり取り（模式図を図 4-14 に示す）を定式化することで計算できる。式を示しながら、住宅の熱負荷計算の計算手順を説明する。なお、式中において赤字で記された記号は未知数であることを意味する。

時間ステップ n における、任意の部屋 i の熱平衡式は式 4-6 と表すことができる。部屋 i の室温 $\theta_{i,t}$ [°C] の時間変化は、外側面からの伝熱 $Q_{OT,n}$ [W]、隣室壁面からの伝熱 $Q_{IT,n}$ [W]、屋外との換気による熱移動 $Q_{OV,n}$ [W]、隣室との換気による熱移動 $Q_{IV,n}$ [W]、室内での内部発熱 $Q_{IH,n}$ [W] および空調熱負荷 $Q_{AC,n}$ [W] の和から求めることができる。ただし、部屋 i の熱容量を C_i [J/K] とする。

$$C_i \cdot \left(\frac{d\theta_{i,t}}{dt} \right)_{t=n} = Q_{OT,n} + Q_{IT,n} + Q_{OV,n} + Q_{IV,n} + Q_{IH,n} + Q_{AC,n} \quad \text{式 4-6}$$

外表面からの伝熱 ここで言う「外表面」とは外壁・窓・屋根・床といった住宅の内外を分割する境界のことを指す。任意の外表面 k からの伝熱 $Q_{OT,k,n}$ [W] は、外表面 k の相当温度 $\theta_{Oek,n}$ [°C] と部屋 i の室温 $\theta_{i,n}$ [°C] に比例する。全ての外表面からの伝熱 $Q_{OT,n}$ [W] は、各外表面 k からの伝熱 $Q_{OT,k,n}$ [W] の和である（式 4-7）。ただし、 $K_{OTO,k} \cdot K_{OTi,k}$ はそれぞれ $\theta_{Oek,n} \cdot Q_{OT,k,n}$ の比例係数、 $F_{OT,k,n}$ は時間ステップ n に依存する値である。

$$Q_{OT,n} = \sum_k Q_{OT,k,n} = \sum_k (K_{OTO,k} \cdot \theta_{Oek,n} + K_{OTi,k} \cdot \theta_{i,n} + F_{OT,k,n}) \quad \text{式 4-7}$$

隣室壁面からの伝熱 部屋 i と隣り合う任意の部屋 j からの伝熱 $Q_{IT,j,n}$ [W] は、隣室 j の室温 $\theta_{j,n}$ [°C] と部屋 i の室温 $\theta_{i,n}$ [°C] に比例する。全ての隣室壁面からの伝熱 $Q_{IT,n}$ [W] は、各隣室壁面 j からの伝熱 $Q_{IT,j,n}$ [W] の和である（式 4-8）。ただし、 $K_{ITo,j} \cdot K_{ITi,j}$ はそれぞれ $\theta_{j,n} \cdot \theta_{i,n}$ の比例係数、 $F_{IT,j,n}$ は時間ステップ n に依存する値である。

$$Q_{IT,n} = \sum_{j \neq i} Q_{IT,j,n} = \sum_{j \neq i} (K_{ITo,j} \cdot \theta_{j,n} + K_{ITi,j} \cdot \theta_{i,n} + F_{IT,j,n}) \quad \text{式 4-8}$$

屋外との換気による熱移動 屋外との換気風量が $V_{O,n}$ [L/秒] と与えられたとき、屋外との換気による熱移動 $Q_{OV,n}$ [W] は屋外の気温 $\theta_{o,n}$ [°C] と部屋 i の室温 $\theta_{i,n}$ [°C] の温度差によって決まる（式 4-9）。ただし、空気の比熱を C_p [J/(g · K)]、空気の密度を ρ [g/L] とし、ここでは熱交換器の利用を考慮していない。

$$Q_{OV,n} = C_p \cdot \rho \cdot V_{O,n} (\theta_{o,n} - \theta_{i,n}) \quad \text{式 4-9}$$

隣室との換気による熱移動 部屋 i と隣り合う任意の部屋 j との換気風量が $V_{j,n}$ [L/秒] と与えられたとき、隣室 j との換気による熱移動 $Q_{IV,j,n}$ [W] は隣室 j の室温 $\theta_{j,n}$ [°C] と部屋 i の室温 $\theta_{i,n}$ [°C] の温度差によって決まる。ただし、空気の比熱を C_p [J/(g · K)]、空気の密度を ρ [g/L] とする。全ての隣室との換気による熱移動 $Q_{IV,n}$ [W] は、各隣室 j との換気による熱移動 $Q_{IV,j,n}$ [W] の和である（式 4-10）。

$$Q_{IV,n} = \sum_{j \neq i} Q_{IV,j,n} = \sum_{j \neq i} C_p \cdot \rho \cdot V_{j,n} (\theta_{j,n} - \theta_{i,n}) \quad \text{式 4-10}$$

内部発熱 内部発熱 $Q_{IH,n}$ [W]は、各発熱体 l による発熱 $Q_{IH,l,n}$ [W]の和である (式 4-11)。

$$Q_{IH,n} = \sum_l Q_{IH,l,n} \quad \text{式 4-11}$$

式 4-6 に対して式 4-7～式 4-11 を代入して式を整理すると、時間ステップ n における空調熱負荷 $Q_{AC,n}$ [W]は部屋 i の室温 $\theta_{i,n}$ [°C]と隣室 j の室温 $\theta_{j,n}$ [°C]の微分方程式を解くことで求めることができる (式 4-12)。ただし、 $K_{i,i,n} \cdot K_{i,j,n}$ はそれぞれ $\theta_{i,n} \cdot \theta_{j,n}$ の比例係数、 $F_{i,n}$ は時間ステップ n に依存する値である。BEST では陽解法の一つである4次のルンゲクッタ法を利用することで微分方程式を解き、空調熱負荷を計算している。

$$C_i \cdot \left(\frac{d\theta_{i,t}}{dt} \right)_{t=n} = K_{i,i,n} \cdot \theta_{i,n} + \sum_{j \neq i} K_{i,j,n} \cdot \theta_{j,n} + F_{i,n} + Q_{AC,n} \quad \text{式 4-12}$$

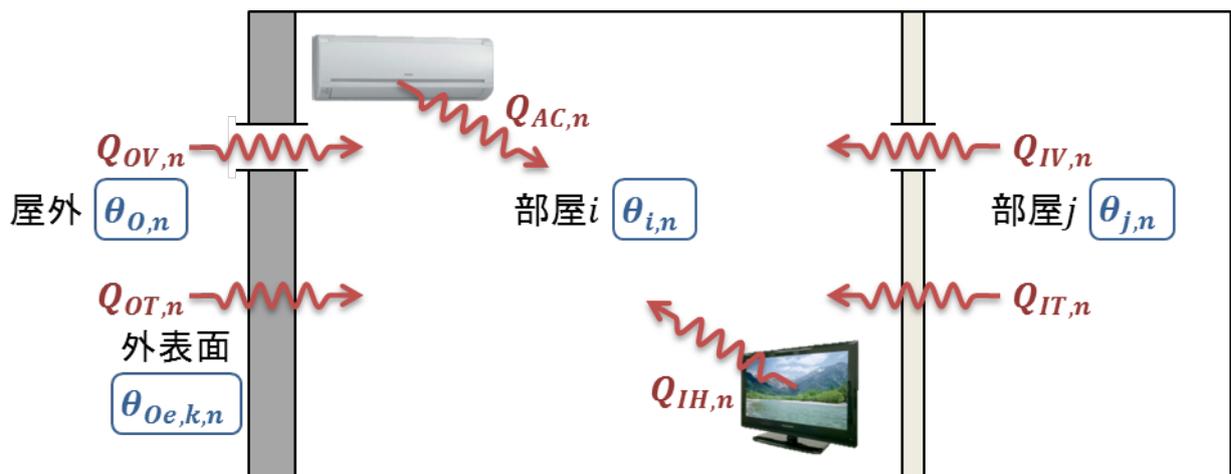


図 4-14 部屋と隣室・屋外・外壁との熱のやり取り

4.3.4.2 地域条件

外部環境の気象データ（外気温度・湿度，水平面全日射量・天空日射量・夜間放射量，風向・風速）は，2006年の東京におけるデータを使用する．日本は南北に長い地理的特徴のため気象条件が地域ごとに幅があるなか，東京は日本の平均的気象条件とよく一致する．気象データ年を2006年とした理由は，現状のBESTで使用可能であるのが2006年のみであるためである．繰り返しになるが，住宅熱負荷を15分間隔でシミュレーションできることが重要であり，本研究ではBESTの利用が適していると判断した．

冷暖房期間はそれぞれの期間中に冷房と暖房のいずれを使用するかを表し，エアコンのJIS規格[83]に基づいて冷房期間を5月23日～10月4日，暖房期間を11月8日～4月16日とする．ただし，室内温湿度が空調設定温度（後述）の範囲を超えたときから空調が運転開始するのであり，冷暖房期間中であっても空調は間欠運転（必要に応じて空調機器を起動・停止する運転方式）であることに注意されたい．

4.3.4.3 建物条件

住宅の間取りは日本建築学会住宅用標準問題[84]のものを採用する。この間取りは日本建築学会が1985年に提案した戸建住宅の標準的なモデルであり、現在でも住宅関連の研究・実務において利用されている。間取りの見取り図を図4-15に示す。住宅用標準問題の延床面積は125.87 m²であるのに対し、平成25年住宅・土地統計調査[72]における関東大都市圏の戸建住宅ストックの延床面積は113.85 m²であり、東京の平均的な住宅は住宅用標準問題よりも多少狭い。

塗りつぶされた部屋は空調範囲を意味する。すなわち1階の居間・食堂と台所、2階の寝室と2つの子供部屋の計4部屋で空調機器が使用されると仮定して、これらの部屋における空調熱負荷を計算する。

住宅の壁体構造、すなわち壁・天井・屋根・床・窓といった建材の種類は住宅断熱性能の決定要因となる。本研究では住宅の断熱性能を表すQ値が新省エネ基準相当(=4.2)になるように、建材の種類を設定する(図4-16)。Q値とは、住宅の総合熱貫流率KA[W/K] (住宅内外の温度差1Kあたりの外壁・窓・屋根・床からの熱損失の合計値)を住宅の延べ床面積S[m²]で割った値であり、Q値が小さいほど住宅の断熱性能が優れていることを意味する[85]。

建材材料の物性値を表4-6、窓の性能を表4-7に示す。



図 4-15 住宅用標準問題

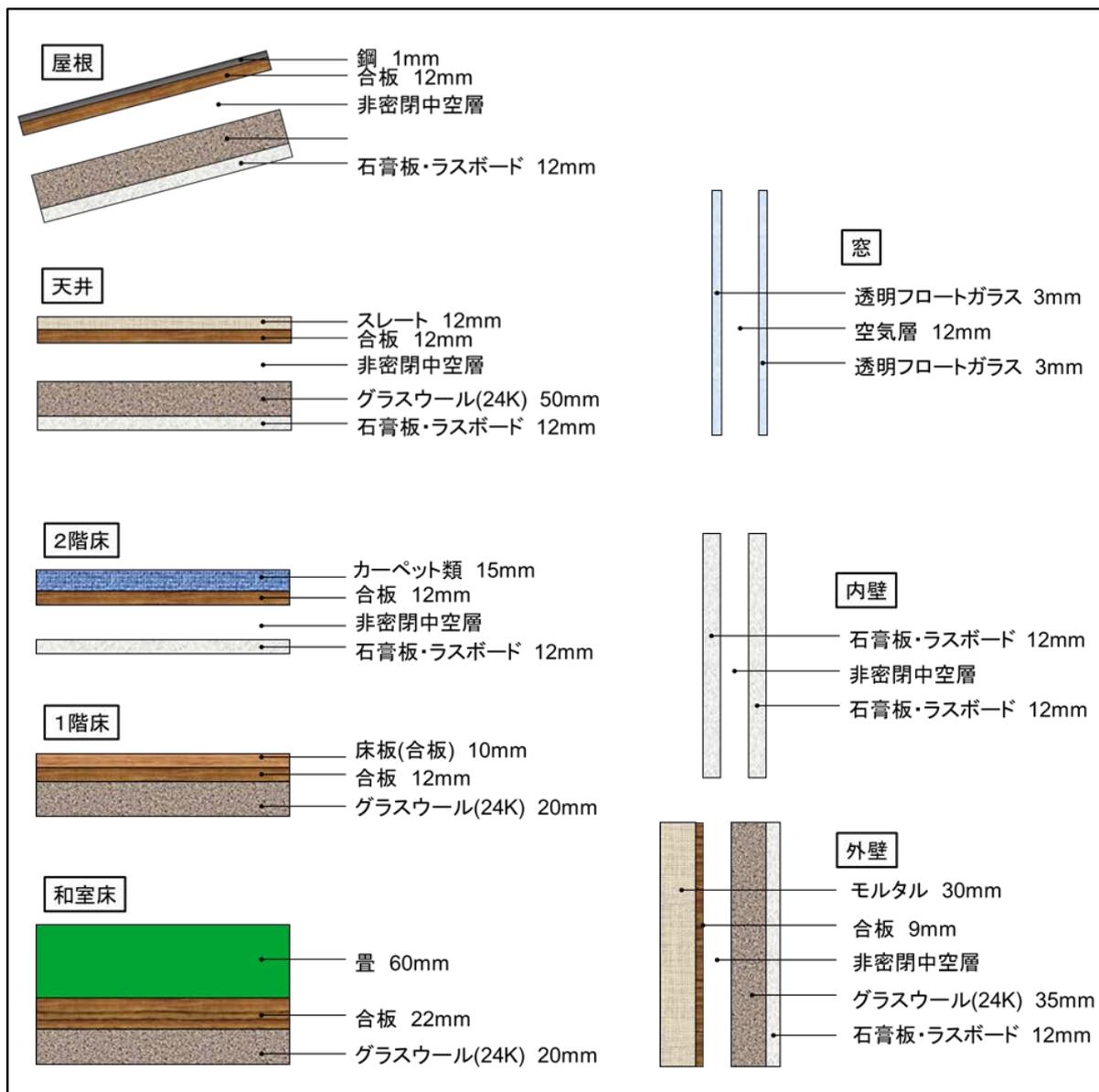


図 4-16 住宅建材の種類

表 4-6 材料の物性値

材料名	熱伝導率 [W/mK]	容積比熱 [J/LK]
鋼	45	3600
スレート	1.2	1800
合板	0.19	720
石膏板・ラスボード	0.17	1000
モルタル	1.5	1600
カーペット類	0.08	320
畳	0.15	290
グラスウール 24K	0.042	20

材料名	熱抵抗値 [m ² K/W]
非密閉中空層	0.07

表 4-7 窓の性能

複層ガラス

	熱貫流率 [W/m ² K]	日射熱 取得率	日射 透過率	可視光 透過率
ブラインドなし	3.14	0.776	0.726	0.802
ブラインドあり	2.64	0.53	0.069	0.062

4.3.4.4 生活条件

空調範囲となる部屋（居間・食堂，寝室，2つの子供部屋）において各時間帯に空調機器が運転されるかどうかは，家族の生活スケジュールと空調機器の設定温湿度によって決まる．生活スケジュールは家族全体の居場所・行動に基づいて，部屋ごとに15分間隔の二値数（1・0）で表される．各部屋に在室者が1人以上いて，かつその居住者の行動が「睡眠」以外である時間帯においてのときを「1」，それ以外の時間帯を「0」とする．また，設定温湿度は冷房時27℃・60%，暖房時20℃・50%とする．生活スケジュールが「1」であり，さらに室内温度が空調設定温度の範囲を超えた（例えば冷房期間中は，室内温湿度が設定温湿度を上回った）時間帯に空調が運転される．

内部発熱とは人体・家電製品・照明から発生する熱のことで，空調熱負荷に影響する．時々刻々の家電製品・照明からの発熱は，そのときに機器が消費している電力に等しいとする[85]．また人体による発熱は，人体の代謝量と季節別の着衣量を考慮して，家族の在室状況から求める．

換気は窓からの自然換気と換気扇による強制換気の2種類がある．自然換気とはエアコンを使用しない温度調節方法を意味し，例えば夏の場合は，室内温度が冷房設定温度よりも高く，外気温度が設定温度よりも低いとき（深夜・早朝など），窓を開けて外気を取り込むことで室内温度を下げることを指す．強制換気は調理時に換気扇が使用されることを想定して，台所においてコンロ使用時に行なうとする．

4.3.4.5 計算条件

空調熱負荷の計算時間間隔は、家電・給湯・照明のエネルギー需要の時間間隔と同じく 15 分とした。

4.3.4.6 エアコン COP の設定

定格 COP は定格空調能力の大きさによって異なり、一般的に能力が高く広い部屋に設置されるようなエアコンほど定格 COP は小さくなる。そこで床面積の大きい居間・食堂と小さい寝室・子供部屋とで異なる能力のエアコンが設置されるとし、省エネ法の判断基準[79]に従って標準エアコンの定格 COP を設定する。エアコンの部分負荷運転による COP の変化は考慮せず、運転率に関係なく常に定格 COP で運転されるものとする。設定値を表 4-8 に示す。

表 4-8 標準エアコンの定格 COP (設定値)

	冷房	暖房
居間・食堂	2.91	3.48
寝室・子供部屋	5.09	5.47

またエアコンの実際の COP は外気温に依存し、真冬・真夏の極端な気温時に COP は低下する。そこで、エアコンの定格 COP を外気温に応じて実際の COP に補正するための補正係数を設定する。省エネ法の判断基準[79]で用いられている定格運転時での補正係数を、外気温 t [°C]によって回帰分析することによって、外気温に応じた補正係数 $\mu(t)$ の計算式を与える。冷房時の補正係数 $\mu_{cool}(t)$ の計算式を式 4-13、暖房時の補正係数 $\mu_{heat}(t)$ の計算式を式 4-14 に示す。また補正係数をグラフ化したものを図 4-17 に示す。外気温が定格条件（暖房時 7°C、冷房時 35°C）のとき補正係数は 1 となることが図から確認できる。エアコンの実 COP は定格 COP×補正係数として与えられる。

$$\mu_{cool}(t) = -0.038t + 2.33 \quad \text{式 4-13}$$

$$\mu_{heat}(t) = 0.0002t^2 + 0.0222t + 0.8348 \quad \text{式 4-14}$$

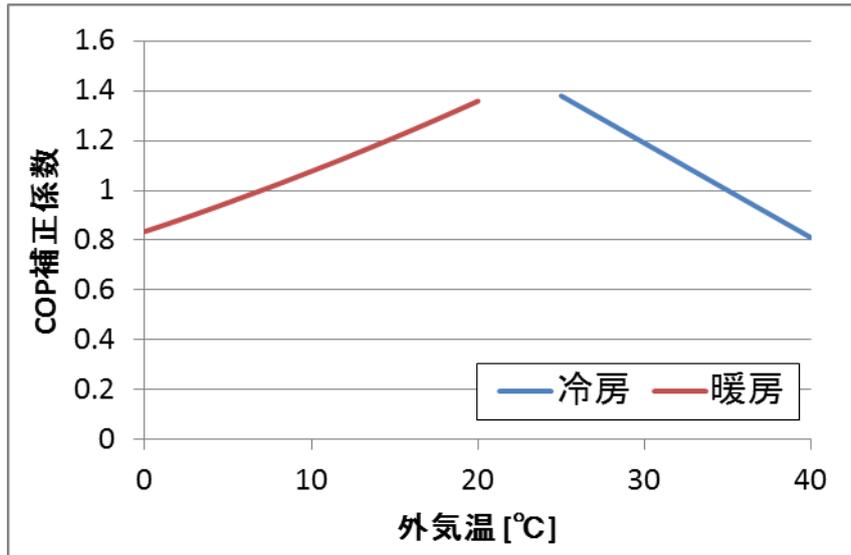


図 4-17 外気温の変化による COP 補正係数

4.3.5 モデルによる推計のバリエーション

以上の手法にしたがって、異なる季節・家族構成・生活様式における15分間隔の電力・給湯需要カーブと1日の電力・給湯需要量を推計した。推計における季節・家族構成・生活様式のバリエーションを図4-18に示す。

季節のバリエーションは冬(暖房期)・夏(冷房期)・中間期(冬寄り)・中間期(夏寄り)の4通りである。冬と夏の期間については空調熱負荷計算の時と同様に、冬を160日間(11月8日～4月16日)、夏を135日間(5月23日～10月4日)とする。また中間期(冬寄り)は22日間(4月17日～4月27日・10月28日・11月7日)で冬の推計結果から暖房電力を除いたもの、中間期(夏寄り)は48日間(4月28日～5月22日・10月5日～10月27日)として夏の推計結果から冷房電力を除いたものとした。冬と夏では、家電製品や給湯の使用状況に違いがあるものと考えられる。そこで、冬の調査に基づく推計日数を182日(160+22日)、夏の調査に基づく推計日数を183日(135+48日)とすることにより、冬と夏の家電製品・給湯使用状況の違いを平均化している。

家族構成のバリエーションは、表4-9に示すようにライフステージに応じて10通りとした。アンケート調査の個人属性の構成(4.2.4)と統計に基づく日本の標準的な家庭の構成から、世帯類型は夫婦2人世帯と夫婦+子供の世帯、家族人数は2~4人とした。夫婦2人世帯と夫婦+子供の世帯はいずれも核家族世帯に該当し、1.1.2.2で示したとおり日本の世帯の約50%は夫婦2人世帯か夫婦+子供の世帯のいずれかである。また家族人数に関しても4.2.4で示したとおり、単身世帯を除くと家族人数が2~4人である家族が約90%を占める。

生活様式のバリエーションは平日10通り・休日4通りの計14通りとし、この生活様式のバリエーションは異なる夫婦の組み合わせによって再現した。すなわち、例えば冬の平日における電力・給湯需要のカーブは10通り推計するが、この推計のもととなる家族の生活行動データは、冬の平日における生活行動について回答した男性女性の回答者の異なる組み合わせによって生成されている。以上、4(季節)×10(家族構成)×14(生活様式)=560通りの電力・給湯需要カーブを推計した。回答者のスクリーニング(4.2.2.4)によって、睡眠時間が極端に短かったり、身の回りの用事をしなかったりするような、偏った生活行動の回答者は選ばれない。

さらに電力・給湯需要カーブの15分値を合計して、1日の電力・給湯需要量を計算した。そして、1日の電力・給湯需要量の平日10通り・休日4通りの平均から、異なる季節・家族構成における1日の電力・給湯需要量を求めた。なお中間期の需要量は中間期(冬寄り)と中間期(夏寄り)をそれぞれの日数で加重平均した値とする。

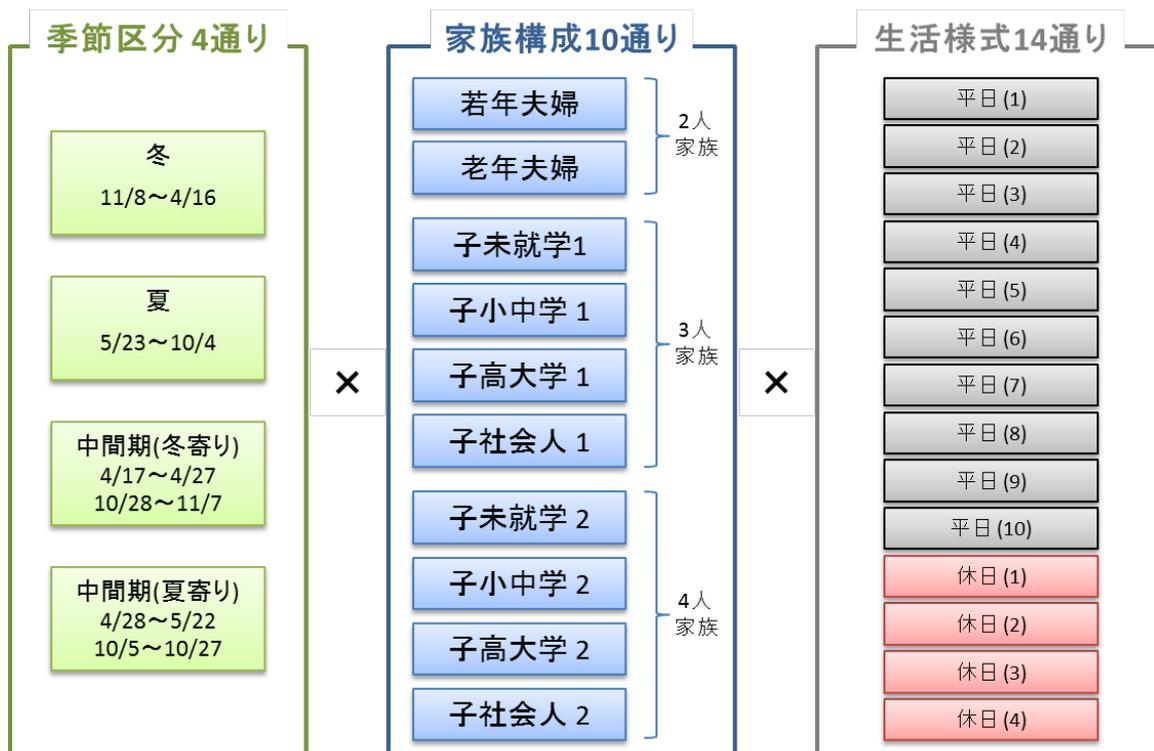


図 4-18 属性のバリエーション

表 4-9 家族構成のバリエーション

	家族人数	構成
若年夫婦	2	50代以下の夫婦
老年夫婦	2	60代以上の夫婦
子未就学1	3	夫婦+未就学児1人
子小中学1	3	夫婦+小中学生1人
子高大生1	3	夫婦+高大学生1人
子社会人1	3	夫婦+社会人の子供1人
子未就学2	4	夫婦+未就学児2人
子小中学2	4	夫婦+小中学生2人
子高大生2	4	夫婦+高大学生2人
子社会人2	4	夫婦+社会人の子供2人

4.4 結果

4.4.1 アンケート調査の回答結果

4.4.1.1 平均在室・行動時間

性別・季節・曜日に関する属性別について、1日の平均在室時間を図 4-19、平均行動時間を図 4-20 に示す。なお、行動時間の合計が24時間を超過しているのは、テレビのながら見行動を「テレビ」と「テレビ」以外の行動とで別々に計上しているためである。

男性の回答者は平日・休日による在宅時間の違いが顕著であり、平日は9時間以上にわたって外出しているのに対し、休日は在宅時間が増え特に居間・食堂で長時間を過ごしている。また行動時間については平日に比べ休日ではテレビやその他の行動に費やす時間が増加している。この結果は、「平日は仕事、休日は休暇」という有職者の典型的な生活様式を反映したものである。冬と夏での在室時間の違いを見ると、休日の外出時間は冬よりも夏のほうが1時間程度短くなり、代わりに居間・食堂やその他の部屋での在室時間が長い。これは夏の日中の暑さを回避するために家庭内で生活する時間が増えることが考えられ、家庭内での行動については、夏のほうが睡眠やその他の行動に費やす時間が長くなっている。

一方で、主婦の回答者は平日・休日による在室時間の傾向は確認できない。外出時間は2～3時間程度であり、在宅中の居場所は居間・食堂が最も長時間であり、次いで寝室、台所の順番で在室時間が長い。行動時間についても平日・休日の違いは確認できない。この結果は、主婦の生活行動の大部分を毎日のルーチンワークが占めることが影響していると考えられる。冬と夏での在室時間の違いを見ると、平日・休日の外出時間は冬よりも夏のほうが1時間程度短くなり、代わりに平日には寝室で休日には居間・食堂で過ごす時間が増えている。これも男性同様に、暑い日中に外出を控えるのが原因と考えられる。家庭内での行動については、夏の平日にはその他の行動に費やす時間が増え、また夏の休日には睡眠・食事・炊事・その他の家事に費やす時間がそれぞれ少し増えている。

時間帯別の在室割合・行動割合については、付録として図 A-6～図 A-21 に示す。

また、本研究のアンケート調査で得られた冬・夏の1日の平均行動時間を、国民生活時間調査[36]における成人男性・主婦の1日の平均行動時間と比較した。比較結果を図 4-21 に示す。なお、NHK放送文化研究所の国民生活時間調査（図中ではNHKと表記）は本研究のアンケート調査と異なる行動項目を設定しており、国民生活時間調査の「炊事・掃除・洗濯」・「子供の世話」を図中では「この他の家事」として表示している。国民生活時間調査では、家事労働の項目である「炊事・掃除・洗濯」が細分化せずに1つの項目とされているため、図中ではすべて「この他の家事」をして表示している。同様に国民生活時間調査の「家庭雑事」「会話・交際」「趣味娯楽」「ラジオ」「新聞」「雑誌・マンガ・本」「休息」「その他・不明」を図中では「この他の行動」、国民生活時間調査の「仕事関連」「学業」「買い物」「通勤」「通学」「社会参加」「スポーツ」「行楽・散策」を図中では「外出している」として表示している。項目別の行動時間の比率は本研究のアンケート調査と国民生活時間調査でよく似ているが、全体的に本研究のアンケート調査よりも国民生活時間調査の方が行動時間の合計が長くなる傾向が見られる。行動項目別に見ると、男性の「テレビ」と主婦の「この他の行動」の行動時間が長くなっている。これは行動の回答形式の違いによるものと考えられる。1つの時間帯（15分間）の中で複数の行動をとっていた場合、国

民生活時間調査ではすべての行動を回答するのに対して、本研究のアンケート調査では最も長時間にわたってしていた行動1つを回答している。そのため、国民生活時間調査の方が行動時間の合計が長くなるものと考えられる。

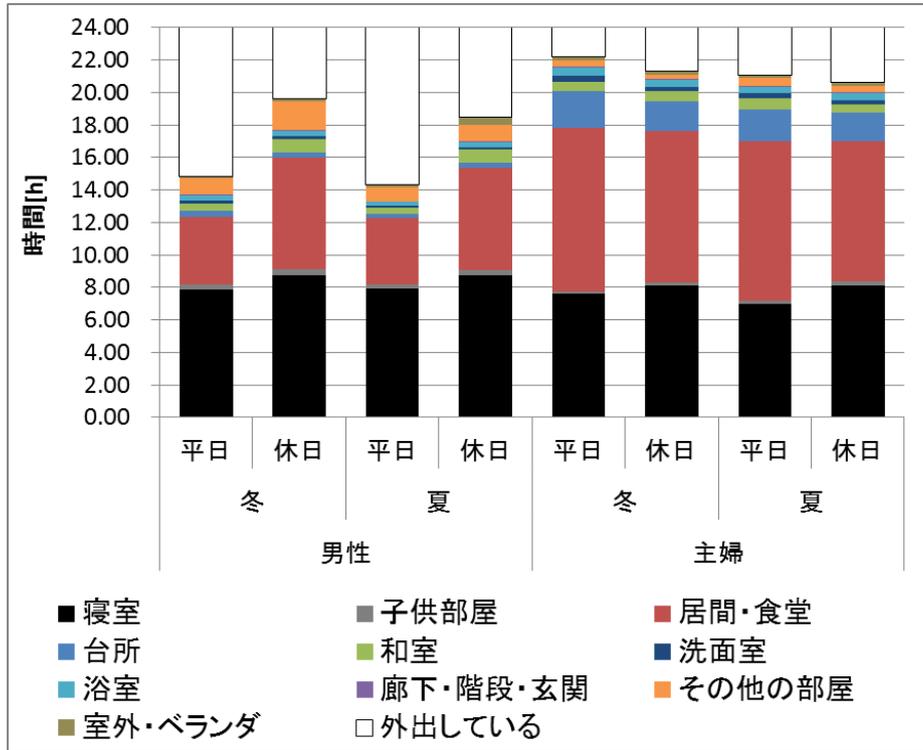


図 4-19 属性別の平均在室時間

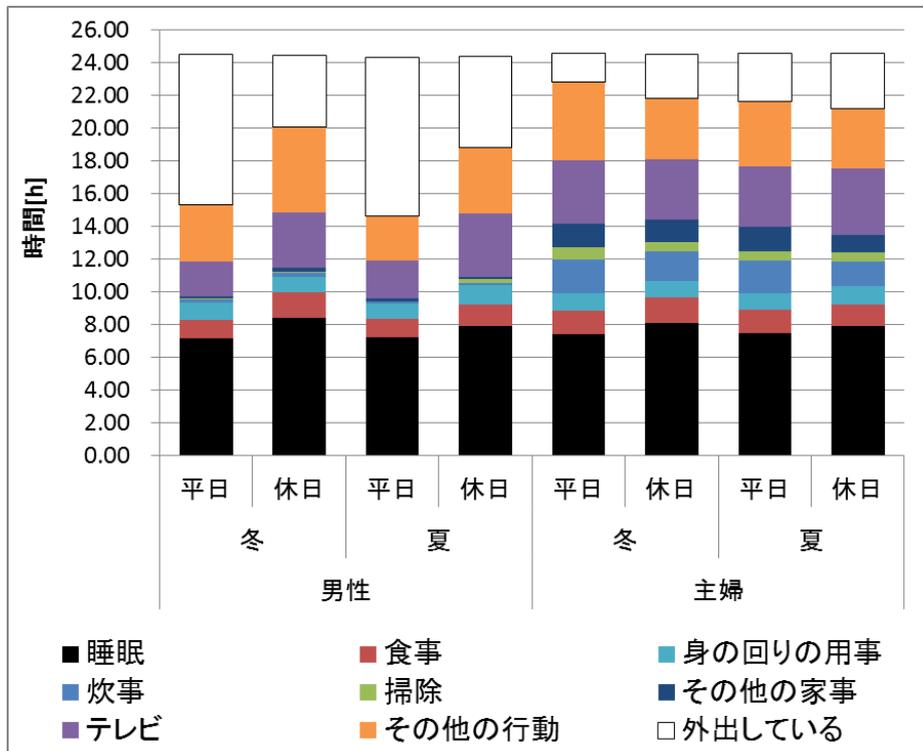


図 4-20 属性別の平均行動時間

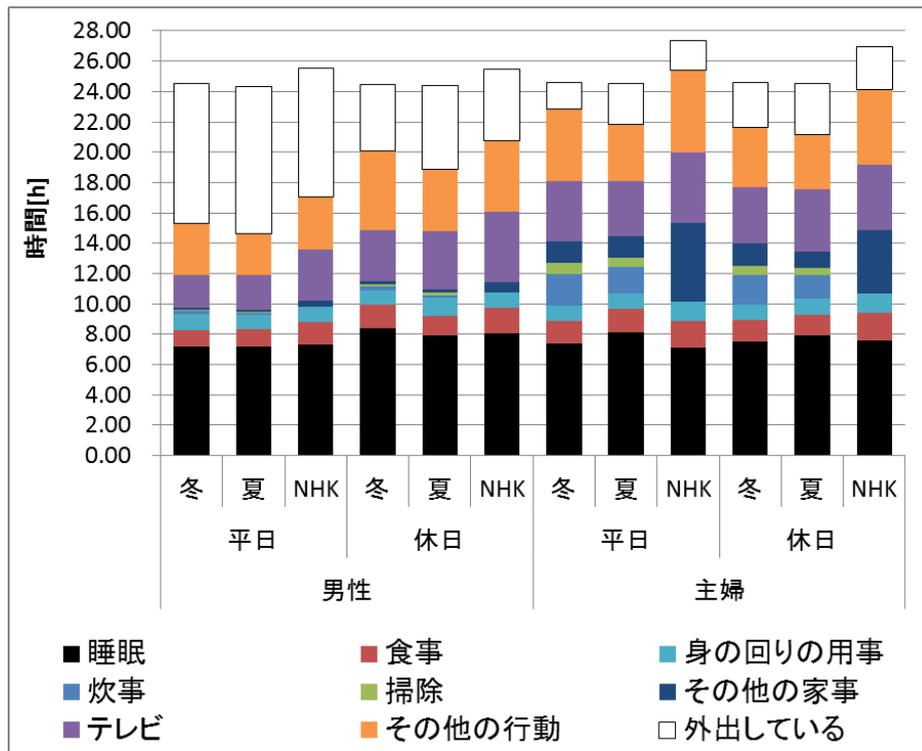


図 4-21 アンケート調査と国民生活時間調査における平均行動時間の比較

4.4.1.2 平均家電製品・給湯使用時間

性別・季節・曜日に関する属性別について、1日の平均家電製品使用時間を図 4-22、平均給湯使用時間を図 4-23 に示す。

男女ともに最も使用時間の長い家電製品はテレビである。特に男性に関しては、テレビの視聴時間が突出しており、他の家電製品の使用時間は微々たるものである。また平日よりも休日にテレビ視聴時間が長い傾向があるのも男性の特徴であり、これは前節 4.4.1.1 で確認した行動時間の違いと対応している。冬・夏の家電使用時間の違いを見ると、冬よりも夏にテレビ視聴時間が長くなる傾向が見られるが、これは平日・休日による違いほど明確な差はない。

一方で主婦の場合は、テレビの視聴時間も長いですが、台所コンロ・炊飯器・洗濯機などの家電製品や炊事用の給湯使用時間もある程度確認できる。これは主婦の家事時間の長さに対応しており、主婦が家庭での家事労働を一手に担うという日本の典型的な家族様式を示している。冬・夏の家電使用時間の違いを見ると、夏よりも冬に加熱調理用の家電製品（電子レンジ・台所コンロ・電気ポット・炊飯器）の使用時間が長くなり、これは冬に温かい食事を摂る機会が増えることが原因と考えられる。冬には、炊事で給湯を使用する時間も増えており、これも家事労働の多い主婦ならではの特徴といえる。

時間帯別の家電製品・給湯使用割合については、付録として図 A-22～図 A-37 に示す。

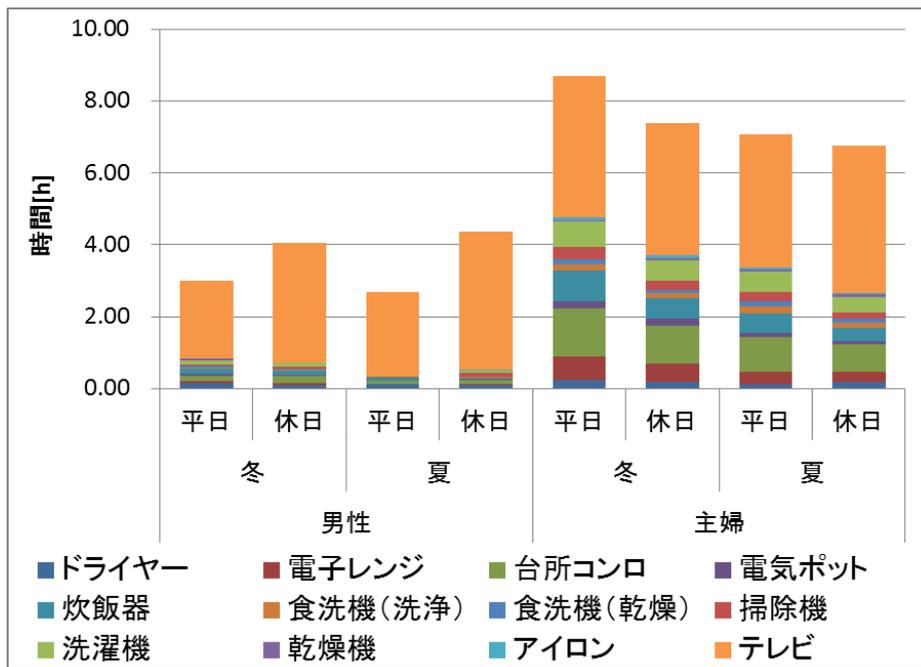


図 4-22 属性別の平均家電製品使用時間

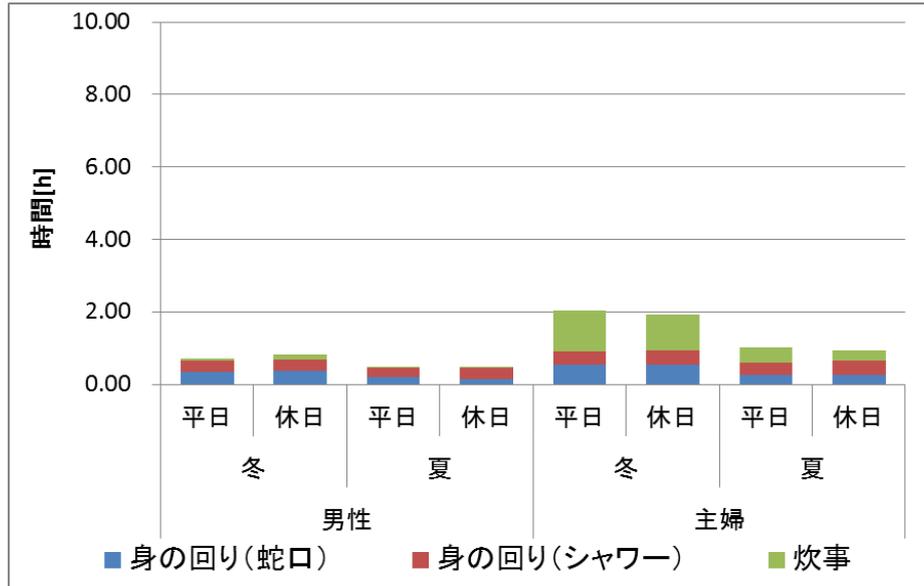


図 4-23 属性別の平均給湯使用時間

4.4.1.3 部屋別の空調機器使用率

部屋別の冬の空調機器使用率を図 4-24、夏の空調機器使用率を図 4-25 に示す。冬・夏ともに居間・食堂と寝室で空調を使用する割合が高い結果が得られた。バリエーションの多い冬の暖房機器を比較すると、居間・食堂ではエアコン・コタツ・石油ファンヒータ、寝室ではエアコン・石油ファンヒータ・電気ストーブの使用率が高いことが分かる。

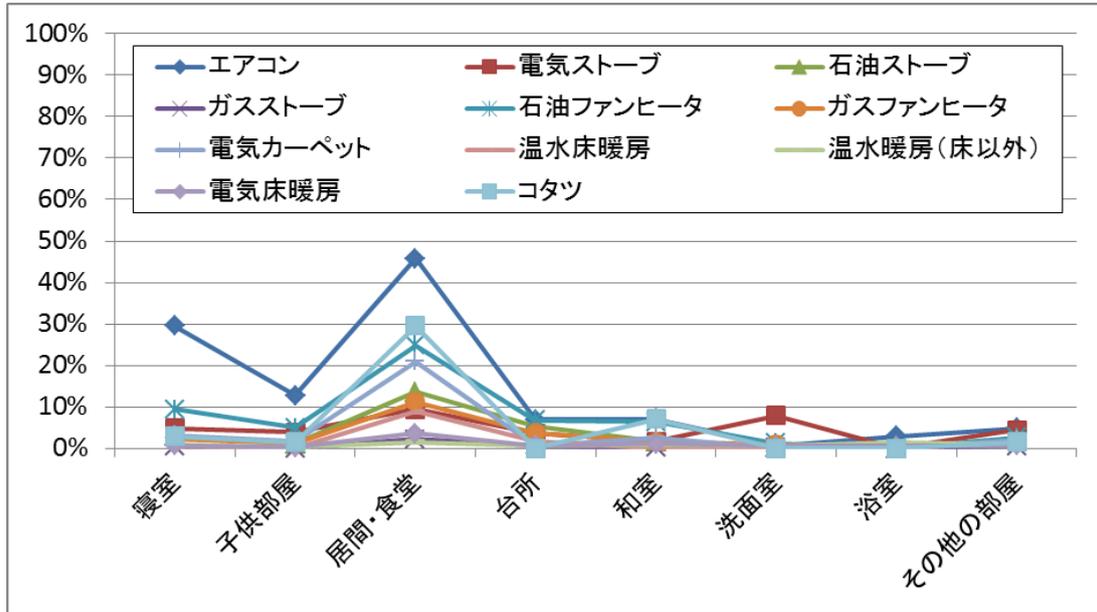


図 4-24 部屋別の空調機器使用率 (冬)

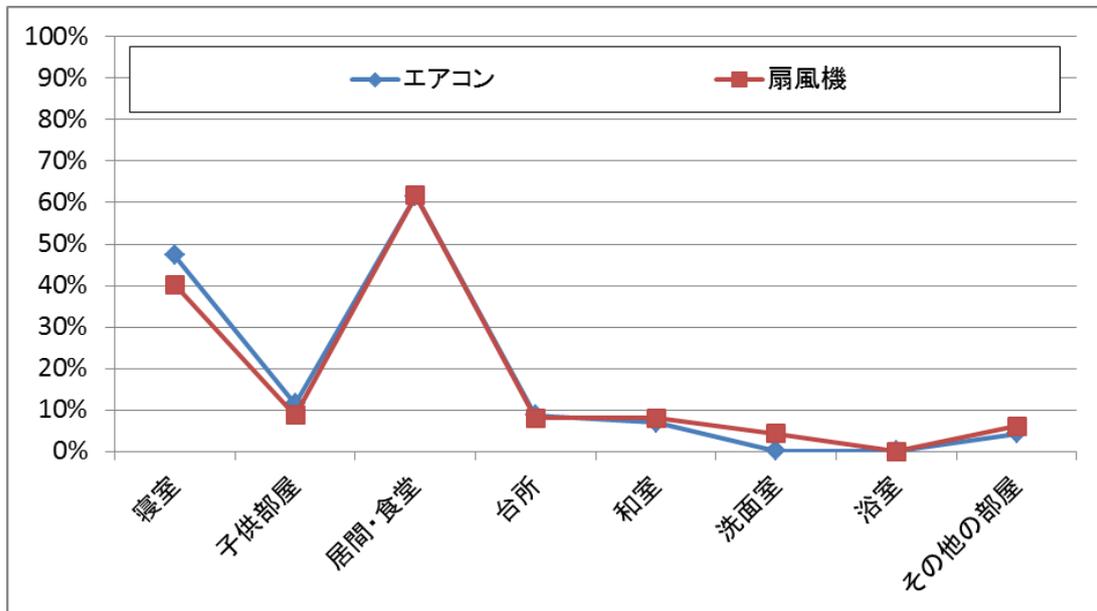


図 4-25 部屋別の空調機器使用率 (夏)

4.4.2 電力・給湯需要カーブの推計結果

モデルによって推計した電力・給湯需要カーブの一例(冬の平日における子社会人2の需要)を図 4-26 に示す。電力需要は空調・照明・家電による消費電力を合算したものである。家電はさらに表 4-3 に挙げた様々な種類に細分化できるが、この図では表 4-2 に挙げた行動類型ごとにまとめた消費電力を表している。給湯も同様に表 4-2 の行動類型で分類した。これらはアンケート調査から得られた実際の居場所や家電製品・給湯の使用状況から推計しているの、より実態に即した需要といえる。また、消費電力の大きい家電製品の使用や湯はりによって発生する需要のスパイクも表現できている。

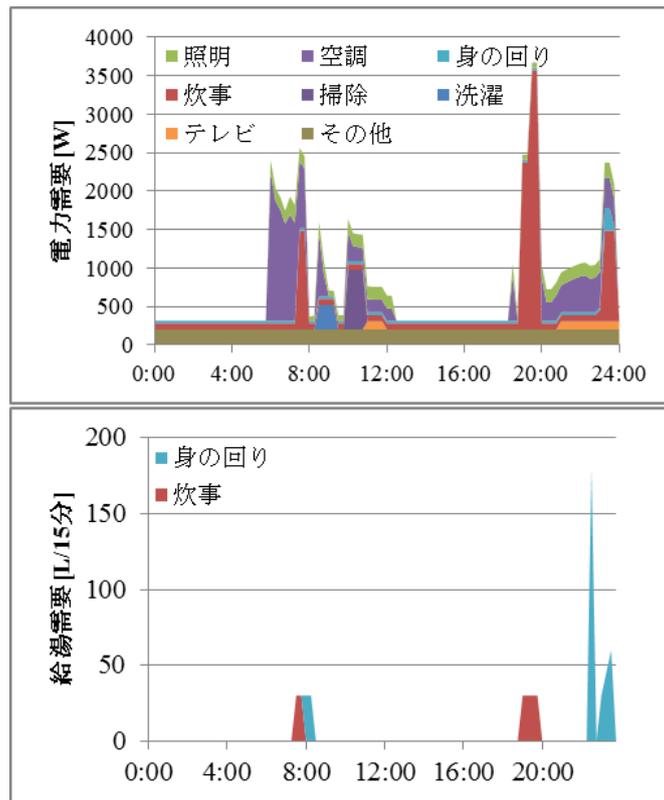


図 4-26 推計した電力・給湯需要カーブの例

つづいて図 4-26 で示した行動類型別の電力・給湯需要を合算して、トータルの電力・給湯需要カーブを推計した。以降では、冬と夏それぞれにおける 1 日の電力・給湯需要カーブを示す。ここで、空調電力はその日の気象条件によって変化するが、ここではそれぞれ冬と夏の標準的な気象条件であった日として、冬は 2006 年 1 月 12 日・夏は 2006 年 7 月 31 日における需要カーブを示す。これらの日は、2006 年の東京における気象データの中で、1 日の平均気温・最低気温・最高気温が冬 (1 月) と夏 (8 月) の平年値と近いことを条件として選択している。気温の比較を図 4-27 に示す。

また、2006 年 1 月 12 日・7 月 31 日における 1 日の外気温度の変化を図 4-28 に、水平面日射量の変化を図 4-29 に示す。

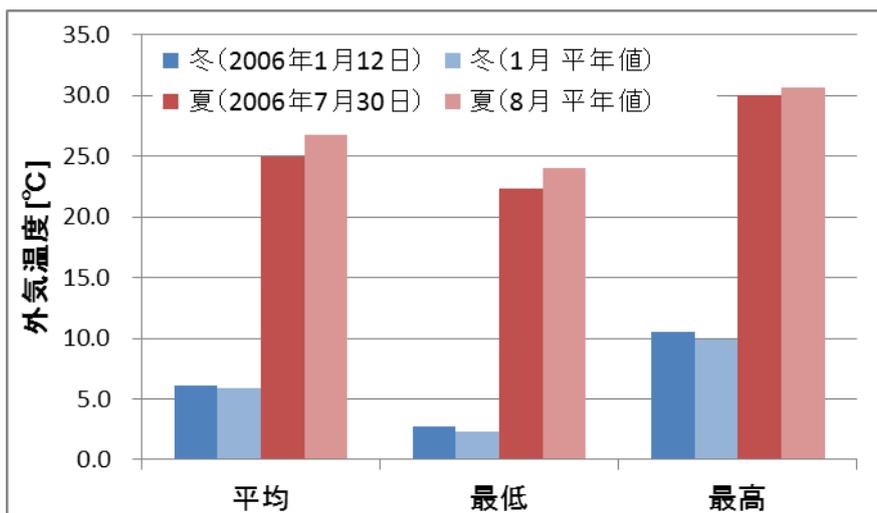


図 4-27 平均気温・最低気温・最高気温の比較

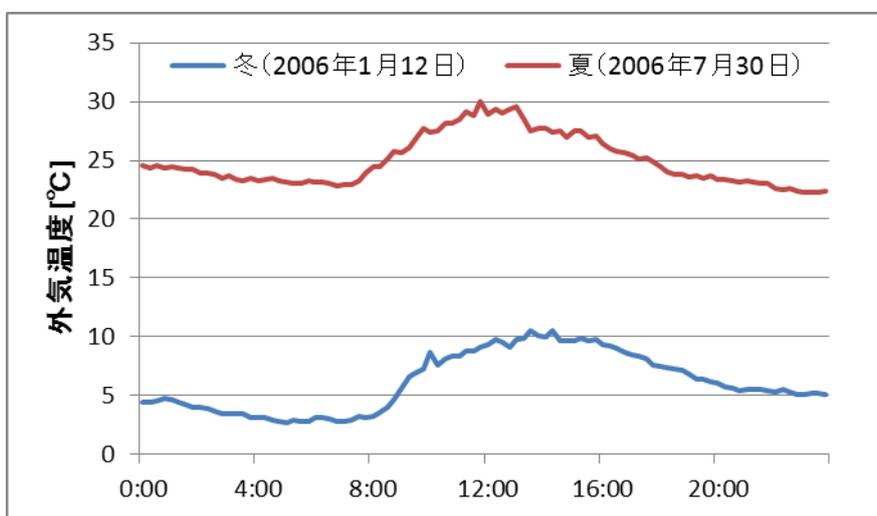


図 4-28 1日の外気温度の変化

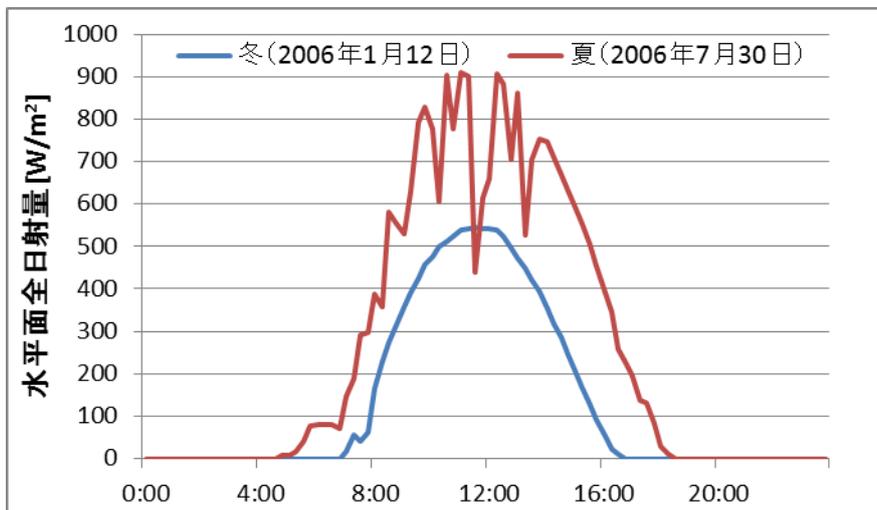


図 4-29 1日の水平面前日射量の変化

4.4.2.1 冬の電力・給湯需要カーブ

冬の電力・給湯需要カーブを図 4-30 に示す。家族構成は上から順に若年夫婦，老年夫婦，子小中学 2，子社会人 2 となっている。平日の需要は黒線（サンプル数 $n=10$ ），休日の需要は赤線（サンプル数 $n=4$ ）で表し，実線は平日・休日の平均，破線は変動係数を表す。変動係数とは標本の標準偏差を平均で割ったもので，平均に対する相対的なばらつきを示す指標である。

まず需要の平均に関して全体的な傾向を確認すると，電力需要は朝方にピークが発生し，日中はなだらかに推移しながら夕方からふたたび逡増していった夜のピークが発生する。給湯需要は朝と昼にわずかながら発生し，夕方から夜にかけてより大きな需要が存在する。朝・昼の需要は主に炊事によって生じ，夜にはさらに身の回りの用事（湯はりやシャワーなど）による給湯需要が追加されるため需要が増加する。平日／休日による違いを確認すると，電力需要は平日朝のピークの立ち上がりが早く，休日は日中の需要が相対的に大きくなる傾向がある。一方で給湯では平日／休日による需要の差異は小さい。家族構成による違いを確認すると，電力需要では 4 人世帯のほうが夕方から夜にかけての増加幅が大きい。また若年夫婦・子小中学 2 のほうが平日朝のピークの立ち上がりが早く，早起きの傾向を示している。給湯を見ると子社会人 2 が平日の夜遅くまで需要が大きく推移しており，子供の帰宅時間が遅くなって深夜に入浴する割合が増えていることを反映している。一方で休日は 16 時～21 時にかけて給湯需要が集中しており，入浴のタイミングが平日／休日で大きく異なることを示している。

つづいて変動係数から同じ家族構成の場合の生活様式の違いによる需要のばらつきを確認すると，全体的な傾向としては朝（5 時～8 時）・夕方（16 時～19 時）・夜（23 時～2 時）に電力需要の変動係数が大きくなっている。これは，朝の起床と外出，夕方の帰宅，夜の就寝のタイミングの違いによって電力需要のばらつきが大きくなっていると考えられる。給湯は電力よりも変動係数が大きい値を取りやすく，給湯需要が短時間に集中的に発生するため湯はりや入浴のタイミングによってばらつきやすいことを示している。平日／休日による違いを確認すると，電力需要では平均と同様に平日朝のピークの立ち上がりが早い。一方で給湯では，平日のほうが変動係数の値が大きくなる傾向にある。家族構成による違いを確認すると，4 人世帯の電力需要は 2 人世帯よりも変動係数が小さい。

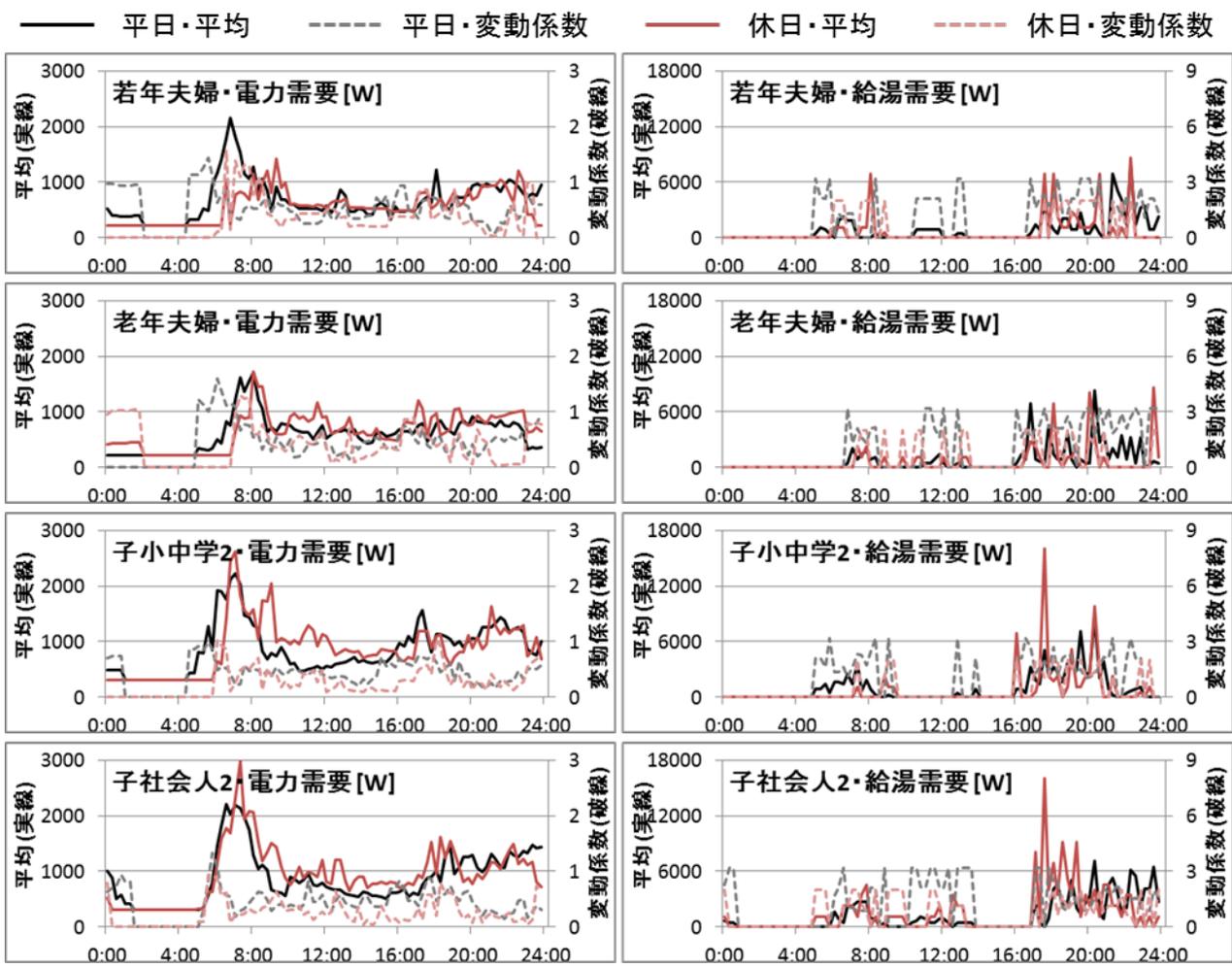


図 4-30 冬における電力・給湯需要の平均と変動係数(推計結果)(サンプル数:平日 n=10, 休日 n=4)

4.4.2.2 夏の電力・給湯需要カーブ

夏の電力・給湯需要カーブを図 4-31 に示す。

まず全体的な傾向を確認すると、電力需要は朝方から昼にかけてゆるやかに増加し、夕方にも増加してピークを発生する。それ以降はゆるやかに減少していく。冬の電力需要との違いは、冬は朝方のピークが大きいのに対して夏は日中の需要が大きくなっている点である。これは空調需要による影響が大きく、冬は夜間の冷え込みの後に居住者が起床して暖房を入れることで電力需要が増加するのに対し、夏は日中の気温上昇に伴って冷房による電力需要が増加するためである。加えて、冬は加熱調理器（コンロ・電子レンジ）の使用頻度が高く、朝の炊事も電力需要を押し上げる要因となっている。給湯需要に関して、タイミングは冬と同じで朝・昼・夜に需要が発生しているが、ピークの大きさは冬よりも小さくなっている。これは夏に炊事で常温の水を使用したり、湯ほりを行なわなかったりするためである。平日／休日による違いを確認すると、冬と同様の傾向がみられる。電力需要は平日のほうが朝の立ち上がりが早く、休日は日中の需要が大きくなる。給湯では、平日／休日による差異が小さい。家族構成による違いを確認すると、これも冬と同様に 4 人世帯のほうが夕方から夜にかけて電力需要が大きい。一方で給湯に関しては、冬と比べて需要量が小さくなっていて、需要カーブからでは家族構成による影響の読み取りが難しい。

つづいて変動係数から生活様式の違いによる需要のばらつきを確認すると、全体的な傾向としては朝（5 時～8 時）・夕方（16 時～19 時）に電力需要の変動係数が大きくなっている。冬と比べて夏は電力需要の変動係数がさほど大きくなる。平日／休日による違いを確認すると、電力需要では平日朝のピークの立ち上がりが早く、給湯では平日のほうが変動係数の値が大きくなる傾向にある。これらも冬と同じ傾向を示している。家族構成による変動係数の違いは、電力・給湯ともに差異は小さい。

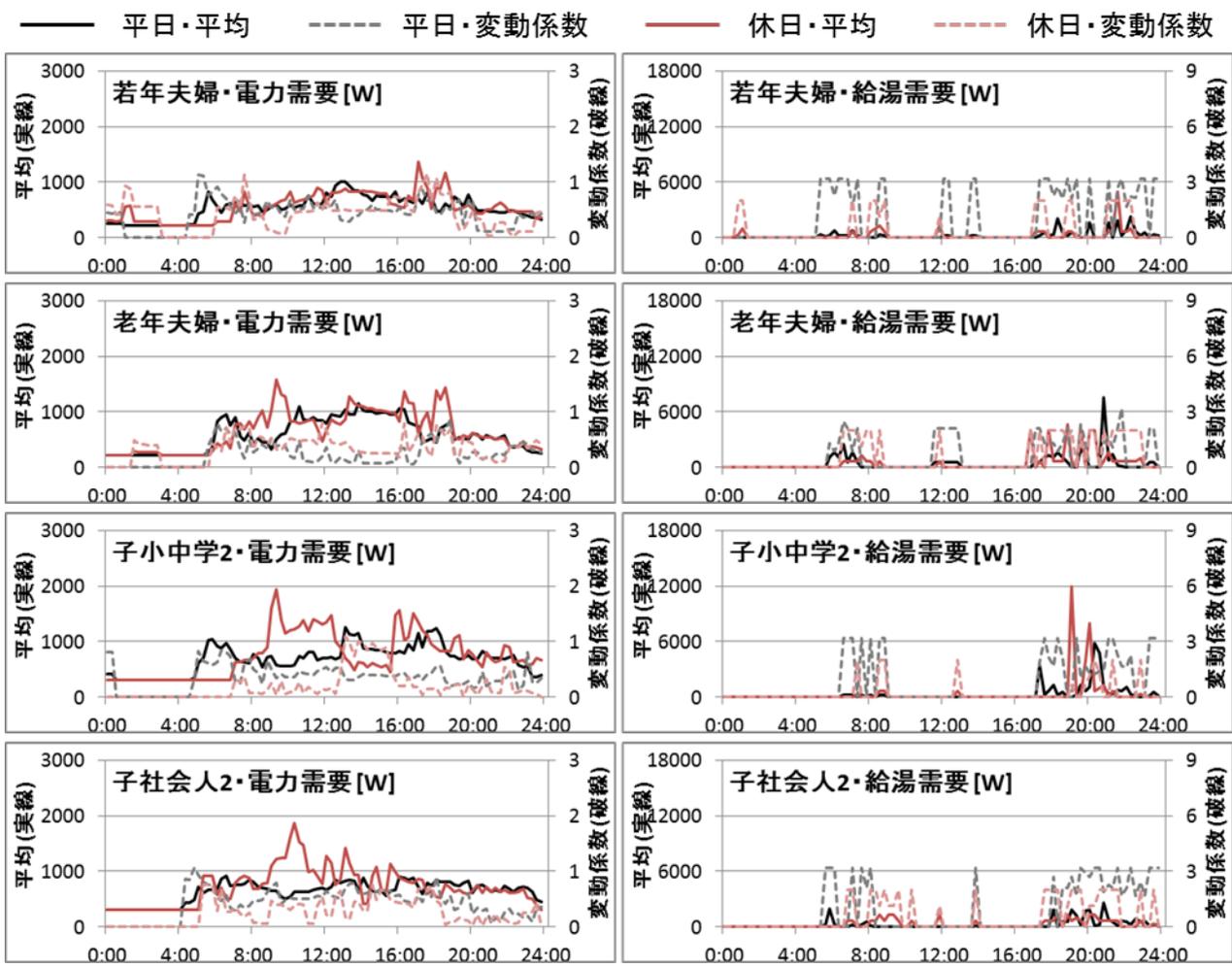


図 4-31 夏における電力・給湯需要の平均と変動係数(推計結果)(サンプル数:平日 n=10, 休日 n=4)

季節区分 4 通り・家族構成 10 通りの全てのバリエーションにおける電力・給湯需要カーブを、付録として図 A-38～図 A-77 に示す。

4.4.3 1日の電力・給湯需要量の推計結果

平日10通り・休日4通りの平均から求めた1日の電力・給湯需要量を図4-32に示す。電力需要について、世帯の人数が多くなるほど需要量が増えていく傾向が読み取れる。中間期の電力需要量に着目すると、2人世帯平均が10.1 kWh/日・3人世帯平均が11.5 kWh/日・4人世帯平均が13.1 kWh/日となり、家族人数が1人増えるごとに1日の電力需要量が約1.5 kWh増加している。同じ家族人数の結果を比較すると、夫婦2人世帯では若年夫婦に比べて老年夫婦の方が夏の電力需要量が1.2 kWh/日ほど大きい。これは、老年夫婦の方が日中の在宅時間が長いために冷房による電力需要が増加するためと考えられる。実際の高齢者は夏に冷房を使いたがらない傾向が強い。しかし今回の空調熱負荷計算では、夏の日中にエアコンが設置された部屋において、なおかつ室内温湿度が設定温湿度を上回った時間帯に冷房が運転されるものとしているので、日中の在室割合の多い老年夫婦の方が冷房をよく使うようになっている。夫婦+子供の世帯では子未就学の電力需要量が小さい。例えば4人世帯の子未就学2と子小中学2を比較すると、子小中学2の電力需要量は22.7 kWh/日（冬）・18.9 kWh/日（夏）・13.3 kWh/日（中間期）であるのに対し、子未就学2の電力需要量は19.8 kWh/日（冬）・16.5 kWh/日（夏）・11.7 kWh/日（中間期）であり、その差は1.6～2.9 kWh/日ほどある。これは未就学児の子供が自発的に家電製品や照明を使うことが少ないために、家族人数が同じでも未就学児のいる家庭の方が電力需要量は少なくなるものと考えられる。

給湯需要についても、世帯の人数が多くなるほど需要量が増えていく。同じ家族人数の結果を比較すると、夫婦2人世帯では若年夫婦に比べて老年夫婦の方が夏の給湯需要量が4.0 kWh/日ほど大きい。これは若年夫婦が夏場シャワーのみで済ませてしまうのに対し、老年夫婦は湯はりして入浴する傾向があるためと考えられる。一方、夫婦+子供の世帯では子供が社会人の家庭における給湯需要が他の家族構成よりも9.1～10.9 kWh/日ほど大きい。これは子供が成人して入浴時間が長くなるのに加えて、家族の入浴時間が分散することによって浴槽の追い焚きをする機会が増えるためと推察される。

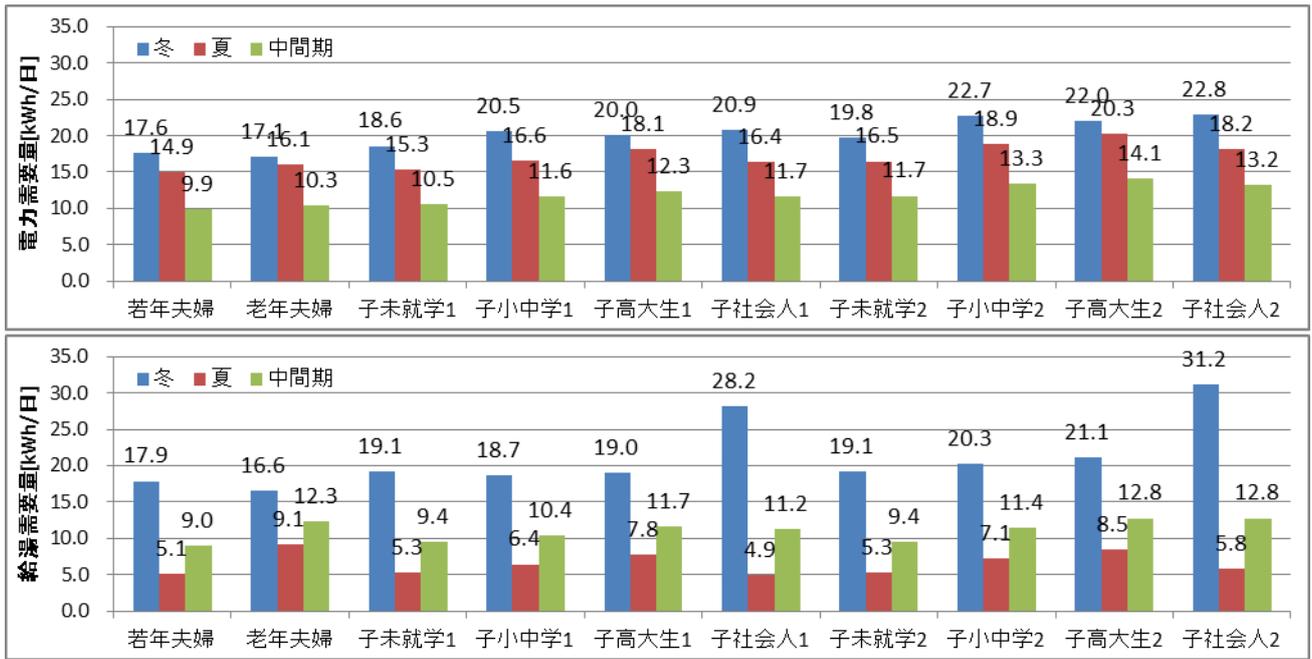


図 4-32 1日の電力・給湯需要量 (推計結果)

4.4.4 推計結果の妥当性評価

家庭エネルギー需要の推計結果の妥当性を評価するために、民生部門エネルギー消費実態調査[86]（以降、エネルギー消費実態調査と略称する）の戸建住宅における家族人数別の用途別二次エネルギー消費量と比較した。エネルギー消費実態調査は、資源エネルギー庁が三菱総合研究所に委託して行われた調査である。エネルギー消費実態調査では2012年度に全国の世帯を対象にアンケート調査を実施しており、本研究でのアンケート調査は2014年に全国を対象として行なっている。アンケート調査時期の差は2年であり、行動変容の影響は小さいと考えられる。ただし空調熱負荷計算では2006年の東京における気象データを想定しており、今回推計した空調の二次エネルギー消費量は2006年の気象の特徴によって影響を受けることが考えられる。ただし東京は日本の平均的な気象条件を示すので、空間的な影響は小さいと考えられる。

本研究での推計結果から、用途別に5種類（照明・家電・給湯・暖房・冷房）の二次エネルギー消費量を求めた。照明の二次エネルギー消費量は、推計結果の照明電力とした。家電の二次エネルギー消費量は、推計結果の家電電力に加え、ガスコンロによるガス消費量も考慮した。給湯の二次エネルギー消費量は、給湯機器の効率は90%として求めた。空調（暖房・冷房）の二次エネルギー消費量は、BESTで算出した空調負荷を補正することで求めた。空調は住宅の断熱性能や使用される空調機器の種類によってエネルギー消費が大きく変化するが、4.3.4の空調熱負荷計算では新省エネ基準相当の住宅でエアコンを使用した場合のみを考慮している。そこで、まずBESTで算出した新省エネ基準住宅における空調負荷を補正して平均的な断熱性能の住宅における空調負荷を求めた。つづいてエアコン以外も含めた空調機器も考慮し、空調負荷を二次エネルギー消費量に換算した。

(1) 住宅断熱性能に関する補正：

まず国土交通省資料[87]から、2014年の全国における断熱性能別の住宅ストック比率を得た。つづいて齊藤による研究[88]から、新省エネ基準相当の断熱性能の住宅における空調負荷を1としたときの、他の断熱性能の住宅における空調負荷の比率を暖房・冷房それぞれ個別に求めた。この研究は住宅用標準問題を想定した熱負荷計算によって、全国の異なる断熱性能の住宅における空調負荷を推計したもので、本研究では東京についての推計結果を用いた。断熱性能別の住宅ストック比率・空調負荷比率を表4-10に示す。以上の数値から住宅ストックの平均的な断熱性能を想定して、本研究で推計した空調負荷（新省エネ基準相当の断熱性能を想定）を暖房について $2.73 \times 39\% + 1.46 \times 37\% + 1.00 \times 19\% + 0.96 \times 5\% = 1.84$ 倍、冷房について $1.03 \times 39\% + 1.01 \times 37\% + 1.00 \times 19\% + 1.00 \times 5\% = 1.02$ 倍した。一般的に暖房よりも冷房の方が、断熱性能の違いによる空調負荷への影響が小さい。これは、高断熱住宅では夏に住宅外部からの熱の流入が減る一方で、住宅内部発熱の外への放出も防がれるため断熱による節電効果が打ち消されるためである。

また住宅構造については、推計で想定した日本建築学会住宅用標準問題の延床面積が 125.87 m^2 であるのに対し、統計（平成25年住宅・土地統計調査[72]）における全国の戸建住宅ストックの平均延床面積は 129.84 m^2 と両者の延床面積はほぼ近い。細かく見れば、住宅内の部屋数や各部屋の面積に違いがあることも考えられるが、ここではそのような詳細な部分には触れず、住宅構造に関する補正は行わないものとした。

(2) エアコン以外の空調機器も考慮した場合の、空調負荷から二次エネルギー消費量への換算：

(1)で得られた空調負荷から二次エネルギー消費量を求めるための換算係数は、どのような空調機器を使用するかによって異なる。今回のアンケート調査では部屋ごとに使用した空調機器の種類を質問しているため、回答結果から使用される空調機器の種類割合を得た。つづいてそれぞれの空調機器の効率を設定して、空調負荷から二次エネルギー消費量への換算係数を求めた⁸。部屋別に求めた冷房／暖房の二次エネルギー消費量への換算係数は、居間・食堂は暖房が 1.70、冷房が 5.83、寝室・子供部屋は暖房が 3.33、冷房が 9.20 となった。(1)の補正空調負荷をこの変換係数で割った値が、空調の二次エネルギー消費量となる。

空調に関して上記の手順を踏んだうえで、家庭における年間での用途別の二次エネルギー消費量を算出した。家族人数別の用途別二次エネルギー消費量の比較を図 4-33 に示す。それぞれの家族人数において、推計値（本研究）と統計値（民生部門エネルギー消費実態調査）はおおむね一致する。ただし用途別で見ると、推計値の方は照明による消費が多く、家電・暖房による消費が少ない。照明が多いのは、各部屋に在室者がいて、かつその人の行動が「睡眠」以外である場合は、昼夜に関係なく照明が使用されると仮定したためである。実際の家庭において日中は、照明を使用する代わりに窓からの採光によって室内を明るくするので、照明によるエネルギー消費は推計値よりも少なくなる。また、家電が少ないのは考慮した家電製品の種類が限られているためであり、暖房が少ないのは空調熱負荷シミュレーションの気象データに用いた 2006 年が暖冬であったことが影響していると考えられる。

表 4-10 断熱性能別の住宅ストック比率と空調負荷比率

	断熱なし	旧省エネ 基準相当	新省エネ 基準相当	次世代省エネ 基準相当	住宅ストック 平均
住宅ストック比率 [87]	39 %	37 %	19 %	5 %	
暖房負荷比率* [88]	2.73	1.46	1.00	0.96	1.84
冷房負荷比率* [88]	1.03	1.01	1.00	1.00	1.02

* 新省エネ基準相当を 1.0 とする

⁸ 例えば、居間・食堂で使用される暖房機器の種類はエアコン（省エネ法の判断基準[75]の標準エアコン定格 COP に従って 3.48 とする）が 32%，それ以外（石油ストーブを想定して効率 0.85 とした）が 68% である。ここから居間・食堂における暖房の換算係数は $3.48 \times 32\% + 0.85 \times 68\% = 1.70$ と求めることができる。

またアンケート調査の回答結果によると、居間・食堂で使用される冷房機器の種類はエアコン (COP2.91) が 50%，扇風機が 50% である。冷房による二次エネルギー消費量 SE_{cool} [MJ/年] にはエアコンを使用した場合の消費電力量のみ計上し、冷房負荷を L_{cool} [MJ/年] とすると $SE_{cool} = 50\% \times L_{cool} / 2.91$ となる。よって居間・食堂における冷房の換算係数は $L_{cool} / SE_{cool} = 2.91 \div 50\% = 5.83$ となる。扇風機の消費電力量は、家電による二次エネルギー消費量に計上した。扇風機の消費エネルギー単位は 25W とし、使用時間は空調運転スケジュールから求めた。

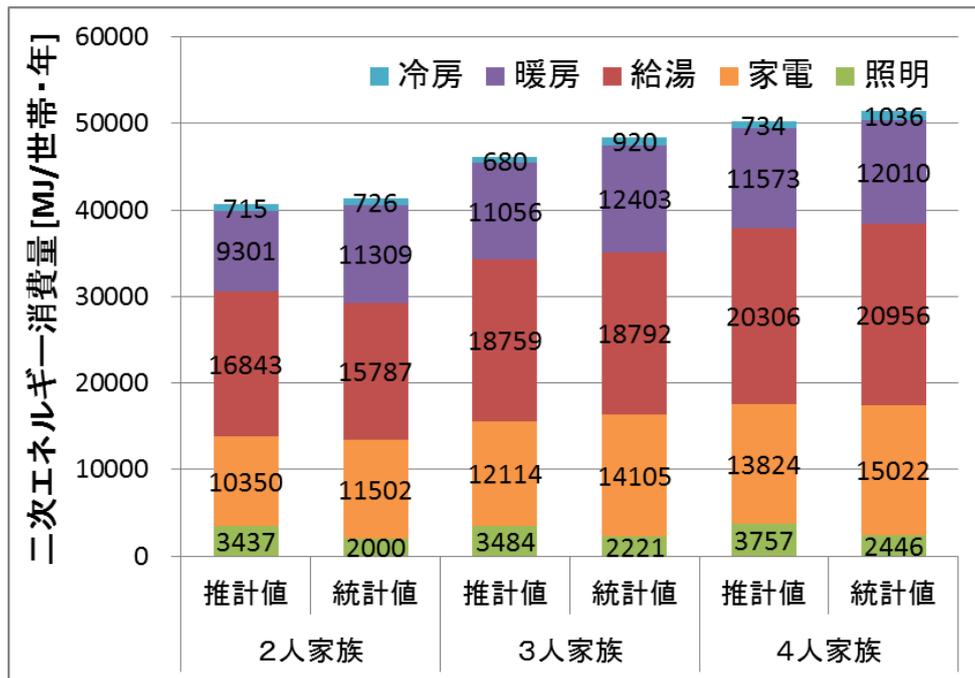


図 4-33 家族人数別の用途別二次エネルギー消費量

4.4.5 先行研究による推計結果との比較

最後に、家族構成員間の生活行動の関連性が家庭エネルギー需要カーブに与える影響を確認するために、本研究の推計結果と、著者らが以前に開発したモデル[34]による推計結果を比較した。以前に開発したモデル[34]では、国民生活時間調査[36]に従って居住者ひとりひとりの生活行動を別々に再現しており、家族構成員間の生活行動の関連性は考慮していない。ただし2つの研究で空調負荷計算の手法が異なり、電力需要をそのまま比較することは難しいため、ここでは給湯需要の推計結果の比較に限定した。子小中学2（夫婦＋小中学生2人）の冬の平日における給湯需要の平均・変動係数を図 4-34 に示す。サンプル数はいずれも $n=10$ である。平均で見ると、給湯需要の発生するタイミングと量は似通っている。しかし変動係数を見ると、本研究による推計結果の方が大きい。これは、家族構成員間の生活行動の関連性を考慮したときの方が、給湯需要カーブを世帯間で比較するとばらつきが大きいことを示唆している。この結果は次のような理由によって説明できると考えられる。家族構成員間の生活行動の関連性を考慮した本研究のモデルの場合、「家族が次々に入浴する」「一緒に食事する」ことによって、居住者が入浴や炊事をする時間は集中する。そのため個々の家庭では給湯需要の発生するタイミングは、特定の時間帯に集中する。入浴・炊事の時間帯は家庭ごとに固有なので、給湯需要カーブを世帯間で比較するとばらつきが大きくなると思われる。

以上のように、「家族構成員間の生活行動の関連性」の実態を考慮した本研究のモデルによる推計結果では、先行研究のモデルによる推計結果と比べて、需要のばらつきが大きくなることが分かった。

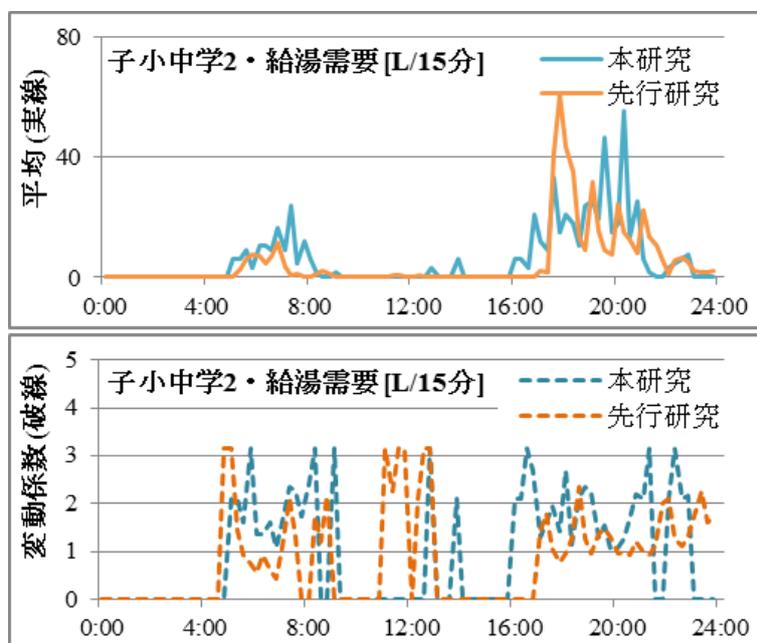


図 4-34 冬の平日における給湯需要の平均・変動係数（サンプル数： $n=10$ ）

4.5 まとめ

第4章では、筆者が新たに開発した家庭エネルギー需要推計モデルについて述べた。

開発したモデルの新規性は「家族構成員間の生活行動の関連性」「生活行動と対応する個々の家電製品・給湯の使用状況」の実態を考慮して需要推計を行う点にある。これらの生活行動の実態を把握するために、家庭における生活行動と家電製品・給湯の使用状況に関するアンケート調査を実施して、特定の1日における15分ごとの居場所・生活行動や家電製品・給湯の使用状況などを質問した。そして、このアンケートの回答結果を入力データとして、異なる季節・家族構成・生活様式の電力・給湯需要カーブ560セットを推計した。推計されたエネルギー需要のカーブや1日の需要量を家族構成別に比較して、家族構成が家庭エネルギー需要に影響することを確認した。さらに推計結果と統計値を比較して結果の妥当性を評価した。最後に先行研究と比較して、家族構成員間の生活行動の関連性が家庭エネルギー需要カーブに与える影響を確認した。

本研究のモデルによる推計結果は、先行研究と比べて需要のばらつきが大きくなることが分かった。これは、それぞれの家庭が「家族が次々に入浴する」「一緒に食事する」ことによって給湯需要が特定の時間帯に集中するためであり、「家族構成員間の生活行動の関連性」が家庭エネルギー需要のタイミングに影響を与えることを確認した。また今回の推計結果は、家族構成員間の生活行動の関連性がライフステージの進行によって変化することも示唆している。例えば、若年夫婦2人世帯・夫婦2人と小中学生の子供2人の4人世帯は、平日朝の電力カーブの立ち上がりが高く早起きの傾向を示していた。また、夫婦2人+社会人の子供2人の4人世帯族は平日の夜遅くまで需要が大きく推移しており、これは子供の帰宅時間が遅くなって深夜に入浴する割合が増えていることを反映しているものと考えられる。以上のように、生活行動の実態をアンケート調査し回答結果から家庭エネルギー需要を推計することによって、家庭エネルギー需要のタイミングのばらつきを現実に即して再現することができた。

開発した需要推計モデルの課題について整理する。今回は「家族構成員間の生活行動の関連性」の実態がエネルギー需要に与える影響を明らかにすることを念頭に置いて、家族構成を専業主婦のいる2~4人世帯の家庭に限定した。日本で増加傾向にある単身世帯や共働き世帯におけるエネルギー需要推計は、今後検討すべき課題である。また、アンケート調査は全国を対象として実施したが、空調電力推計のための住宅熱負荷シミュレーションにおいて東京の気象条件を想定した場合しか検討できていない。BESTは今後のアップデートによって2006年の東京以外についても1分刻みでのシミュレーションが可能になる予定であり、異なる地域や年を想定した需要も同様の手法によって推計が可能となる。また、今回の推計モデルでは家電製品の性能の違いがエネルギー需要に与える影響についての検討を行っていないが、消費エネルギー単位の設定値の感度分析をすることで影響を評価することができる。

今回開発した需要推計モデルの特色は、家庭でエネルギー需要が発生するタイミングを考慮して、1日の総量でなく需要カーブとして推計できる点にある。この特色は、家庭用分散型エネルギー技術の性能評価に適している。家庭用分散型エネルギー技術は、エネルギー需要の発生するタイミングに応じて運転状況が変化し、機器性能に影響を与える。そこで本研究では家庭用分散型エネルギー技術のなかでも家庭用燃料電池システムに着目して、推計したエネルギー需要を入力値として燃料電池の運転をシミュレーションし、燃料電池の経済性・環境性を評価する。第5章ではシミュレーションのために開発した家庭用燃料電池システムの最適運転モデルと、それによる経済性・環境性評価について述べる。

第5章 需要の不確実性を考慮した最適運転モデルによる燃料電池の性能評価

5.1 概要

第5章では、家庭用燃料電池システムの運転をシミュレーションするために新しく開発したモデルと、第4章で推計した家庭エネルギー需要を用いた家庭用燃料電池システムの運転シミュレーションおよび経済性環境性評価について述べる。新しく開発したモデルでは、「家庭のエネルギー需要は一意に決まっているのではなく、日々の生活行動の違いによって不確実性を有している」という考えのもと、その時点から24時間後までの家庭エネルギー需要（電力・給湯需要）を予測して、家庭の電力・ガス料金の期待値が最小となるように家庭用燃料電池システムの運転を計画していく。このモデルを用いて第4章で推計した家庭エネルギー需要を入力値として燃料電池の運転をシミュレーションすることによって、様々な家族構成の家庭が家庭用燃料電池システムを導入した時の運転状況を再現し、そしてその時に発生する電力・ガス料金（経済性）やCO₂排出量（環境性）を推計することができる。

第5章の構成について述べる。5.1（本節）では第5章の概要について述べる。

5.2・5.3ではモデルの開発とシミュレーションの手法について述べる。まず5.2では、まず燃料電池の一般的な特徴について説明し、つづいてモデルで想定した家庭用燃料電池システムの構成や、機器性能・エネルギーの料金単価・CO₂排出原単位の設定値について述べる。つづいて5.3では、モデルによる家庭用燃料電池システムの運転シミュレーションの計算手法について述べる。このモデルでは、確率動的計画法（stochastic dynamic programming ; SDP）によってエネルギー需要の不確実性を考慮しながら家庭用燃料電池システムの運転を逐次的にシミュレートしていく。具体的には、24時間後までの電力・給湯需要を予測して、エネルギーコストの総和が最小となるように運転計画を決定する。そして、第4章で推計した家庭エネルギー需要を入力値として燃料電池の運転シミュレーションを行う。

5.4・5.5ではモデルによる家庭用燃料電池運転のシミュレーション結果と経済性・環境性評価の結果を示す。まず5.4では様々な家族人数・家族構成の家庭に対して家庭用燃料電池システムを導入した場合の電力・給湯需給の状況を示す。つづいて5.5ではシミュレーションによる経済性・環境性の評価結果として、まず様々な家族構成の家庭における従来型給湯器を導入した場合と家庭用燃料電池システムを導入した場合での、年間での電力・ガス料金（経済性）・CO₂排出量（環境性）を比較する。そして、その2つの差から家庭用燃料電池システムの導入による経済性・環境性の効果を評価する。さらにより長期的な燃料電池の使用を想定して、燃料電池を20年間使用した時のトータルでの経済性・環境性を評価する。このときに、運転シミュレーションの方式や入力値とする家庭エネルギー需要が異なるケースを検討し、燃料電池運転性能に対する需要予測の影響やライフステージの進行によって生活リズムが変わることによる影響を評価する。

5.2 家庭用燃料電池システム

5.2.1 燃料電池の種類

燃料電池の発電原理は次のとおりである。都市ガス・LP ガスを改質して得た水素 (H_2) と空気中の酸素 (O_2) を、それぞれ電池の両極に投入する。水素と酸素を高温条件下で反応させると電池の両極で電子 (e^-) の偏りが生じ、これを取り出すことで電力が得られる。また、水素と酸素が反応した結果の生成物として水 (H_2O) が生じる。一連の反応を式にまとめると、 $H_2 + 1/2O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ となる。

反応式の両辺にある $2e^-$ は打ち消されるが、発電していることが分かるようにあえて残してある。

表 5-1 に主要な燃料電池の種類と、その原理と特徴をまとめる。燃料電池は両極に挟まれた電解質の種類で分類され、固体高分子形 (polymer electrolyte fuel cell ; PEFC) ・固体酸化物形 (solid oxide fuel cell ; SOFC) ・りん酸形 (phosphoric acid fuel cell ; PAFC) ・熔融炭酸塩形 (molten carbonate fuel cell ; MCFC) の 4 種類が主に挙げられる。電解質間を移動する媒体イオンは、PEFC ・PAFC は水素イオン (H^+)、SOFC が酸化物イオン (O^{2-})、MCFC が炭酸イオン (CO_3^{2-}) である。媒介イオンの違いによって、燃料極 (水素を投入する側の極) ・空気極 (酸素を投入する側の極) で生じる反応も異なる。

各種燃料電池の作動温度と発電効率は相関関係にあり、作動温度の低い PEFC ・PAFC は発電効率が相対的に低く、一方で作動温度の高い SOFC ・MCFC は発電効率高い。燃料電池の用途に応じて分類すると、家庭用などの小規模発電装置には PEFC ・SOFC、産業・業務用の大規模発電装置には SOFC ・PAFC ・MCFC が用いられる。本研究では、個々の家庭を対象とした燃料電池の導入を検討するため、モデルで想定する燃料電池は PEFC ・SOFC のいずれかである。以降の文章の中で「燃料電池」と記述する際は、PEFC ・SOFC を指す。

表 5-1 燃料電池の種類とその原理・特徴

種類	固体高分子形 (PEFC)	固体酸化物形 (SOFC)	りん酸形 (PAFC)	熔融炭酸塩形 (MCFC)
電解質	陽イオン交換膜 (フッ素樹脂系)	セラミック	りん酸	Li・K 炭酸塩 Li・Na 炭酸塩
媒体イオン	H^+	O^{2-}	H^+	CO_3^{2-}
反応式 (燃料極)	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$O^{2-} + H_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$CO_3^{2-} + H_2 \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$
反応式 (空気極)	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
作動温度	80~120 °C	600~1000 °C	190~200 °C	600~700 °C
発電効率 (HHV)	30~40 %	40~65 %	35~42 %	40~60 %
主な用途	家庭用	家庭用 産業・業務用	産業・業務用	産業・業務用

日本電機工業会資料[89]をもとに作成

5.2.2 家庭用燃料電池システムの構成

発電出力 1kW 以下の燃料電池と、周辺装置（燃料改質装置・インバータ・熱回収装置・貯湯槽・補助ヒータ）を組み合わせたものが、家庭用の燃料電池システムとなる。表 5-2 に各周辺装置の機能を整理する。

表 5-2 周辺装置の機能

燃料改質装置	都市ガス・LP ガスと水蒸気を反応させ水素を得る
インバータ	燃料電池によって発電された電力を直流から交流に変換する
熱回収装置	高温の燃料電池から熱を回収する
貯湯槽	燃料電池から回収した熱を湯として貯めておく
補助ヒータ	貯湯槽の湯だけでは家庭の給湯需要が賅えない時に運転される給湯器

エネルギー（電力・給湯）の流れに着目して、図 5-1 に家庭用燃料電池システムの構成を整理する。括弧内に記した英字は、モデルの変数・定数の記号に対応している。燃料電池は電力と給湯（熱）を同時に生成する。発電された電力はそのまますぐに家庭の電力需要に回されて、不足分の電力は系統（電力会社）から購入する。ここから分かる通り、燃料電池の発電出力は常に家庭の電力需要と等しいか、それ以下となる。これは、現制度では燃料電池で発電した電力を系統側に逆潮流して売電することができないためである。一方で燃料電池から熱回収して得られた給湯は、一旦は貯湯槽に蓄えられて、給湯需要の発生するタイミングで貯湯槽から供給される。給湯需要が貯湯槽に蓄えられている分だけでは足りない場合には、補助ヒータを運転させて不足分の給湯需要を補う。

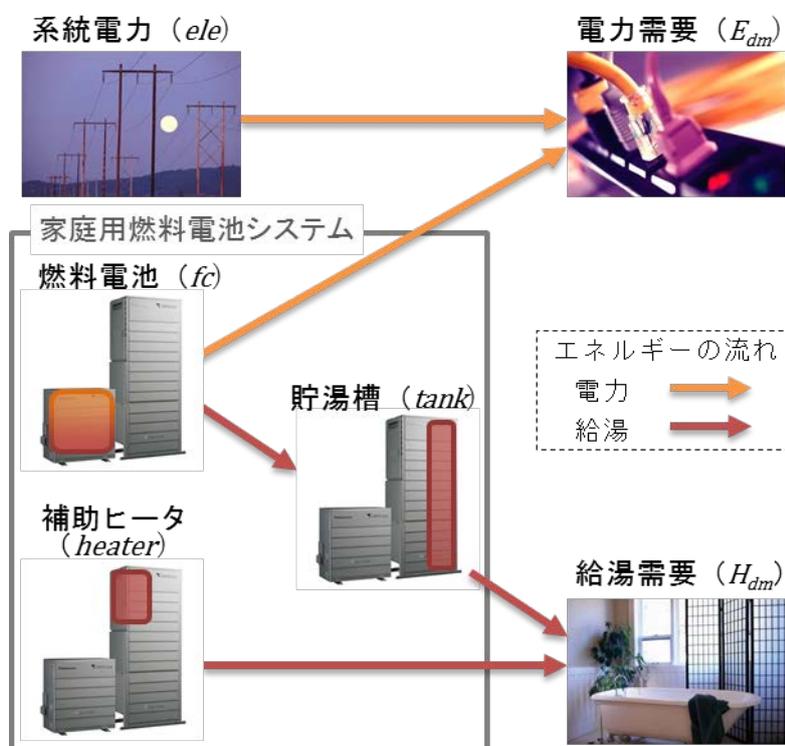


図 5-1 家庭用燃料電池システムの構成

5.2.3 家庭用燃料電池システムの性能・エネルギー単価・CO₂排出原単位の設定

ここでは、家庭用燃料電池システムのモデル化において想定した、システムの性能・エネルギー単価・CO₂排出原単位の設定について整理していく。

まずはシステムの設定値を計算する前に、計算に用いるガスの料金単価・発熱量、および CO₂ 排出原単位を表 5-3 に示す。ガス料金単価 C_{gas} [円/m³]は、東京ガスが提供する家庭用燃料電池システム利用者向け契約《エネファームで発電エコぷらん》[90]の東京地区 2015 年 10 月の単位料金に基づいて設定する。ガス CO₂ 排出原単位 G_{gas} [g-CO₂/m³]・系統電力 CO₂ 排出原単位（全電源平均） G_{ele} [g-CO₂/Wh]は、省エネルギーセンター資料[91]における省エネ効果の算出根拠に基づいて設定する。系統電力 CO₂ 排出原単位（火力平均） G_{ther} [g-CO₂/Wh]・ガス発熱量（都市ガス 13A, HHV 基準） Q_{gas} [Wh/m³]は、日本ガス協会資料[92]に基づいて設定する。

表 5-3 ガス料金単価・発熱量、および CO₂排出原単位（設定値）

項目	記号	設定値
ガス料金単価 [円/m ³]	C_{gas}	130
ガス CO ₂ 排出原単位 [g-CO ₂ /m ³]	G_{gas}	2277
系統電力 CO ₂ 排出原単位（全電源平均） [g-CO ₂ /Wh]	G_{ele}	0.487
系統電力 CO ₂ 排出原単位（火力平均） [g-CO ₂ /Wh]	G_{ther}	0.690
ガス発熱量（都市ガス 13A, HHV 基準） [Wh/m ³]	Q_{gas}	12.5×10^3

燃料電池の性能を表 5-4 に示す。燃料電池の発電・給湯における効率と出力の定格値（最大値）・最小値については、それぞれ市販の家庭用燃料電池 CGS の最新モデル（2015 年 9 月時点）を想定し、PEFC は東京ガス・パナソニックが共同開発した「エネファーム 2015 年モデル[93]」、SOFC は大阪ガス・アイシン精機・京セラ・長府製作所が共同開発した「エネファーム type S[94]」の性能値を用いた。発電・熱回収効率は定格（最大）運転から最小運転まで常に一定とし、部分効率は考慮していない。

定格運転単価とは、燃料電池を定格（最大）出力で 1 時間運転したときのガス料金を指す。定格運転単価 C_{fc} [円/h]は、式 5-1 で算出できる。

$$C_{fc} = \frac{C_{gas}}{Q_{gas} \cdot EFF_E} \cdot E_{fc,max} \quad \text{式 5-1}$$

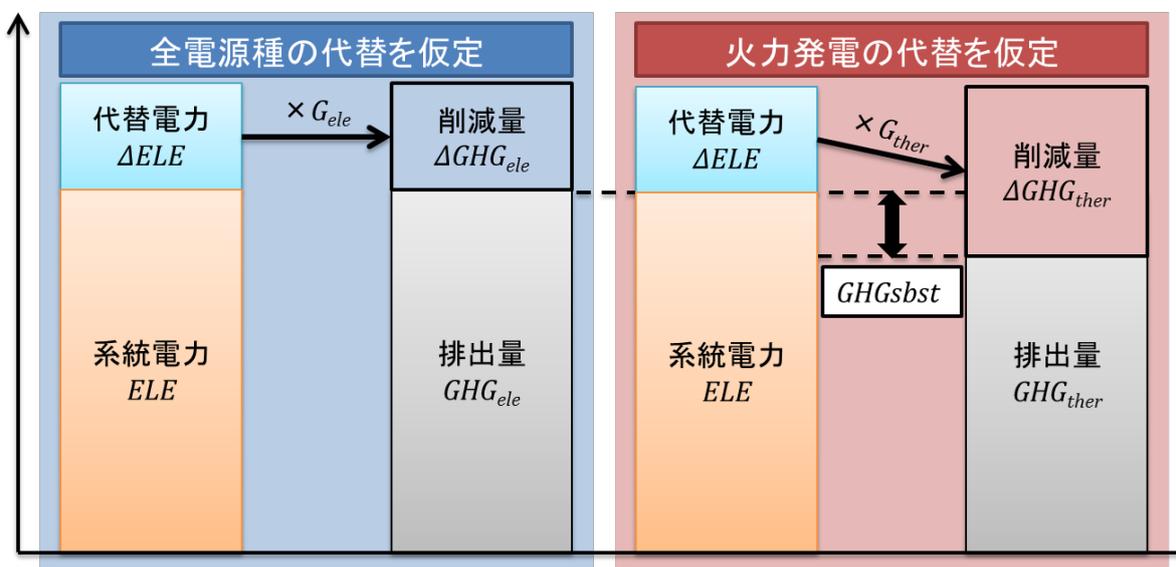
定格 CO₂ 排出原単位は燃料電池を定格（最大）出力で 1 時間運転した時の CO₂ 排出量を指す。定格 CO₂ 排出原単位では、ガス消費による直接的な CO₂ 排出だけでなく、燃料電池の発電によって系統火力発電が代替されると想定したときの系統電力側の追加的な CO₂ 削減も考慮している。電源代替による CO₂ 削減についての考え方は次のとおりである。仮に燃料電池のような分散型電源を需要端に導入することによって系統側における全電源種の発電が平均的に代替されるとき、系統側における CO₂ 排出量は電力購入量に対して全電源平均での系統電力 CO₂ 排出原単位を単純に掛けることによって求めることができ、電源代替による追加的な影響を考慮する必要はない。しかし、分散型電源の発電によって系統火力発電が優先的に代替されると想定した場合、分散型電源の発電量に対して火力平均と全電源平均での系統電

力 CO₂ 排出原単位の差分を掛けた量に相当する CO₂ 排出量が追加的に削減される。そこで、この追加的な削減を燃料電池の運転による CO₂ 排出原単位に含めることによって、電源代替による影響を考慮することとした。電源代替による追加的な CO₂ 削減の概念を図 5-2 に示す。定格 CO₂ 排出原単位 G_{fc} [g-CO₂/h] は、式 5-2 で算出できる。

$$G_{fc} = \left\{ \frac{G_{gas}}{Q_{gas} \cdot EFF_E} - (G_{ther} - G_{ele}) \right\} \cdot E_{fc,max} \quad \text{式 5-2}$$

表 5-4 燃料電池の性能 (設定値)

項目	記号	設定値 PEFC	設定値 SOFC
発電効率 (HHV)	EFF_E	35.2 %	42.0 %
熱回収効率 (HHV)	EFF_H	50.6 %	39.2 %
定格発電出力 [W]	$E_{fc,max}$	700	700
最小発電出力 [W]	$E_{fc,min}$	200	50
定格給湯出力 [W]	$H_{fc,max}$	1006.3	646.7
定格運転単価 [円/h]	C_{fc}	20.7	17.3
定格運転 CO ₂ 排出原単位 [g-CO ₂ /h]	G_{fc}	220.2	161.5



火力発電の代替による追加的なCO₂削減量は、 $GHG_{sbst} = (G_{ther} - G_{ele}) \times \Delta ELE$

図 5-2 電源代替による追加的な CO₂ 削減

その他，表 5-5 に系統電力・補助ヒータの利用単価・CO₂ 排出原単位，および貯湯槽の放熱率の設定値を示す．これらは2種類の燃料電池に共通する値を設定する．

系統電力購入単価 C_{ele} [円/Wh]は全国家庭電気製品公正取引協議会の「電力料金の目安単価」[95]に基づいて設定する．この数値は家電製品の電気代を算定する際に一般的に用いるものである．電力会社が実際に提供している電力料金制度では，消費量の増加に応じて電力単価が上昇する「段階的料金制度」や昼と夜で電力単価が異なる「時間帯別料金制度」が存在するが，このモデルでは一律同じ料金単価を設定している．系統電力のCO₂ 排出原単位は前述のとおり，省エネルギーセンターの資料[91]における設定値に準拠する．

補助ヒータの設定値について，補助ヒータの運転単価 C_{heater} [円/Wh]とCO₂ 排出原単位 G_{heater} [g-CO₂/Wh]は，式 5-3・式 5-4 で算出できる．

$$C_{heater} = \frac{C_{gas}}{Q_{gas} \cdot EFF_{heater}} \quad \text{式 5-3}$$

$$G_{heater} = \frac{G_{gas}}{Q_{gas} \cdot EFF_{heater}} \quad \text{式 5-4}$$

表 5-5 系統電力・補助ヒータの利用単価・CO₂ 排出原単位，および貯湯槽の放熱率（設定値）

項目	記号	設定値
補助ヒータ熱回収効率	EFF_{heater}	95.0 %
系統電力購入単価 [円/Wh]	C_{ele}	2.70×10^{-2}
補助ヒータ運転単価 [円/Wh]	C_{heater}	1.44×10^{-2}
系統電力 CO ₂ 排出原単位 [g-CO ₂ /Wh]	G_{ele}	0.487
補助ヒータ CO ₂ 排出原単位 [g-CO ₂ /Wh]	G_{heater}	0.192
貯湯槽の放熱率（1 時間あたり） [-]	RAD	1.80×10^{-2}

5.3 最適運転モデルの計算手法

ここまで、家庭用燃料電池システムの構成と性能について説明した。つづいて、家庭用燃料電池システムの最適な運転計画を決定するためのモデルの計算手法を説明していく。

本モデルでは家庭のエネルギー需要の不確実性を想定して、1時間おきに今後の運転計画を決定するプロセスを繰り返す「多段意思決定プロセス」によって運転シミュレーションする。この運転計画決定プロセスにおいて、直近のエネルギー需要のみを考慮するのでは家庭用燃料電池システムの効率的な運転は果たせない。なぜならば、湯はりなど給湯需要が集中する時間帯に向けて事前に燃料電池の出力を上げて、貯湯槽に湯を貯めておく必要があるためである。先行研究[48]のモデルによるシミュレーション結果では、1.2.4 で示したように、夕方から夜にかけての発生する給湯需要に向けて午前中から燃料電池の稼働率を上昇させている。このように、家庭用燃料電池システムを効率的に利用するためには、1日の電力・給湯需要スケジュール（電力・給湯需要の発生するタイミングや量）を先読みして、将来の需要に合わせて事前に出力を変動させる必要がある。そこで、直近だけではなく、現時点から24時間後までのエネルギー需要を考慮して、24時間後までに発生するエネルギーコストが最小になるように運転計画を決定する。なお、エネルギー需要を考慮する範囲を現時点から24時間後までとするのは、1.2.4 で指摘した通り生活行動に応じて家庭のエネルギー需要が1日24時間周期でサイクルすることを前提として、燃料電池の設計（貯湯槽容量など）の最適化がなされているためである。24時間後とはこのモデルで需要予測すべき時間範囲の上限であり、必ずしも24時間後まで予測することが最適であるとは限らない。

また、運転計画決定プロセスにおいて考慮されるエネルギー需要は、あくまで将来における予測値であり、不確実性を有している。そこで、運転計画決定プロセスにおける電力・給湯需要の値は一意に決め打つのではなく確率的に与えて、エネルギーコストの「期待値」が最小となるように運転計画を決定する。このような確率的に状態推移するシステムに対して多段階にわたって目的関数の期待値を最適化する手法を「確率動的計画法（stochastic dynamic programming ; SDP）」とよぶ。

以降では、まず5.3.1において電力・給湯需要の発生確率をどのように与えるかについてを論じる。つづいて、5.3.2で運転計画を記述するにあたって必要となる「運転状態」の定義について論じる。24時間後までの家庭用燃料電池システムの運転計画は、 t 時間後（ $t = 1, 2, \dots, 24$ ）の2種類の運転状態の組み合わせで表現することができる。そして、5.3.3でそれぞれの運転状態において発生するエネルギーコスト・CO₂排出量・蓄熱量およびその期待値の算出方法について説明する。5.3.4で家庭用燃料電池システムの運転シミュレーション方法、すなわち確率動的計画法を用いた最適化計算手法について論じる。最後に、5.3.5で開発した最適運転モデルによる燃料電池の運転シミュレーションについて述べる。

5.3.1 電力・給湯需要の発生確率

本モデルでは、「家庭における時々刻々の電力・給湯需要は日々の生活行動のばらつきによって不確実性を有する」という需要の不確実性を考慮する。そのために、家庭用燃料電池システムの運転計画を決定するにあたって、電力・給湯需要を一意に置くのではなく、「需要の発生確率」という形で確率的に与える。ここでは、需要の発生確率の計算手法を説明する。家庭の電力・給湯需要スケジュールは、第4章で説明したモデルによる推計値を用いる。

まず第4章で推計した15分ごとの電力・給湯需要スケジュールを1時間ごとの離散値に変換する。本来エネルギー需要は連続変数であるが、離散化することによって5.3.3で詳述する将来のエネルギーコスト・蓄熱量の期待値計算が容易となる。そこで電力需要 e_i [W] ($i = 1, 2, \dots, 35$)は200Wから100W刻みの35区分 ($e_1 = 200, e_2 = 300, \dots, e_{30} = 3,600$ [W])⁹、給湯需要 h_j [W] ($j = 1, 2, \dots, 25$)は0Wから500W刻みの25区分 ($h_1 = 0, h_2 = 500, \dots, h_{20} = 12,000$ [W])として与える(端数は四捨五入)。

つづいて、各季節・曜日の離散的なエネルギー需要から1時間ごとに電力需要 $E_{dm}(t)$ の発生確率 $P(E_{dm}(t) = e_i)$ ならびに給湯需要 $H_{dm}(t)$ の発生確率 $P(H_{dm}(t) = h_j)$ を求める。電力需要と給湯需要の独立性については検討の余地があるが、本研究では電力・給湯需要の生起確率は互いに独立であると仮定した。これらが独立でないと仮定すると、膨大な数の生起確率が設定されることになる。そのため、シミュレーション時に大量のメモリを生起確率に割り当てる必要があり、モデルによる計算が困難となる。電力・給湯需要の相関係数を求めると、両者には正の弱い相関を確認できるが、これは需要が1日周期でのトレンドを有するためであり、これは需要発生確率を1時間おきに与えているために考慮できている。各季節(冬・夏・中間期(冬寄り)・中間期(夏寄り))における子小中学2・平日の電力・給湯需要カーブ10通りについて、全日(0時~23時台)で求めた場合での相関係数と、1時間ごとに求めた場合での相関係数の絶対値の平均の比較を表5-6に示す。全日で相関係数を求めた場合には、冬や中間期(冬寄り)における電力・給湯需要の相関係数が0.3を超えている。しかし、1時間ごとの電力・給湯需要の相関係数の絶対値を求めて24時間分の平均をとった場合、いずれの季節においても0.2を下回る。

本モデルではトレンドに対するずれを需要の不確実性として確率的に与え、ずれの大きさは電力・給湯それぞれ独立としているため、需要の不確実性を過大評価する傾向にあるが、影響は限定的と考えられる。発生確率の例として、子小中学2の冬・平日における0時・6時・12時・18時台の電力・給湯需要発生確率を図5-3に示す。

表 5-6 電力・給湯需要の相関係数(子小中学2・平日)

	冬	夏	中間期 (冬寄り)	中間期 (夏寄り)
全日での相関係数	0.322	0.109	0.357	0.168
1時間ごとでの相関係数 絶対値の平均	0.171	0.133	0.171	0.128

⁹ 冷蔵庫や待機電力によって常に電力消費がなされるため、電力需要が300W未満となることはない。

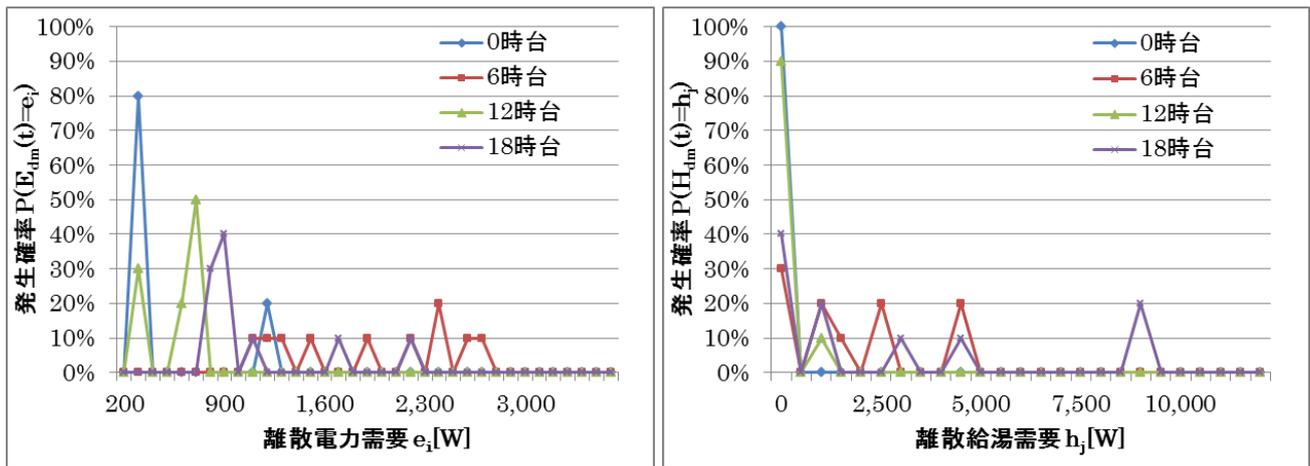


図 5-3 電力・給湯需要発生確率 (子小中学 2・冬・平日)

5.3.2 運転状態の定義

5.3.1 の手法によって電力需要の発生確率 $P(E_{dm}(t) = e_i)$ と給湯需要の発生確率 $P(H_{dm}(t) = h_j)$ が与えられたとして、つづいては任意の離散的な電力需要 e_i [W]・給湯需要 h_j [W]の離散値の組み合わせ (e_i, h_j) について考える。燃料電池の運転出力は最小出力から定格（最大）出力まで連続的に変化しうる。ただし、エネルギーコストの最小化を目的関数とした運転においては、時々刻々の家庭用燃料電池システムの運転状態は「最小出力運転」か「電力追従運転」のいずれかを取る、ということが先行研究から明らかになっている。先行研究である Ozawa and Yoshida[48]は、本モデルと同性能の家庭用燃料電池システムを想定して、さらに燃料電池の停止・再稼働した際に発生するガス消費も考慮したうえでエネルギー需給をシミュレーションし、その結果、燃料電池の運転状態は「最小出力運転」か「電力追従運転」のいずれかであることを明らかにした。よって、以上の 2 種類の運転状態を 1 時間毎に組み合わせることによって、家庭用燃料電池システムの運転計画を表現することとした。

最小出力運転（min）では、その時の電力需要の大きさに関係なく燃料電池は最小出力で運転され、電力需要の不足分は系統電力を購入することで賄われる。燃料電池の定格（最大）発電出力を $E_{fc,max}$ [W]、最小発電出力を $E_{fc,min}$ [W]とすると、最小出力運転における燃料電池の出力割合 $\mu_{fc}(t; mode = min)$ [-]は式 5-5 で表される。

$$\mu_{fc}(t; mode = min) = \frac{E_{fc,min}}{E_{fc,max}} \quad \text{式 5-5}$$

電力追従運転（fol）では、その時の電力需要の大きさに合わせて燃料電池の発電出力が変化し、電力需要が燃料電池の定格（最大）発電出力以上となる時の超過分だけが系統電力によって賄われる。先程と同様に、燃料電池の出力割合 $\mu_{fc}(t; mode = fol)$ は式 5-6 で表される。

$$\mu_{fc}(t; mode = fol) = \min \left[\frac{e_i}{E_{fc,max}}, 1 \right] \quad \text{式 5-6}$$

ここにおいて $0 < \mu_{fc}(t) \leq 1$ がつねに成立し、家庭用燃料電池システムは定格（最大）出力を超える出力を発揮することはない。

5.3.3 期待値の算出

5.3.3.1 エネルギーコスト・CO₂排出量の算出

t 時間後における家庭用燃料電池システムの運転を考える。離散的な電力需要 e_i [W]・給湯需要 h_j [W]、燃料電池の出力割合 $\mu_{fc}(t)$ が与えられたとき、家庭用燃料電池システムの運転によるエネルギーコストを計算することができる。家庭用燃料電池システムのエネルギーコストは、いわゆる電力・ガス料金のことであり、燃料電池の運転コスト $COST_{fc}(\mu_{fc}(t))$ ・系統電力の利用コスト $COST_{ele}(\mu_{fc}(t), e_i)$ ・補助ヒータの運転コスト $COST_{heater}(\mu_{fc}(t), h_j)$ の3つで構成され、その時間帯の電力需要を e_i [W]・給湯需要を h_j [W] と一意に与えることで計算できる。よって、それぞれの運転状態について期待値算出を行う時点を現時点として t 時間後に生じるエネルギーコストの期待値 $E[COST(t, \mu_{fc}(t))]$ [円] は、電力・給湯需要の発生確率を用いて式 5-7 として表すことができる。

$$\begin{aligned}
 E[COST(t, \mu_{fc}(t))] &= \sum_{i,j} [P(E_{dm}(t) = e_i) \cdot P(H_{dm}(t) = h_j) \\
 &\quad \cdot \{COST_{fc}(\mu_{fc}(t)) + COST_{ele}(\mu_{fc}(t), e_i) + COST_{heater}(\mu_{fc}(t), h_j)\}]
 \end{aligned}
 \tag{式 5-7}$$

燃料電池の運転コスト $COST_{fc}(\mu_{fc}(t))$ [円] は燃料電池が消費するガス料金で、燃料電池の出力割合 $\mu_{fc}(t)$ に比例する (式 5-8)。ここで燃料電池の運転時間の幅は $\Delta t = 1.0$ [h] である。

$$COST_{fc}(\mu_{fc}(t)) = C_{fc}\mu_{fc}(t)\Delta t
 \tag{式 5-8}$$

系統電力のコスト $COST_{ele}(\mu_{fc}(t), e_i)$ [円] はいわゆる電力料金で、 t 時間後の電力需要量 $e_i\Delta t$ [Wh] と燃料電池の発電出力量 $E_{fc,max}\mu_{fc}\Delta t$ [Wh] の差分の電力量を系統から購入する (式 5-9)。燃料電池の発電出力は電力需要を超えないので、系統電力のコストはつねに非負 ($COST_{ele}(\mu_{fc}(t), e_i) \geq 0$) である。

$$COST_{ele}(\mu_{fc}(t), e_i) = C_{ele}(e_i\Delta t - E_{fc,max}\mu_{fc}(t)\Delta t)
 \tag{式 5-9}$$

補助ヒータのコスト $COST_{heater}(\mu_{fc}(t), h_j)$ [円] は補助ヒータが消費するガス料金で、 t 時間後の給湯需要量 $h_j\Delta t$ [Wh] が同時時間帯における燃料電池の給湯出力量 $H_{fc,max}\mu_{fc}(t)\Delta t$ [Wh] と $t-1$ 時間後における貯湯槽の蓄熱量の期待値 $E[H_{tank}(t-1, \mu_{fc}(t-1))]$ [Wh] を上回ったとき、不足分の給湯需要量を補助ヒータによって賄う。燃料電池の給湯出力量とそれまでの蓄熱量によって給湯需要量が満たされる場合 ($h_j\Delta t - H_{fc,max}\mu_{fc}(t)\Delta t + E[H_{tank}(t-1, \mu_{fc}(t-1))] < 0$) にはコストは発生しない ($COST_{heater}(\mu_{fc}(t), h_j) = 0$) (式 5-10)。

$$\begin{aligned}
& COST_{heater}(\mu_{fc}(t), h_j) \\
& = \max[C_{heater}\{h_j\Delta t - (H_{fc_max}\mu_{fc}(t)\Delta t + E[H_{tank}(t-1, \mu_{fc}(t-1))])\}, 0] \quad \text{式 5-10}
\end{aligned}$$

また、式 5-8～式 5-10 のエネルギー単価 $C_{fc} \cdot C_{ele} \cdot C_{heater}$ [円/Wh] を CO₂ 排出原単位 $G_{fc} \cdot G_{ele} \cdot G_{heater}$ [g-CO₂/Wh] に変更することで、燃料電池の CO₂ 排出量 GHG_{fc} [g-CO₂] (式 5-11) ・系統電力の CO₂ 排出量 GHG_{ele} [g-CO₂] (式 5-12) ・補助ヒータの CO₂ 排出量 GHG_{heater} [g-CO₂] (式 5-13) を求めることができる。

$$GHG_{fc}(\mu_{fc}(t)) = G_{fc}\mu_{fc}(t)\Delta t \quad \text{式 5-11}$$

$$GHG_{ele}(\mu_{fc}(t), e_i) = G_{ele}(e_i\Delta t - E_{fc_max}\mu_{fc}(t)\Delta t) \quad \text{式 5-12}$$

$$\begin{aligned}
& GHG_{heater}(\mu_{fc}(t), h_j) \\
& = \max[G_{heater}\{h_j\Delta t - (H_{fc_max}\mu_{fc}(t)\Delta t + E[H_{tank}(t-1, \mu_{fc}(t-1))])\}, 0] \quad \text{式 5-13}
\end{aligned}$$

5.3.3.2 蓄熱量の算出

同様に、 t 時間後における貯湯槽の蓄熱量の期待値 $E[H_{tank}(t, \mu_{fc}(t))]$ [Wh]も、式 5-14 として表すことができる。

$$[H_{tank}(t, \mu_{fc}(t))] = \sum_j \{P(H_{dm}(t) = h_j) \cdot H_{tank}(\mu_{fc}(t), h_j)\} \quad \text{式 5-14}$$

給湯需要を h_j [W]と一意に与えた場合、 t 時間後の蓄熱量 $H_{tank}(\mu_{fc}(t), h_j)$ [Wh]は、同時間帯における燃料電池の給湯出力量 $H_{fc,max}\mu_{fc}(t)\Delta t$ [Wh]と $t-1$ 時間後の蓄熱量の期待値 $E[H_{tank}(t-1, \mu_{fc}(t-1))]$ [Wh]の和から給湯需要量 $h_j\Delta t$ [Wh]を差し引いた湯量に対して、放熱ロスの係数 $(1-RAD)^{\Delta t}$ を掛けた値になる (RAD は1時間あたりの貯湯槽放熱率を表す)。ただし、燃料電池の給湯出力量とそれまでの蓄熱量の合計を超える給湯需要量が発生した場合 ($H_{fc,max}\mu_{fc}(t)\Delta t + E[H_{tank}(t-1, \mu_{fc}(t-1))] - h_j\Delta t < 0$)、貯湯槽は空になる (式 5-15)。

$$\begin{aligned} H_{tank}(\mu_{fc}(t), h_j) &= \max[(1-RAD)^{\Delta t} \\ &\quad \cdot \{(H_{fc,max}\mu_{fc}(t)\Delta t + E[H_{tank}(t-1, \mu_{fc}(t-1)])\} - h_j\Delta t, 0] \end{aligned} \quad \text{式 5-15}$$

5.3.3.3 エネルギーコスト・蓄熱量の期待値の算出

まず、 t 時間後に生じるエネルギーコストの期待値の計算式を変形する。式 5-7 の右辺に式 5-8・式 5-9・式 5-10 を代入すると、式 5-16 のように表すことができる。同様に、 t 時間後に生じる蓄熱量の期待値の計算式を変形する。式 5-14 の右辺に式 5-15 を代入すると、式 5-17 のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 E[COST(t, \mu_{fc}(t))] &= \sum_{i,j} [P(E_{dm}(t) = e_i) \cdot P(H_{dm}(t) = h_j) \\
 &\cdot \{C_{fc}\mu_{fc}(t)\Delta t + C_{ele}(e_i\Delta t - E_{fc_max}\mu_{fc}(t)\Delta t) \\
 &+ \max[C_{heater}\{h_j\Delta t - (H_{fc_max}\mu_{fc}(t)\Delta t + E[H_{tank}(t-1, \mu_{fc}(t-1))]\}, 0]\}]
 \end{aligned} \tag{式 5-16}$$

$$\begin{aligned}
 E[H_{tank}(t, \mu_{fc}(t))] &= \sum_j \{P(H_{dm}(t) = h_j) \\
 &\cdot \max[(1 - RAD)^{\Delta t} \\
 &\cdot \{(H_{fc_max}\mu_{fc}(t)\Delta t + E[H_{tank}(t-1, \mu_{fc}(t-1))]\} - h_j\Delta t, 0]\}
 \end{aligned} \tag{式 5-17}$$

式 5-16・式 5-17 から、それぞれの運転状態について期待値算出を行う時点を現時点として t 時間後のエネルギーコスト・蓄熱量の期待値は、 $t-1$ 時間後の蓄熱量の期待値の関数として記述することが可能である (式 5-18・式 5-19)。

$$E[COST(t, \mu_{fc}(t))] = f(E[H_{tank}(t-1, \mu_{fc}(t-1))]) \tag{式 5-18}$$

$$E[H_{tank}(t, \mu_{fc}(t))] = g(E[H_{tank}(t-1, \mu_{fc}(t-1))]) \tag{式 5-19}$$

ここで、 $f(x) \cdot g(x)$ の定義を式 5-20・式 5-21 に示す。(式が長いので、判りやすさのために変数 x は赤色で示している)

$$\begin{aligned}
 f(x) &= \sum_{i,j} [P(E_{dm}(t) = e_i) \cdot P(H_{dm}(t) = h_j) \\
 &\cdot \{C_{fc}\mu_{fc}(t)\Delta t + C_{ele}(e_i\Delta t - E_{fc_max}\mu_{fc}(t)\Delta t) \\
 &+ \max[C_{heater}\{h_j\Delta t - (H_{fc_max}\mu_{fc}(t)\Delta t + x)\}, 0]\}]
 \end{aligned} \tag{式 5-20}$$

$$g(x) = \sum_j \{P(H_{dm}(t) = h_j) \cdot \max[(1 - RAD)^{\Delta t} \cdot \{(H_{fc_max}\mu_{fc}(t)\Delta t + x) - h_j\Delta t, 0]\} \} \tag{式 5-21}$$

以上のように、 t 時間後 ($t = 1, 2, \dots, 24$) におけるエネルギーコストや蓄熱量は $t-1$ 時間後 ($t = 1, 2, \dots, 24$)

における蓄熱量に依存する漸化式として記述することができる。このような関係を利用して、将来の電力・給湯需要に依存するエネルギーコストの期待値を逐次的に計算することができる。

5.3.4 確率動的計画法による運転計画の決定

前時間までの電力・給湯需要と貯湯量に応じて、直後の燃料電池の運転状態を決定する動的なモデルを開発するために、確率動的計画法によるモデル化を採用した。動的計画法は多段階決定過程に関する目的関数の最適化手法である[96]。最も一般的なのは時間的な多段階決定過程に関するもので、本研究の場合は時々刻々の運転状態の決定がそれにあたる。このモデルではエネルギーコストの最小化が目的関数となるが、コストは電力・給湯需要に依存し確定的でないため、目的関数の期待値を最適化する確率動的計画法を用いる。

式 5-18・式 5-19 から、24 時間後までのエネルギーコスト・蓄熱量の期待値を逐次的に計算し、さまざまな運転計画における 24 時間後までのコスト期待値の総和を求める。運転計画を構成する運転状態は、現在～8 時間後までは 1 時間刻みで設定し、それ以降～24 時間後までは計算の効率化のために 2 時間刻みでの設定とする（すなわち、 $\mu_{fc}(9) = \mu_{fc}(10), \mu_{fc}(11) = \mu_{fc}(12), \dots, \mu_{fc}(23) = \mu_{fc}(24)$ ）。現在～8 時間後までの運転状態を 1 時間刻みと細かく設定するのは、より近い時間帯の運転状態をこまめに設定することで効率的な運転計画を選択できるようにするためである。運転状態は「最小出力」「電力追従」の 2 通りなので、24 時間後までの運転状態の組み合わせ総数は、 $2^{8+16/2} = 2^{16} = 65,536$ 通りである。この組み合わせの中からコスト期待値の総和が最小となるものを最適な運転計画として採用する。最適な運転計画は運転状態の組み合わせとして、次の評価関数 $L(\mu_{fc}(1), \mu_{fc}(2), \dots, \mu_{fc}(24))$ を最小化することで得られる（式 5-22）。

$$L(\mu_{fc}(1), \mu_{fc}(2), \dots, \mu_{fc}(24)) = \sum_{t=1}^{24} E[COST(t, \mu_{fc}(t))] \quad \text{式 5-22}$$

最適な運転計画が決定したら、その計画に応じた燃料電池の運転をシミュレーションする。このときに発生する（期待値ではない）実際のエネルギーコスト・蓄熱量は、式 5-8～式 5-10・式 5-15 に対して離散的需要 $e_i \cdot h_j$ [W] の代わりに時々刻々（15 分間隔）の電力需要 e [W]・給湯需要 h [W] を与え、運転の時間幅を $\Delta t = 0.25$ [h] とすることで求めることができる。1 時間分の運転シミュレーションをおこなったら、その時点での貯湯槽の蓄熱量から 24 時間後までのエネルギーコスト・蓄熱量の期待値を再計算し、最適な運転計画を更新する。このように、24 時間後までの運転計画の決定→1 時間分の運転シミュレーション→24 時間後までの運転計画の決定→1 時間分の運転シミュレーション→…を繰り返して、燃料電池によるエネルギー需給を再現する。運転計画の決定と運転シミュレーションのフローチャートを図 5-4 に示す。

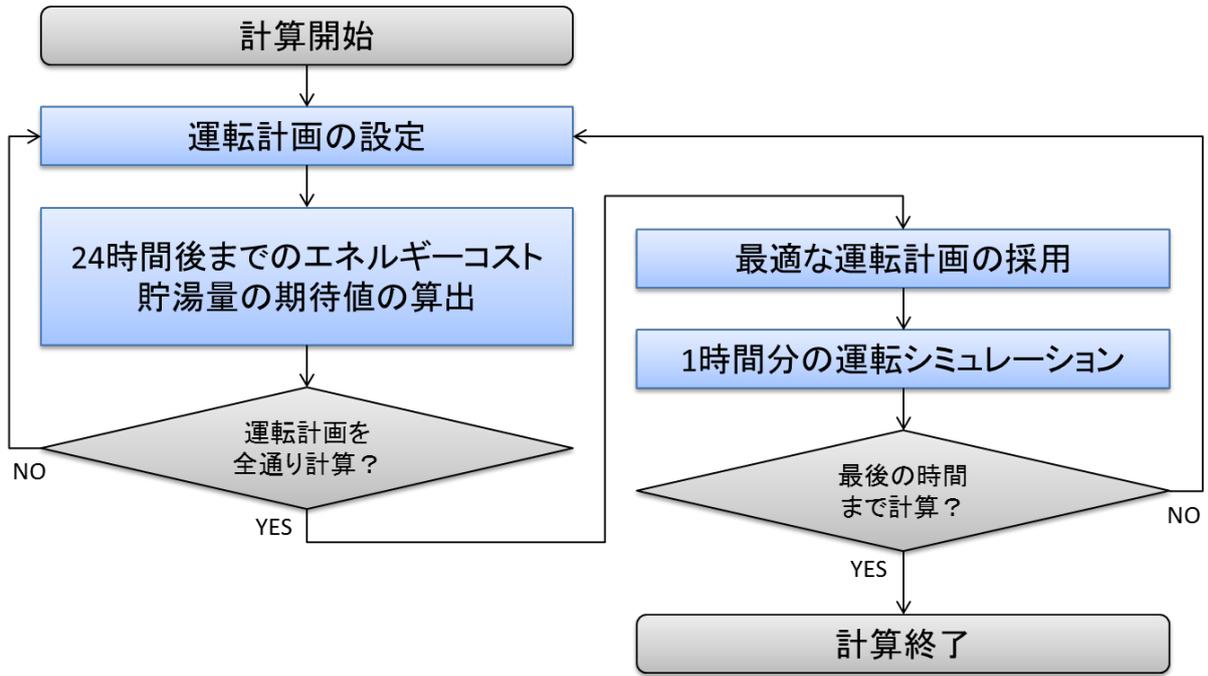


図 5-4 運転計画の決定と運転シミュレーションのフローチャート

5.3.5 運転シミュレーションのバリエーション

開発した最適運転モデルを用いて、家庭用燃料電池システム（PEFC・SOFC）の運転によるエネルギー需給をシミュレーションする。家族構成のバリエーションは、第 4 章で推計したエネルギー需要と同様に 10 通りを想定する。

冬・夏・中間期(冬寄り)・中間期(夏寄り)それぞれの季節について、2 週間（平日 10 日・休日 4 日）分の運転シミュレーションをする。ここで電力・給湯需要の発生確率は平日・休日に分けて設定している。シミュレーション開始時となる初日 0 時 00 分における貯湯槽の蓄熱量は 0 Wh であるが、実際の燃料電池の運転では日を跨いで貯湯するのが一般的である。そこで、シミュレーションのアイドリングとして 0 日目を設けて合計 15 日分のシミュレーションをおこない、以降のエネルギーコスト・CO₂ 排出量の計算では 0 日目の運転を考慮しないで求めている。シミュレーション日の曜日については、0 日目～4 日目・7 日目～12 日目・15 日目を平日、5 日目・6 日目・13 日目・14 日目を休日とする。

5.3.6 家庭用燃料電池システムの経済性・環境性評価

5.3.6.1 年間での経済性・環境性評価

シミュレーションした家庭用燃料電池システムの運転状況から、燃料電池の経済性・環境性を評価する。経済性の指標はエネルギーコスト（電力・ガス料金）、環境性の指標はCO₂排出量とする。これらは、式 5-8～式 5-13 に対して離散的需要 $e_i \cdot h_j$ [W]の代わりに時々刻々（15 分間隔）の電力需要 e [W]・給湯需要 h [W]を与え、運転の時間幅を $\Delta t = 0.25$ [h]とすることで求めることができる。冬・夏・中間期(冬寄り)・中間期(夏寄り)のそれぞれの季節での運転シミュレーションの結果を用いて年間でのエネルギーコスト・CO₂排出量を算出する。各季節の日数は第 4 章と同様に設定し、冬を 160 日間（11 月 8 日～4 月 16 日）、夏を 135 日間（5 月 23 日～10 月 4 日）、中間期(冬寄り)を 22 日間（4 月 17 日～4 月 27 日・10 月 28 日 11 月 7 日）、中間期(夏寄り)を 48 日間（4 月 28 日～5 月 22 日・10 月 5 日～10 月 27 日）とする。

また家庭用燃料電池システムの比較対象となるベースラインは標準的な住宅を想定する。家庭の電力需要は全て系統からの供給で賄い、系統電力の購入単価・CO₂排出源単位は家庭用燃料電池システムのモデルと同様とする。給湯需要は従来型給湯器によって供給され、給湯器効率を 80.0 %、ガス料金を省エネルギーセンター資料[91]における省エネ効果の算出根拠に基づいて 171 円/m³とし、それ以外は家庭用燃料電池システムのモデルと同様とする。

5.3.6.2 導入から廃棄までの経済性・環境性評価

ここまでは、家庭用燃料電池システム導入による 1 年間の経済性・環境性評価を行なった。つづいては、家庭用燃料電池システムを導入してから廃棄するまでの経済性評価を行なう。

家庭用燃料電池システムの製品寿命を 20 年間とし、20 年にわたって得られるエネルギーコスト節約の総額を比較する。家庭用燃料電池システムを導入することで発生するエネルギーコスト節約の将来価値は、「割引現在価値」として現在の価値に換算することができる。家庭用燃料電池システム導入による割引現在価値 PV [円]は、燃料電池導入 n 年目（ $1 \leq n \leq 20$ ）におけるエネルギーコスト節約の将来価値 FV_n [円]によって式 5-23 として表すことができる。ここで ρ は割引率であり、本研究では日本国債（20 年もの）の直近の利回りを参考にして $\rho = 1.0\%$ とする。20 年国債の平均利回りの推移を図 5-5 に示す。

$$PV = \sum_{n=1}^{20} \frac{FV_n}{(1 + \rho)^n} \quad \text{式 5-23}$$

また経済性に関しては、家庭用燃料電池システム導入という判断が家庭にとって経済合理性を持つのかを評価するために、家庭用燃料電池システムの導入費用を設定する。燃料電池の実質導入費用 $PRICE_{fc}$ [万円]は、燃料電池の販売価格 $PRICE_{fc}$ [万円]と補助金 $SUBSIDY_{fc}$ [万円]および従来型給湯器の販売価格 $PRICE_{heater}$ [万円]によって式 5-24 として表すことができる。販売費用・補助金の設定値とそこから算出される燃料電池の実質導入費用を表 5-7 に示す。

$$COST_{initial} = PRICE_{fc} - SUBSIDY_{fc} - PRICE_{heater} \quad \text{式 5-24}$$

燃料電池の販売価格 $PRICE_{fc}$ [万円]は、性能の設定値と同じく、PEFC は「エネファーム 2015 年モデル

[93]], SOFCは「エネファーム type S[94]」の価格を用いた。

家庭用燃料電池システム導入の補助制度には国が実施しているものと地方自治体が発行しているものがあり、国による補助と自治体による補助を併せて受けることが可能である。そこで燃料電池の補助金 $SUBSIDY_{fc}$ [万円]は、国による「一般社団法人燃料電池普及促進協会 平成26年度民生用燃料電池導入支援補助金[98]」と、東京都による「公益財団法人東京都環境公社 家庭用蓄電池、燃料電池（エネファーム）等に対する補助金[99]」を併用した場合を想定して設定する。

従来型給湯器の販売価格 $PRICE_{heater}$ [万円]は、国による補助制度である「一般社団法人燃料電池普及促進協会 平成26年度民生用燃料電池導入支援補助金[98]」における、従来型給湯器の費用に基づいて設定する。以上の設定の結果、燃料電池の実質導入費用はPEFCで92.0万円、SOFCで139.5万円となった。

表 5-7 販売価格・補助金（設定値）と実質導入費用

項目	記号	設定値 PEFC	設定値 SOFC
燃料電池販売価格 [万円]	$PRICE_{fc}$	160.0	215.0
燃料電池補助金 [万円]	$SUBSIDY_{fc}$	45.0	52.5
従来型給湯器販売価格 [万円]	$PRICE_{heater}$	23.0	23.0
実質導入費用 [万円]	$COST_{initial}$	92.0	139.5

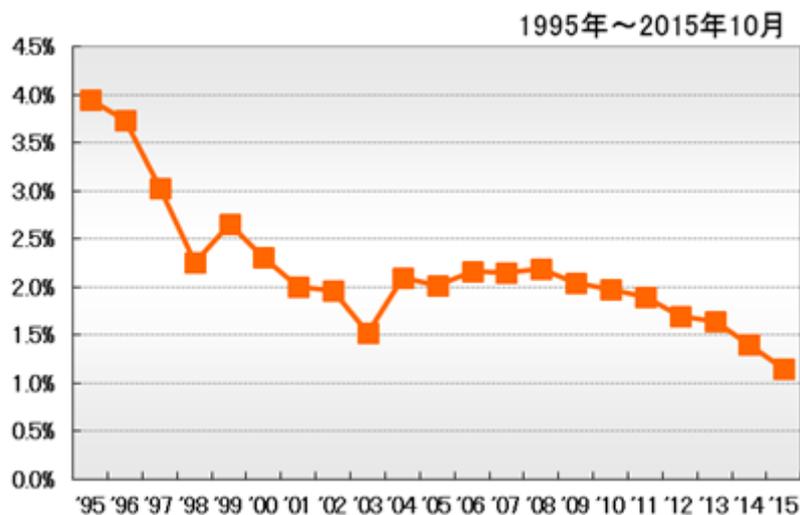


図 5-5 20年国債の平均利回りの推移[97]

5.4 運転シミュレーション結果

以降では、冬と夏における、PEFC・SOFC それぞれの運転シミュレーション結果を示す。全てのシミュレーション結果については、付録として図 A-78～図 A-157 に示す。この節では、若年夫婦の家庭の場合での14日間のシミュレーションの内3日間（3日目～5日目）におけるエネルギー需給をシミュレーション結果の例として図に示す。

5.4.1 PEFC

まずは、PEFCによる冬のエネルギー需給を確認する。若年夫婦の家庭に対してPEFCを導入したときの、冬の3日間（3日目～5日目）におけるエネルギー需給を図5-6に示す。ここで3日目・4日目は平日で5日目は休日である。

電力需給の状況（図の上側）に関しては、大抵の時間帯でPEFCの発電出力（図において青く塗られた部分）は家庭電力需要（図において黒の点線で示された部分）と等しいか、電力需要がPEFCの定格発電出力（=700W）を超える時間帯においては定格発電出力で運転される。これは、運転状態でいうところの「電力追従運転」がなされていることを意味する。PEFCの定格発電出力を超える電力需要は、系統からの電力供給（図において黄色く塗られた部分）によって賄われる。一部の時間帯でPEFCは最小発電出力（=200W）で運転される時間帯がある。これは、運転状態でいうところの「最小出力運転」がなされていることを意味し、図においては3日目20時台や22時台が最小出力運転の時間帯に該当する。この時間帯における給湯需給の状況（図の下側）は、蓄熱量が12,000Wh程度と相対的に多くの湯が貯められている。家庭の給湯需要は、基本的にPEFCからの熱回収によって供給されるが、それでも不足する場合は補助ヒータを運転することで賄われる（図において赤く塗られた部分）。図においては5日目の8時頃および20時頃が補助ヒータの運転される時間帯に該当する。

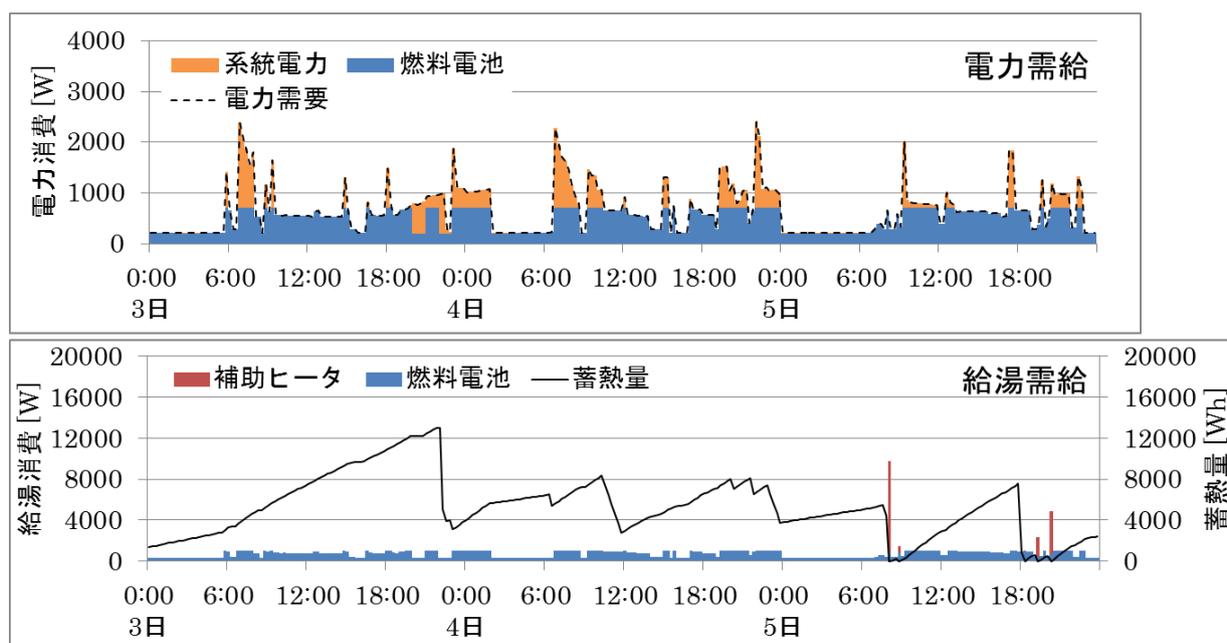


図 5-6 PEFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・冬・3日～5日）

つづいて、PEFCによる夏のエネルギー需給を確認する。若年夫婦の家庭に対してPEFCを導入したときの、夏の3日間（3日目～5日目）におけるエネルギー需給を図5-7に示す。

電力需給の状況（図の上側）に関しては、大抵の時間帯でPEFCの発電出力（図において青く塗られた部分）は最小発電出力（=200W）で運転される。これは、運転状態でいうところの「最小出力運転」がなされていることを意味する。PEFCの最小発電出力を超える電力需要は、系統からの電力供給（図において黄色く塗られた部分）によって賄われる。一部の時間帯でPEFCの発電出力は家庭電力需要（図において黒の点線で示された部分）と等しいか、電力需要がPEFCの定格発電出力（=700W）を超える時間帯においては定格発電出力で運転される。これは、運転状態でいうところの「電力追従運転」がなされていることを意味し、図においては3日目18～23時台、4日目14～17時台、5日目8時台が該当する。給湯需給の状況（図の下側）を、この時間帯の前後で蓄熱量が減少しており給湯需要が発生している。冬と同様、家庭の給湯需要は基本的にPEFCからの熱回収によって供給されるが、それでも不足する場合は補助ヒータを運転することで賄われる（図において赤く塗られた部分）。図においては3日目18時頃が補助ヒータの運転される時間帯に該当する。

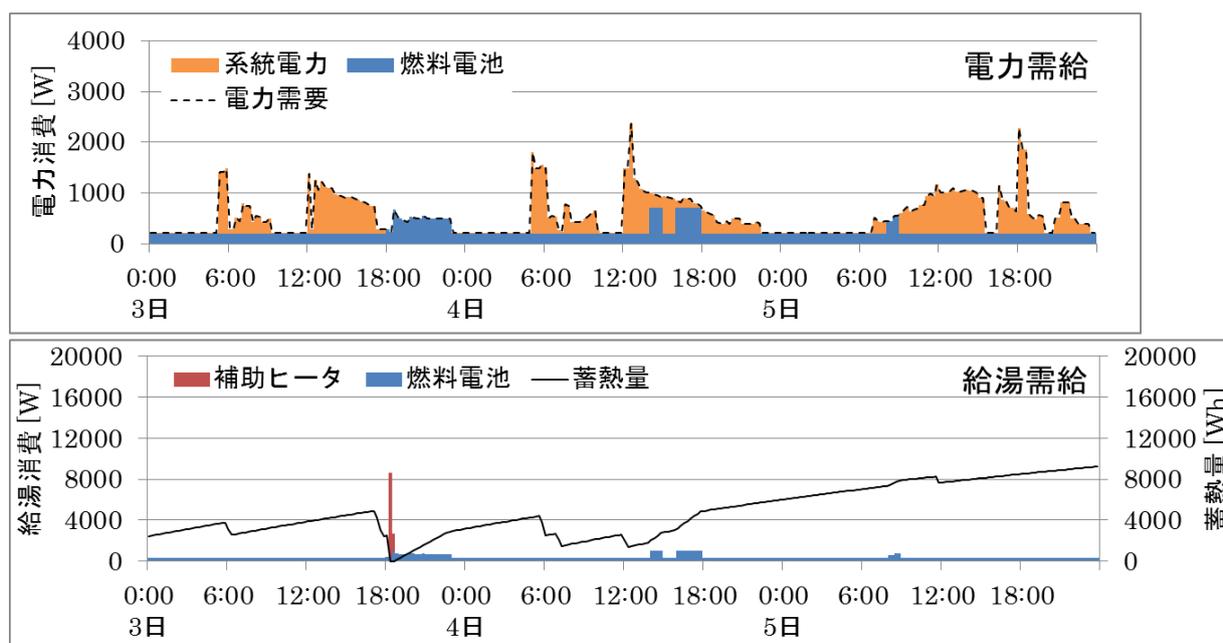


図 5-7 PEFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・夏・3日～5日）

以上、PEFCの運転シミュレーション結果を整理する。冬においては、大抵の時間帯で「電力追従運転」がなされ、蓄熱量が一定量を超えると「最小出力運転」に切り替わる。一方で夏においては、大抵の時間帯で「最小出力運転」がなされ、給湯需要が発生する時間帯の前後では「電力追従運転」に切り替わる。

このような運転シミュレーション結果から、PEFCの運転状態（「電力追従運転」「最小出力運転」のいずれを取るか）は給湯の需給状況、すなわち蓄熱量と給湯需要の発生する時間帯および量に影響されることが分かる。給湯需要を賄うには2種類の方法があり、ひとつにはPEFCからの熱回収、もうひとつは

補助ヒータの運転である。PEFC は熱回収と同時に発電もするので補助ヒータに比べ効率的であり、家庭給湯需要は極力 PEFC からの熱回収によって賄う方がエネルギーコストを抑えることができる。そのため、PEFC の運転状態が給湯の需給状況によって影響されるものと考えられる。しかし一方で、相対的に効率的でない補助ヒータからも給湯が供給されており、この点に関しては需要の不確実性が影響していると考えられる。仮に需要の不確実性がなければ、どの時間帯にどの程度の量の給湯需要が発生するか事前に明らかになっているので、PEFC はその給湯需要が完全に賄えるように運転され、補助ヒータは利用されない。しかし、本モデルでは需要の不確実性を考慮しているため、給湯需要の量と時間帯について確率的に予測することしかできない。そのため期待値以上に給湯需要が多く発生した場合や需要が早く発生した場合に需要不足が発生し、補助ヒータが運転される。

以上のように、PEFC の運転状態と給湯需給状況の関係について述べてきたが、PEFC の運転が電力需給の状況に影響されないのかというと、そうではない。燃料電池の運転出力は、家庭電力需要と PEFC 定格発電出力のいずれか小さい方が上限となり、その運転出力の取る値によってその後の蓄熱量が決まってくる。そのため、電力需給の状況も PEFC の運転状態に影響するのである。

5.4.2 SOFC

まずは、SOFCによる冬のエネルギー需給を確認する。若年夫婦の家庭に対してSOFCを導入したときの、冬の3日間（3日目～5日目）におけるエネルギー需給を図5-8に示す。

電力需給の状況（図の上側）に関しては、常にSOFCの発電出力（図において青く塗られた部分）は家庭電力需要（図において黒の点線で示された部分）と等しいか、電力需要がSOFCの定格発電出力（＝700W）を超える時間帯においては定格発電出力で運転される。これは、運転状態でいうところの「電力追従運転」がなされていることを意味する。SOFCの定格発電出力を超える電力需要は、系統からの電力供給（図において黄色く塗られた部分）によって賄われる。

一方で給湯需給の状況（図の下側）に関しては、家庭の給湯需要は基本的にSOFCからの熱回収によって供給されるが、それでも不足する場合は補助ヒータを運転することで賄われる（図において赤く塗られた部分）。図においては3日目23時頃、4日目12時頃および23時頃、5日目8時頃および18～20時頃が補助ヒータの運転される時間帯に該当する。

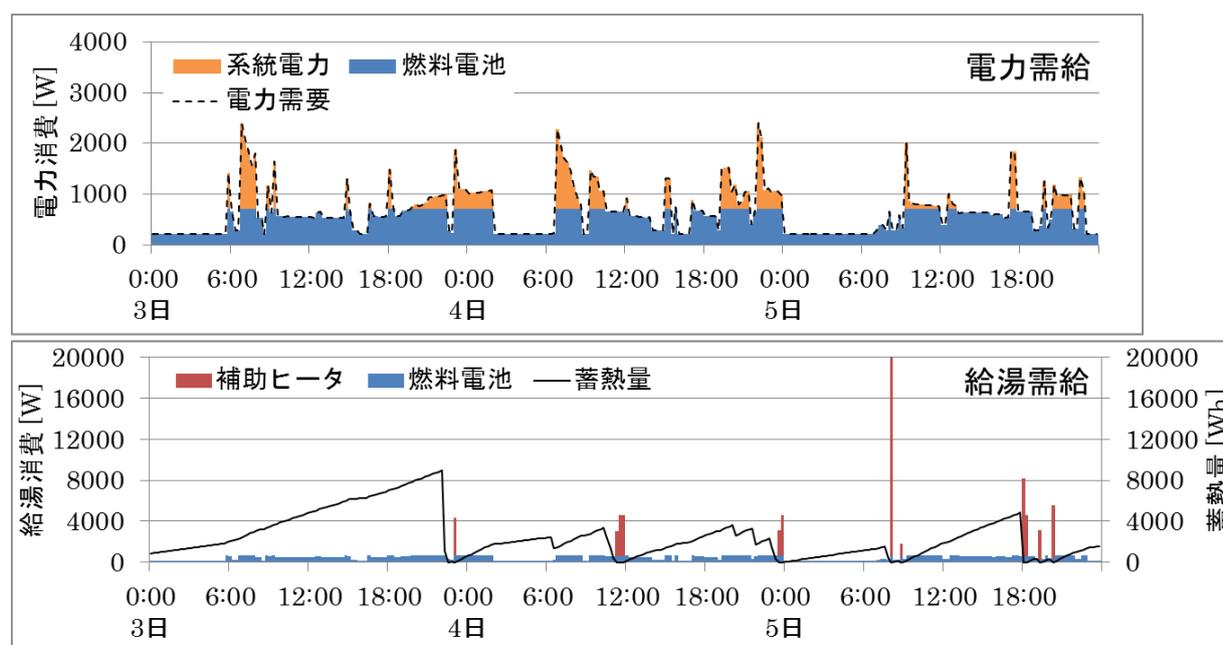


図 5-8 SOFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・冬・3日～5日）

つづいて、SOFCによる夏のエネルギー需給を確認する。若年夫婦の家庭に対してSOFCを導入したときの、夏の3日間（3日目～5日目）におけるエネルギー需給を図5-9に示す。

エネルギー需給の状況については、冬の場合と全く一緒である。電力需給の状況（図の上側）に関しては、常にSOFCの発電出力（図において青く塗られた部分）は家庭電力需要（図において黒の点線で示された部分）と等しいか、電力需要がSOFCの定格発電出力（＝700W）を超える時間帯においては定格発電出力で運転される。これは、運転状態でいうところの「電力追従運転」がなされていることを意味する。SOFCの定格発電出力を超える電力需要は、系統からの電力供給（図において黄色く塗られた部分）によって賄われる。

一方で給湯需給の状況（図の下側）に関しては、家庭の給湯需要は基本的に SOFC からの熱回収によって供給され、（図において該当する部分はないが）それでも不足する場合は補助ヒータを運転することで賄われる。

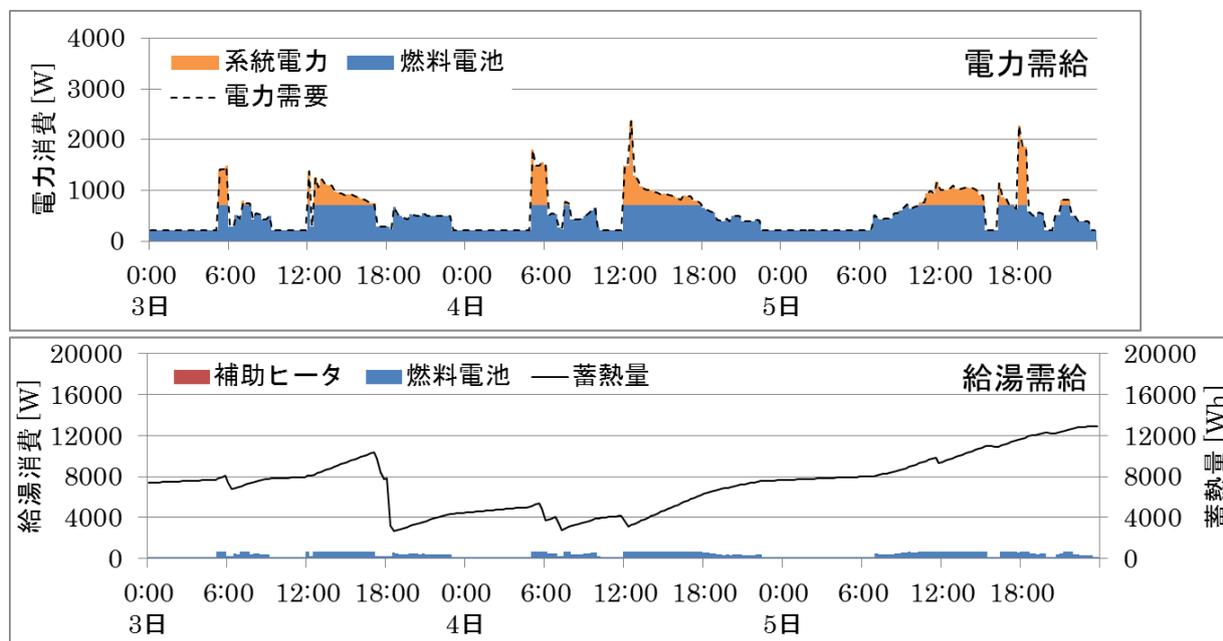


図 5-9 SOFC の運転シミュレーション結果（若年夫婦・夏・3 日～5 日）

以上、SOFC の運転シミュレーション結果を整理すると、SOFC は冬・夏を問わず常に「電力追従運転」がなされる。

このような運転シミュレーション結果から、SOFC の運転状態（「電力追従運転」「最小出力運転」のいずれを取るか）は電力・給湯の需要状況に影響されないことが分かる。このようなシミュレーション結果は SOFC の発電効率の高さに由来するものである。SOFC の発電効率は HHV 基準で 42.0 % であり、PEFC と比べて高効率である。そのため、仮に SOFC からの熱回収を無視したとしても、SOFC の発電単価は $C_{\text{gas}} / (Q_{\text{gas}} \cdot \text{EFF}_E) = 2.48 \times 10^{-2}$ 円/Wh であり、系統電力の購入単価 (2.70×10^{-2} 円/Wh) よりも安い。そのため、定格出力を下回る電力需要は全て SOFC で賄うのが合理的となる（PEFC の熱回収を無視した場合の発電単価は 2.95×10^{-2} 円/Wh）。また SOFC の場合は、発電効率が相対的に高い一方で、熱回収効率は PEFC と比べて低くなっている。そのため SOFC が常に電力追従運転され出力が高い状態を維持したとしても、貯湯槽の蓄熱量が単調増加していく状態、分かりやすく言えば「貯湯槽の湯が余る」という状態は生じなかった。

5.5 家庭用燃料電池システムの経済性・環境性評価

5.5.1 年間エネルギーコストの比較

家庭用燃料電池システムと従来型給湯器における年間エネルギーコストの比較を図 5-10 に示す。ここでいう年間エネルギーコストとは、「家庭が1年間に支払う電力・ガス料金の総額」のことであり、家庭用燃料電池システムの導入費用は含まれない。

家族構成別の比較としては、家族人数が多くなるほどエネルギーコストが増加している。ベースラインである従来型給湯器の年間エネルギーコストを比較すると、2人世帯平均が22.2万円/年・3人世帯平均が24.7万円/年・4人世帯平均が27.4万円/年となり、家族人数が1人増えるごとに年間のエネルギーコストが2.5～2.7万円増加している。

つづいて、同じ家族人数での違いを比較する。同じくベースラインの従来型給湯器の場合に着目すると、夫婦2人世帯では若年夫婦が21.4万円/年・老年夫婦が23.0万円/年と、老年夫婦の方が1.6万円/年多い。夫婦+子供の4人世帯では子未就学2が23.2万円/年・子小中学2が27.4万円/年・子高大学2が28.6万円/年・子社会人2が30.5万円/年と、子供が成長するほどエネルギーコストが増加している。この傾向は図 4-32 で示した電力・給湯需要量の大小関係と同様である。当然のことながら、家庭が消費する電力・給湯需要量が多くなるほど、家庭が支払う電力・ガス料金は増加する。電力・ガスの料金単価が異なるため、電力需要量と給湯需要量の比率の違いによって僅かな差異は生じるものと考えられるが、全体的な傾向をまとめると「エネルギー需要量が多いほど、エネルギーコストも高くなる」という関係となっている。

給湯器の種類による違いを比較すると、従来型給湯器を基準として家庭用燃料電池システムを導入した場合、あらゆる家族構成において年間エネルギーコストは減少している。燃料電池の種類による違いとしては、PEFC よりも SOFC の方が、エネルギーコストは僅かに小さい。従来型給湯器を基準として、PEFC を導入した場合には年間エネルギーコストは平均して27.5%減少し、SOFC を導入した場合には年間エネルギーコストは平均して31.0%減少する。ただし、家庭用燃料電池システムの導入によるエネルギーコストの節約効果は家族構成によって変化する。

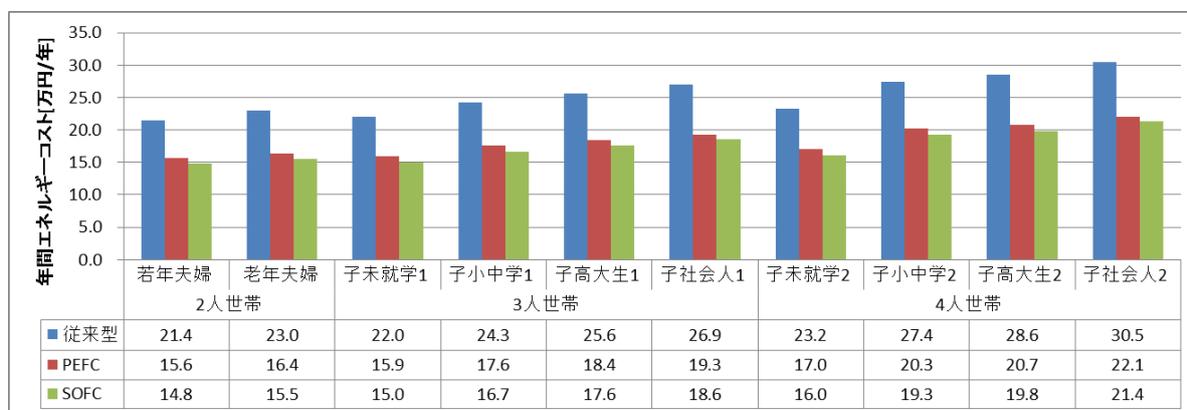


図 5-10 年間エネルギーコストの比較

家庭用燃料電池システムの導入による年間エネルギーコスト節約額をより明確にしたのが図 5-11 である。この図では、それぞれの家族構成におけるベースライン（従来型給湯器）を 0 として、家庭用燃料電池システムを導入することによる電力・ガス料金の年間節約額をマイナスにとって表示している。従来型給湯器を基準として、PEFC を導入した場合の年間エネルギーコスト節約額は平均 7.0 万円/年、SOFC を導入した場合の年間エネルギーコスト節約額は平均して 7.8 万円/年である。

家族人数別に節約額を比較すると、2人世帯平均が 6.2 万円/年 (PEFC) / 7.0 万円/年 (SOFC) ・3人世帯平均が 6.9 万円/年 (PEFC) / 7.7 万円/年 (SOFC) ・4人世帯平均が 7.4 万円/年 (PEFC) / 8.3 万円/年 (SOFC) となり、家族人数が1人増えるごとに年間節約額がおよそ 0.5~0.7 万円増加している。

つづいて、同じ家族人数での違いを比較する。夫婦2人世帯での節約額は、若年夫婦が 5.8 万円/年 (PEFC) / 6.6 万円/年 (SOFC) ・老年夫婦が 6.6 万円/年 (PEFC) / 7.5 万円/年 (SOFC) と、老年夫婦の方が節約額は 0.8~0.9 万円/年多い。夫婦+子供の4人世帯では子未就学2が 6.2 万円/年 (PEFC) / 7.2 万円/年 (SOFC) ・子小中学2が 7.2 万円/年 (PEFC) / 8.2 万円/年 (SOFC) ・子高大学2が 7.8 万円/年 (PEFC) / 8.7 万円/年 (SOFC) ・子社会人2が 8.4 万円/年 (PEFC) / 9.1 万円/年 (SOFC) と、子供が成長するほどエネルギーコストの節約額が増加している。この傾向は年間エネルギーコストの場合と同様に電力・給湯需要量の大小関係と同様であり、全体的な傾向をまとめると「エネルギー需要量が多いほど、エネルギーコストの節約額も多くなる」という関係となっている。



図 5-11 従来型給湯器に対する年間エネルギーコスト節約額の比較

5.5.2 年間 CO₂ 排出量の比較

家庭用燃料電池システムと従来型給湯器における年間 CO₂ 排出量の比較を図 5-12 に示す。

家族構成別の比較としては、家族人数が多くなるほど CO₂ 排出量が増加している。ベースラインである従来型給湯器の年間 CO₂ 排出量を比較すると、2人世帯平均が 3.6 t-CO₂/年・3人世帯平均が 4.0 t-CO₂/年・4人世帯平均が 4.5 t-CO₂/年となり、家族人数が1人増えるごとに年間の CO₂ 排出量がおおよそ 0.4~0.5 t-CO₂/年増加している。

つづいて、同じ家族人数での違いを比較する。同じくベースラインの従来型給湯器の場合に着目すると、夫婦2人世帯では若年夫婦が 3.5 t-CO₂/年・老年夫婦が 3.7 t-CO₂/年と、老年夫婦の方が 0.2 t-CO₂/年多い。夫婦+子供の4人世帯では子未就学2が 3.8 t-CO₂/年・子小中学2が 4.5 t-CO₂/年・子高大学2が 4.7 t-CO₂/年・子社会人2が 4.9 t-CO₂/年と、子供が成長するほど CO₂ 排出量が増加している。

以上の傾向は先のエネルギーコストと同様に図 4-32 で示した電力・給湯需要量の大小関係と同様であり、全体的な傾向としては「エネルギー需要量が多いほど、CO₂ 排出量も高くなる」という関係となっている。

給湯器の種類による違いを比較すると、従来型給湯器を基準として家庭用燃料電池システムを導入した場合、あらゆる家族構成において年間 CO₂ 排出量は減少している。燃料電池の種類による違いとしては、PEFC よりも SOFC の方が、CO₂ 排出量は小さい。従来型給湯器を基準として、PEFC を導入した場合には年間 CO₂ 排出量は平均して 37.8 %減少し、SOFC を導入した場合には年間 CO₂ 排出量は平均して 46.9 %減少する。ただし、家庭用燃料電池システムの導入による CO₂ 排出の削減効果も、エネルギーコストの節約効果の時と同様に家族構成によって変化する。

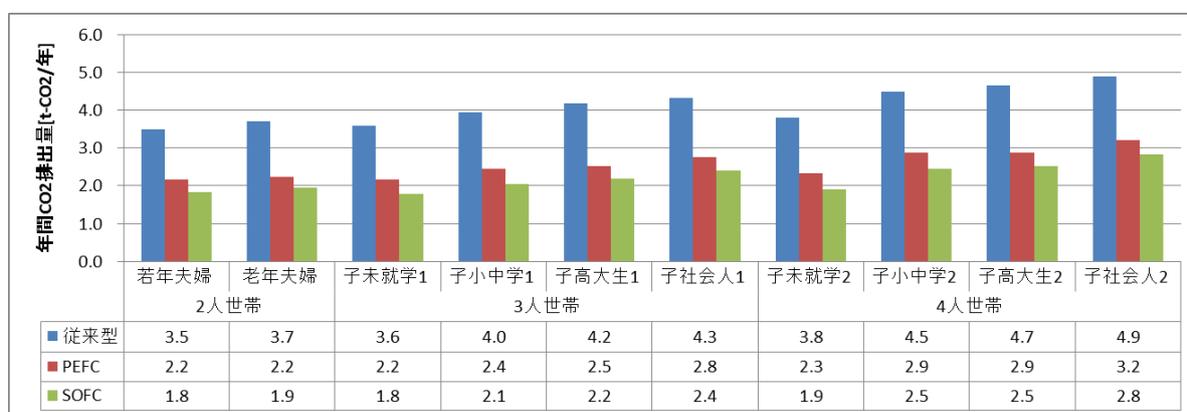


図 5-12 年間 CO₂ 排出量の比較

家庭用燃料電池システムの導入による年間 CO₂ 排出削減量をより明確にしたのが図 5-13 である。この図では、それぞれの家族構成におけるベースライン（従来型給湯器）を 0 として、家庭用燃料電池システムを導入することによる電力・ガス消費による CO₂ 排出の年間削減量をマイナスにとって表示している。従来型給湯器を基準として、PEFC を導入した場合の年間 CO₂ 排出削減量は平均 1.5 t-CO₂/年、SOFC を導入した場合の年間 CO₂ 排出削減量は平均して 1.9 t-CO₂/年である。

家族人数別に削減量を比較すると、2人世帯平均が 1.4 t-CO₂/年（PEFC）／1.7 t-CO₂/年・3人世帯平均

が 1.5 t-CO₂/年 (PEFC) / 1.9 t-CO₂/年 (SOFC) ・ 4 人世帯平均が 1.6 t-CO₂/年 (PEFC) / 2.0 t-CO₂/年 (SOFC) となり、家族人数が 1 人増えるごとに年間削減量がおよそ 0.1~0.2 t-CO₂ 増加している。

つづいて、同じ家族人数での違いを比較する。夫婦 2 人世帯での削減量は、若年夫婦が 1.3 t-CO₂/年 (PEFC) / 1.7 t-CO₂/年 (SOFC) ・ 老年夫婦が 1.5 t-CO₂/年 (PEFC) / 1.8 t-CO₂/年 (SOFC) と、老年夫婦の方が削減量は 0.1~0.2 t-CO₂/年多い。夫婦 + 子供の 4 人世帯では子未就学 2 が 1.5 t-CO₂/年 (PEFC) / 1.9 t-CO₂/年 (SOFC) ・ 子小中学 2 が 1.6 t-CO₂/年 (PEFC) / 2.0 t-CO₂/年 (SOFC) ・ 子高大学 2 が 1.8 t-CO₂/年 (PEFC) / 2.1 t-CO₂/年 (SOFC) ・ 子社会人 2 が 1.7 t-CO₂/年 (PEFC) / 2.1 t-CO₂/年 (SOFC) と、子供が成長するほど CO₂ 排出の削減効果が大きくなる傾向にある。この傾向は年間 CO₂ 排出量の場合と同様に電力・給湯需要量の大小関係と同様であり、全体的な傾向をまとめると「エネルギー需要量が多いほど、CO₂ 排出の削減量も多くなる」という関係となっている。

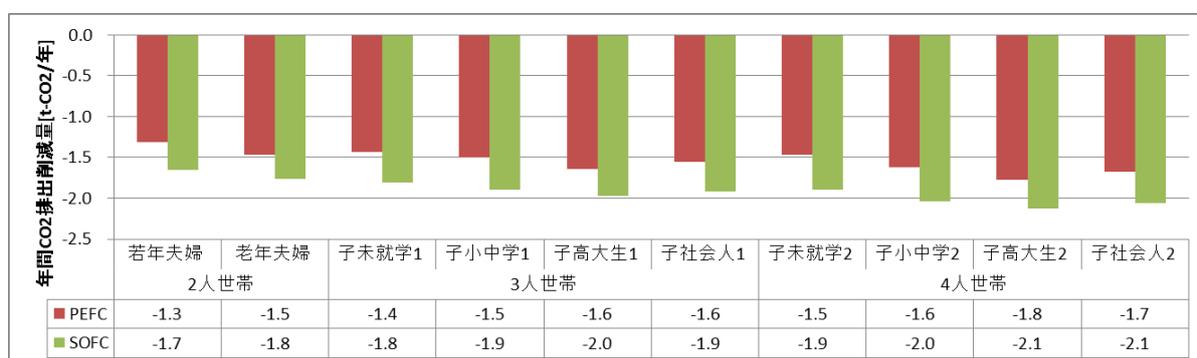


図 5-13 従来型給湯器に対する年間 CO₂ 排出削減量の比較

5.5.3 燃料電池の導入から廃棄までの性能評価

つづいては、家庭用燃料電池システムを導入してから廃棄するまでの20年間における経済性・環境性の評価結果について述べる。燃料電池導入1年目から20年目まで、各年におけるエネルギーコスト節約額を設定するにあたって、「ケース0」「ケース1」「ケース2-1」「ケース2-2」「ケース2-3」の5つのケースを想定する。5つのケースは、燃料電池の運転シミュレーション方法や想定するエネルギー需要がそれぞれ異なっている。5つのケースの違いを図5-14に示す。

比較対象用の「ケース0」では、このケースは他の4つのケースとは異なり、家庭用燃料電池システムの運転をシミュレーションする際に需要の不確実性を考慮していない。すなわち、「家庭の電力・給湯需要が一意に決まっている」という仮想的な条件を前提としている。今回開発した確率動的計画法によるモデルではなく、Ozawa et al.[48]が開発した混合整数計画法によるモデルを用いたシミュレーション結果から得られるエネルギーコスト節約額を用いる。エネルギー需要に関しては、夫婦と中学生の子供2人の4人世帯に対する家庭用燃料電池システムの導入を想定して、第4章で推計した「子小中学2」の値を用い、またエネルギー需要は20年間にわたって変わらないとしている。

「ケース1」では、今回開発した最適運転モデルを用いて、需要の不確実性を考慮した運転シミュレーション結果から得られるエネルギーコスト節約額を用いる。エネルギー需要に関しては、「ケース0」と同様に「子小中学2」の値を用い、またエネルギー需要は20年間にわたって変わらない。

「ケース2-1」「ケース2-2」「ケース2-3」では、今回開発したモデルを用いてエネルギー需要の不確実性を考慮したシミュレーションをおこなう上に、両親の加齢や子供の進学・独立といったライフステージ進行によるエネルギー需要の変化も考慮している。燃料電池導入1年目の家族構成は「ケース0」「ケース1」と同様に夫婦と中学生の子供2人の4人世帯で、家族構成員の年齢は夫45歳・妻43歳・長子15歳（中学3年生）・次子13歳（中学1年生）とする。燃料電池導入2年目以降は家族の年齢が上がってライフステージが移行していき、それに従って異なるエネルギー需要を想定する。「ケース2-1」「ケース2-2」「ケース2-3」の3つのケースは、子供が独立して家庭を離れる年齢がそれぞれ異なる。

「ケース2-1」では、子供が26歳、すなわち社会人5年目となるタイミングで独立する（図5-15）。

「ケース2-2」では、子供が22歳、すなわち大学卒業のタイミングで独立する（図5-16）。

「ケース2-3」では、子供が18歳、すなわち高校卒業のタイミングで独立する（図5-17）。

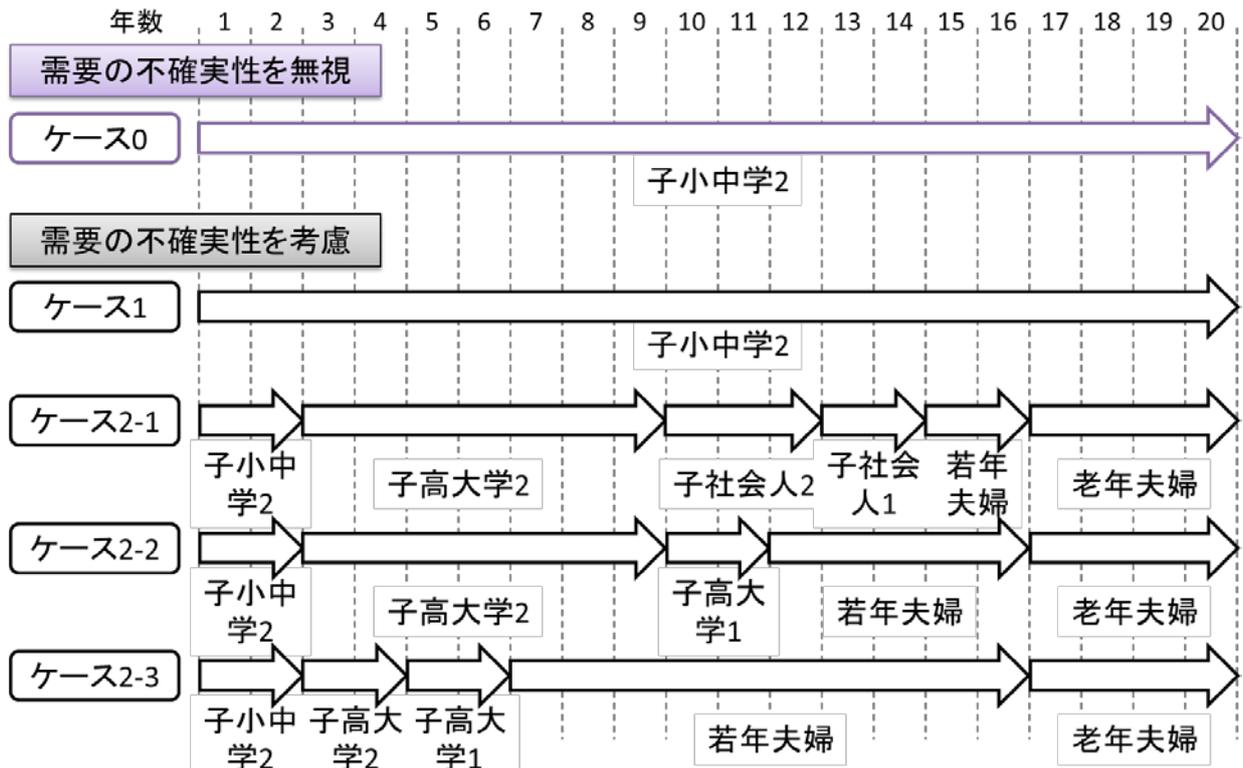


図 5-14 5つのケース

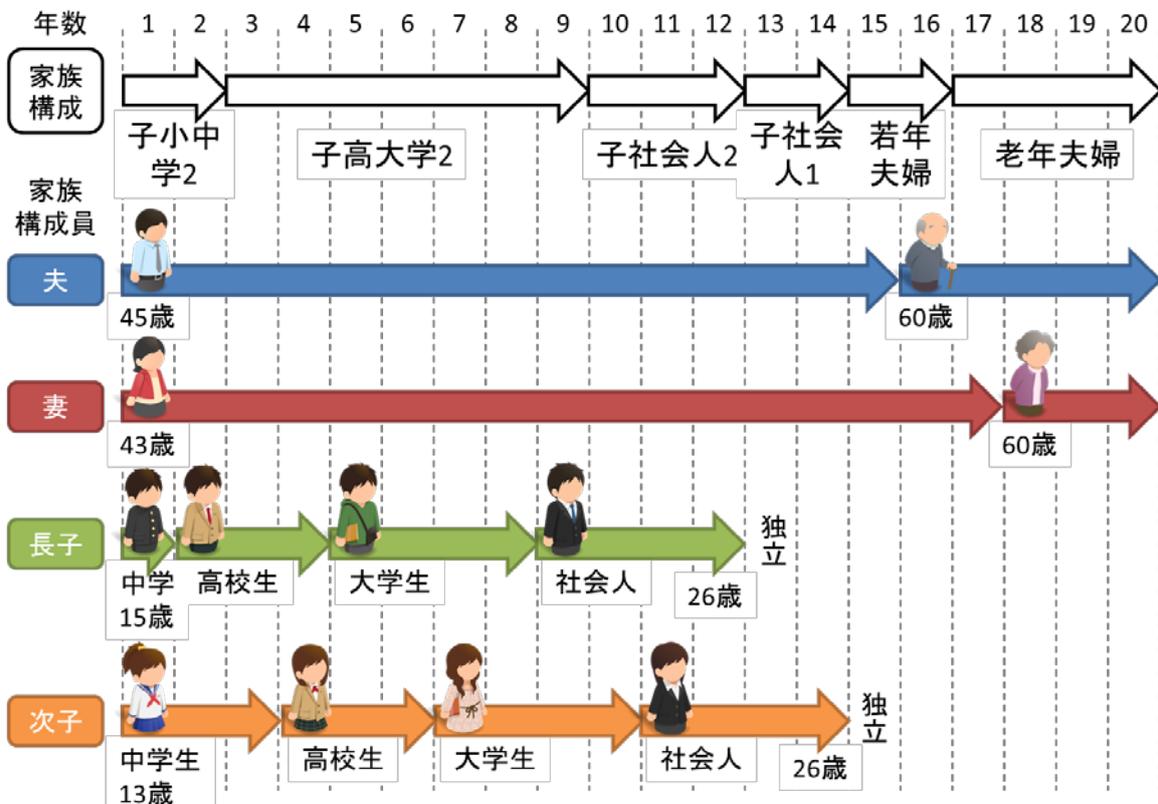


図 5-15 ライフステージの進行 (ケース 2-1)

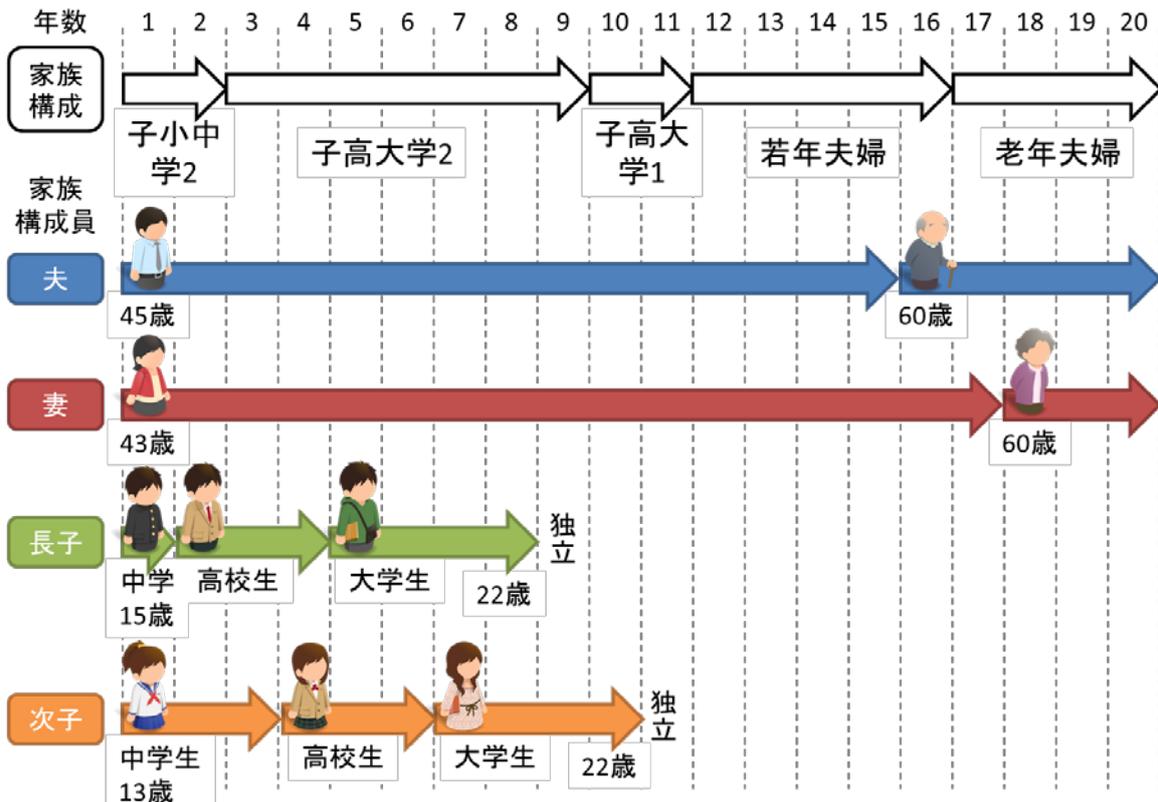


図 5-16 ライフステージの進行 (ケース 2-2)

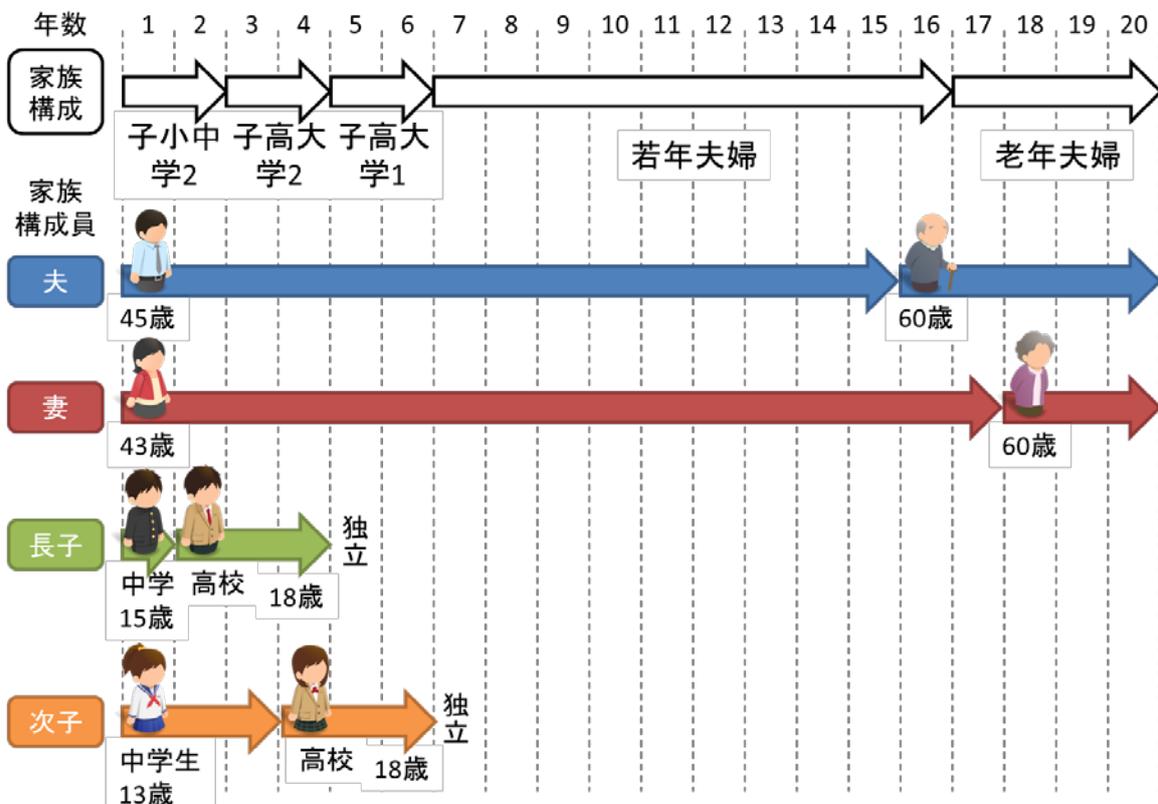


図 5-17 ライフステージの進行 (ケース 2-3)

各ケースにおけるエネルギーコスト節約の割引現在価値の比較を図 5-18 に示す。

まず「ケース 0」と「ケース 1」を比較して、需要の不確実性を考慮することによる経済性評価の違いを確認する。PEFC の場合は、「ケース 0」で 131.5 万円であるのに対し「ケース 1」では 129.3 万円となり、需要の不確実性を考慮することで現在価値が微減する。一方で SOFC の場合は「ケース 0」でも「ケース 1」でも 147.5 万円と等しく、需要の不確実性を考慮しても割引現在価値は変わらない。これは、今回開発した最適運転モデルによる、将来のエネルギー需要を予測しながら燃料電池の運転計画を決定する場合の運転状況が、「将来における家庭の電力・給湯需要が一意に決まっている」という仮想的な運転状況に近いことを意味しており、今回開発したモデルのアルゴリズムによって効率的な燃料電池の運転が実現できることを示唆している。

つづいて「ケース 1」と「ケース 2」を比較して、ライフステージの進行を考慮することによる経済性評価の違いを確認する。PEFC の場合は、「ケース 1」で 129.3 万円であるのに対し「ケース 2」では 117.2 万円～136.3 万円となり、ライフステージの進行の違いを考慮することで割引現在価値は上下に幅を持つ。同様に SOFC の場合も、「ケース 1」で 147.5 万円であるのに対し「ケース 2」では 132.4 万円～151.3 万円となり、割引現在価値は上下に幅を持つ。特に子供が最も早い時期に独立する「ケース 2-3」においては、SOFC 導入の割引現在価値が 132.4 万円となり、SOFC 導入にかかる実質費用 139.5 万円を下回る。

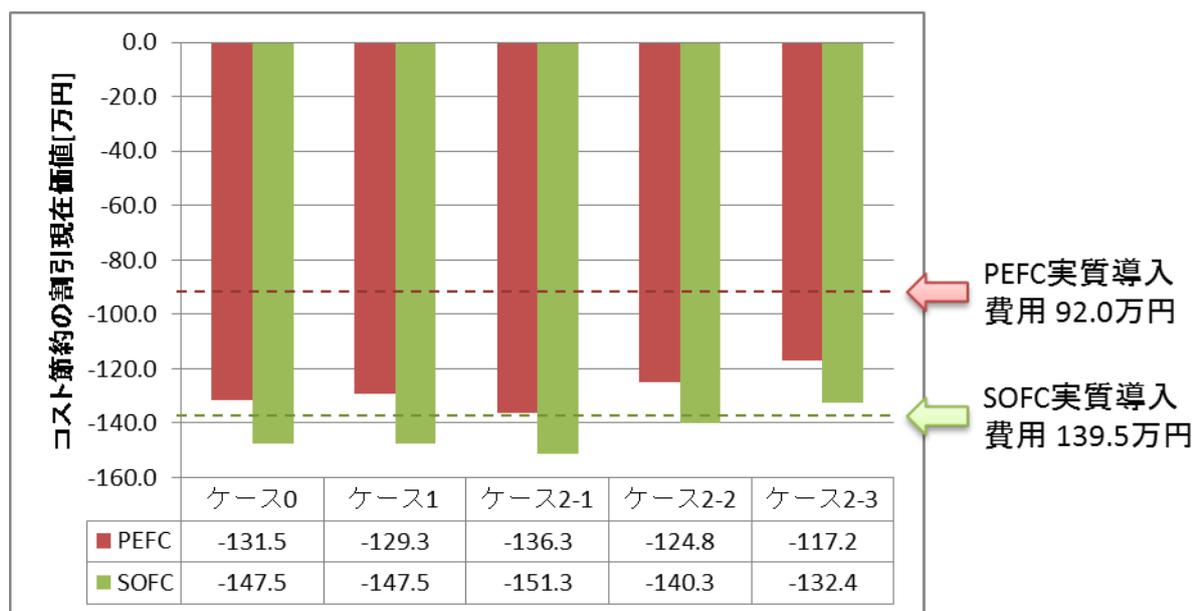


図 5-18 各ケースにおけるエネルギーコスト節約の割引現在価値の比較

つづいて、家庭用燃料電池システムが何年で元が取れるか、すなわち燃料電池導入によるエネルギーコスト節約の割引現在価値が何年目で導入費用を上回るかを評価するために、使用年数によるエネルギーコスト節約の割引現在価値の変化を PEFC は図 5-19、SOFC は図 5-20 に示す。

まず PEFC について、「ケース 0」・「ケース 1」の 14 年目におけるエネルギーコスト節約の割引現在価値は 94.8 万円（ケース 0）・93.2 万円（ケース 1）となり、ライフステージ進行によるエネルギー需要の変化も考慮しない場合は 14 年目に割引現在価値が PEFC の実質導入費用を上回る。一方で、ライフステージ進行によるエネルギー需要の変化も考慮する「ケース 2-1」・「ケース 2-2」・「ケース 2-3」では、ライ

フステージ進行のシナリオによって元が取れる年数が変換する。エネルギーコスト節約の割引現在価値が PEFC の実質導入費用を初めて上回るのは「ケース 2-1」が 13 年目 (97.1 万円)・「ケース 2-2」が 14 年目 (93.0 万円)・「ケース 2-3」が 16 年目 (95.3 万円) となり、最短の「ケース 2-1」と最長の「ケース 2-3」では 3 年間の開きが生じる。

同様に SOFC について、「ケース 0」・「ケース 1」の 19 年目におけるエネルギーコスト節約の割引現在価値はいずれも 140.8 万円となり、ライフステージ進行によるエネルギー需要の変化も考慮しない場合は 19 年目に割引現在価値が SOFC の実質導入費用を上回る。一方で、ライフステージ進行によるエネルギー需要の変化も考慮する「ケース 2-1」・「ケース 2-2」・「ケース 2-3」では、ライフステージ進行のシナリオによって元が取れる年数が変換する。エネルギーコスト節約の割引現在価値が SOFC の実質導入費用を初めて上回るのは「ケース 2-1」が 18 年目 (145.2 万円)・「ケース 2-2」が 20 年目 (140.3 万円) となり、1 年間の開きが生じる。「ケース 2-3」では 20 年間以内でエネルギーコスト節約の割引現在価値が SOFC の実質導入費用を上回らない。

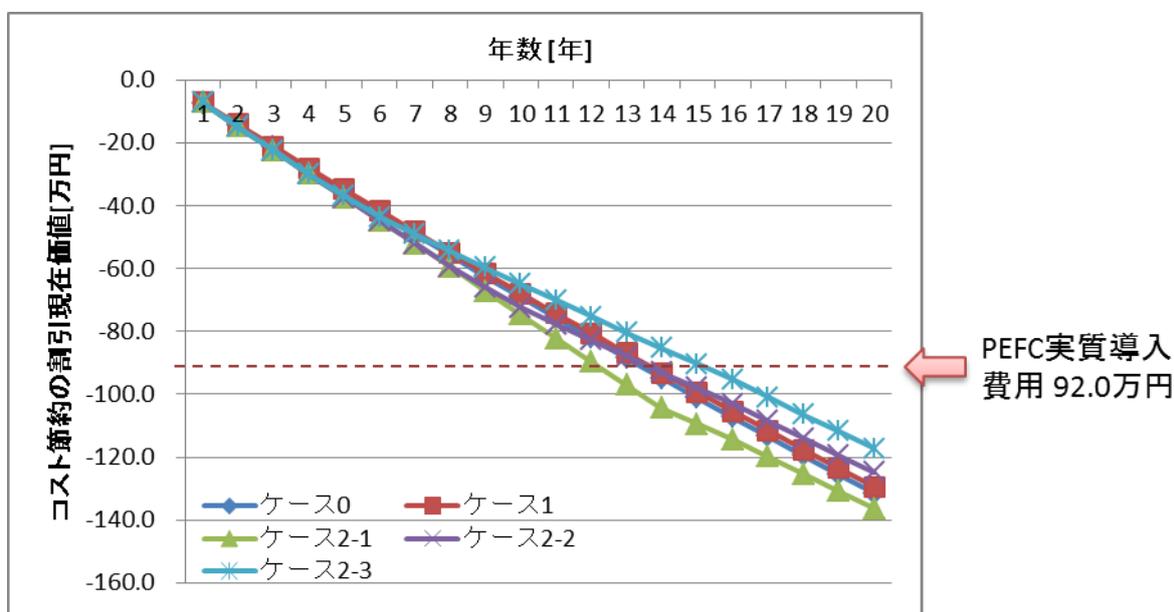


図 5-19 家庭用燃料電池システムの使用年数によるエネルギーコスト節約の割引現在価値の変化 (PEFC)

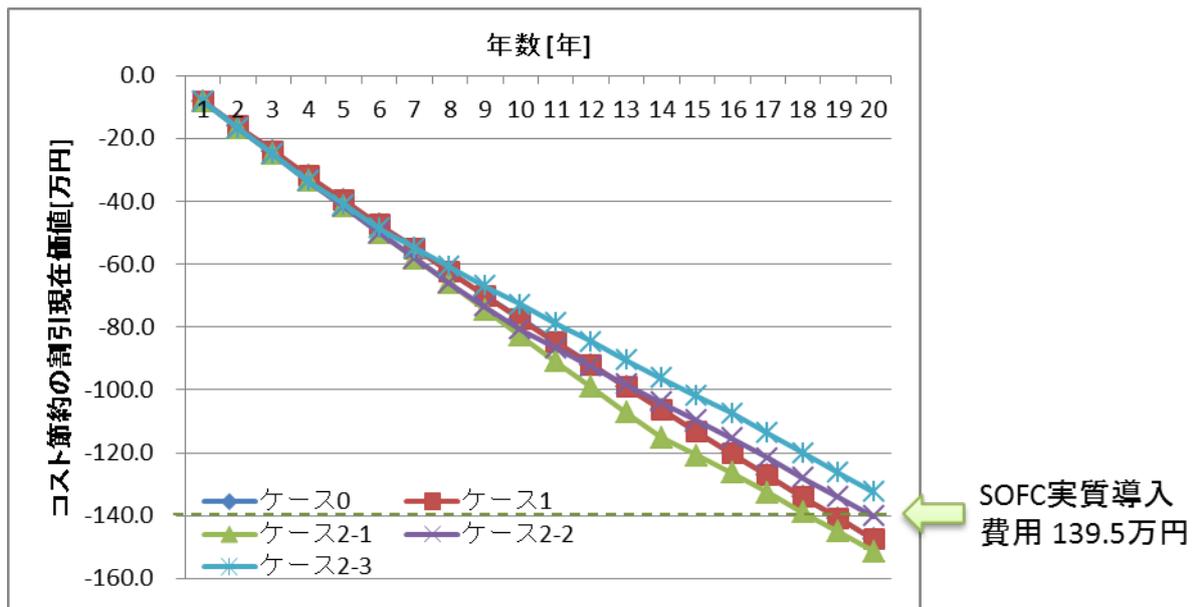


図 5-20 家庭用燃料電池システムの使用年数によるエネルギーコスト節約の割引現在価値の変化 (SOFC)

同様に5つのケースについて、20年にわたって削減できるCO₂排出量の総量を比較する。なお、総CO₂排出削減量は燃料電池導入1年目から20年目までの各年におけるCO₂排出削減量を単純合計したものとし、経済性評価と違って割引率は考慮しない。各ケースにおける総CO₂排出削減量の比較を図5-21に示す。

まず「ケース0」と「ケース1」を比較して、需要の不確実性を考慮することによる環境性評価の違いを確認する。PEFCの場合は、「ケース0」で32.8 t-CO₂であるのに対し、「ケース1」では32.5 t-CO₂となり、需要の不確実性を考慮することで総CO₂排出削減量が微減する。一方でSOFCの場合は「ケース0」で40.9 t-CO₂であるのに対し「ケース1」では40.9 t-CO₂となり、需要の不確実性を考慮しても総CO₂排出削減量はほとんど変わらない。総CO₂排出削減量がわずかながら異なるのは、シミュレーション手法の違いによる桁落ちが原因であると考えられる。

つづいて「ケース1」と「ケース2」を比較して、ライフステージの進行を考慮することによる環境性評価の違いを確認する。PEFCの場合は、「ケース1」で32.5 t-CO₂であるのに対し「ケース2」で29.3 t-CO₂～32.6 t-CO₂となり、ライフステージの進行の違いを考慮することで総CO₂排出削減量は減少する。同様にSOFCの場合も、「ケース1」で40.8 t-CO₂であるのに対し「ケース2」で36.0 t-CO₂～39.7 t-CO₂となり、総CO₂排出削減量は減少する。

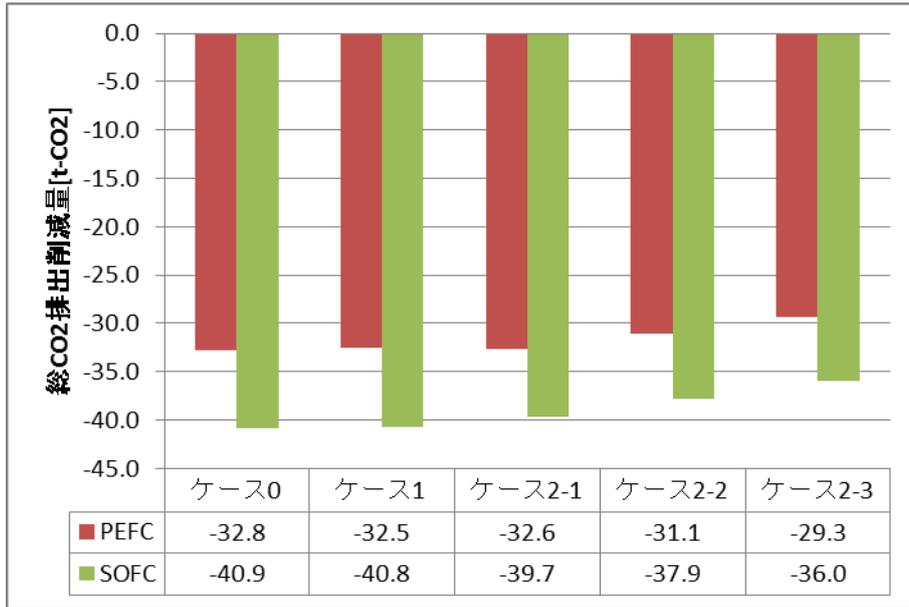


図 5-21 各ケースにおける総 CO₂ 排出削減量の比較

5.6 まとめ

第5章では、家庭用燃料電池システムの運転をシミュレーションするために新しく開発したモデルと、第4章で推計した家庭エネルギー需要を用いた家庭用燃料電池システムの運転シミュレーションおよび経済性環境性評価について述べた。

まず、新しく開発した燃料電池運転のシミュレーションモデルについてまとめる。このモデルでは、「家庭のエネルギー需要は一意に決まっているのではなく、日々の生活行動の違いによって不確実性を有している」という考えのもと、その時点から24時間後までの家庭エネルギー需要（電力・給湯需要）を予測して、家庭の電力・ガス料金の期待値が最小となるように家庭用燃料電池システムの運転を計画していく。このモデルによる運転シミュレーションの結果、PEFCとSOFCでは運転状況が異なることが分かった。PEFCは冬の大抵の時間帯で「電力追従運転」して蓄熱量が一定量を超えると「最小出力運転」に切り替わり、一方で夏は大抵の時間帯で「最小出力運転」し給湯需要が発生する時間帯の前後では「電力追従運転」に切り替わる運転パターンとなった。SOFCは冬・夏を問わず常に「電力追従運転」がなされる結果となった。この違いは、PEFCよりもSOFCの方が発電効率は高く熱回収効率は低いために、SOFCは長時間運転できるものと考えられる。これらの結果と先行研究モデルによる経済性・環境性評価を比較したところ、両者に大きな違いがなかった。先行研究モデルでは「あらかじめ将来のエネルギー需要が一意に決まっている」という仮想的な条件での運転となっており、今回開発したモデルのアルゴリズムによって需要が不確実性を持つ場合でも効率的な燃料電池の運転が実現できることを示唆している。

つづいて、モデルを用いた家庭用燃料電池システムの経済性・環境性評価についてまとめる。本研究では第4章で様々な家族構成の家庭における電力・給湯需要を推計しており、この家庭エネルギー需要を入力値として様々な家族構成の家庭が燃料電池を導入した時の経済性・環境性を評価した。その結果、家族人数・家族構成の違いによって家庭用燃料電池システム導入による電力・ガス料金の節約効果やCO₂排出の削減効果に違いが生じることを確認した。例えば夫婦+子供の世帯では、子供が成長するほど電力・ガス料金の節約効果やCO₂排出の削減効果が大きくなることが分かった。このような違いは、燃料電池のより長期的な性能評価、すなわち導入から廃棄までのトータルでの電力・ガス料金の節約効果やCO₂排出の削減効果に対しても影響を与える。今回想定したPEFCの場合では、燃料電池の導入初年度が同じ家族構成であったとしても、それ以降で子供が家を離れるタイミングの違いによって燃料電池導入の元が取れる年数に3年の開きが生じた。

もちろん、今回の結果から「家庭用燃料電池を導入した家庭は、子供が独立せずになるべく両親と同居したほうが良い」という提案をしたところで受け入れられる可能性は低い。しかしながら、この手法を他の様々な家庭用分散型エネルギー技術に適用することで各技術の運転性能を比較することが可能になり、それぞれの家庭が想定するライフステージ変化の中で各技術が発揮する性能をより具体的に評価することが可能となる。さらに、シミュレーションによる運転性能評価は消費者（家庭）の意思決定だけでなく、メーカーの製品開発・営業においても有益な知見をもたらすことが期待される。このような、現実に即した形での技術評価によって分散型エネルギー技術がますます普及することで、省エネルギー社会の実現に寄与することが期待される。

第6章 結論

6.1 結論

第6章では、第1章から第5章までの研究内容を整理しながら本研究で明らかにしてきたこと、および研究をさらに発展させていくうえでの課題について述べる。

地球温暖化問題や東日本大震災を背景として、省エネルギー化は日本のエネルギーシステムが抱える重要な課題であり、なかでも家庭部門におけるエネルギー消費量はここ40年間で倍増しており最も省エネ対策の余地が大きい部門といえる。日本の家庭部門におけるエネルギー消費量が増加してきた要因として、核家族化・単身化による世帯数の増加や家庭生活の利便性・快適性追求による世帯あたりの機器保有台数の増加などがあり、ここから家庭部門ではエネルギー消費と家庭内での生活が密接に関係していることが分かる。

一方、家庭部門の省エネルギー技術は、デマンドサイドマネジメントなどの「省エネ」と、分散型エネルギーに代表される「創エネ」に分けられる。家庭の生活行動を無視して、これらの省エネルギー対策を取ると、対策による省エネルギー効果が十分に得られないだけでなく、場合によっては家庭生活の利便性を損なうことにもつながりかねない。

そこで、本研究では家庭における居住者の生活行動とエネルギー消費の関係性を分析し、またそこから生活行動の違いを考慮して家庭における省エネルギー技術を導入した時の効果を評価した。評価対象として、デマンドサイドマネジメントの一手法である「省エネアドバイスレポート」と、分散型エネルギー技術の一種である「家庭用燃料電池システム」に着目した。研究手法としては、まずは家庭における生活行動とエネルギー消費を分析するための手法・モデルを開発し、開発した手法・モデルを応用して省エネルギー技術を評価するための実証実験やシミュレーションを行った。

第一にデマンドサイドマネジメントに関する研究では、個々の家庭における日々の生活行動の違いに着目した形での省エネアドバイスの手法を提案した。まず省エネアドバイスを目的として、それぞれの家庭において日々異なる電力需要カーブをパターン抽出し、パターンごとの電力需要や日数の関係性を調べた。具体的な手法としては、最長距離法に基づくクラスタ分析によってそれぞれの家庭における1日の電力需要カーブ1か月分を5パターンに分類し、電力需要カーブのパターンの中で最も日数の多いものを「標準電力需要パターン」（その家庭が1ヶ月間で最も普段の生活をしたときに発生する電力需要カーブのパターン）として、標準電力需要パターンとそれ以外の電力需要パターンの日数の割合・1日の電力需要量・休日の割合を比較した。分析の結果、標準電力需要パターンの日、すなわち普段の生活をしていただと類推される日は、およそ2日に1日の頻度で現れ、それ以外の普段の生活でなかった日に比べて1日の電力需要量が2.0 kWh/日ほど少なく、休日の日数も普段の生活でなかった日に比べて2.4日程度少ないことが明らかになった。また標準以外のパターン、すなわち普段の生活でなかった日の中には1日の電力需要量が普段の2倍から4倍程度発生するような日も日数は少ないが存在することが明らかになった。

以上の分析結果から、普段の生活をした日と普段の生活よりも電力需要量が多かった日を示して、こ

これらの日の生活行動の振り返りを促すことで、電力需要の増加要因が明らかになり電力需要を削減させる行動を促すきっかけになると考えられる。そこで、この生活行動と電力需要に関する情報をフィードバックすることによる電力需要削減効果を検証するために、分析から得られた情報に基づいて省エネアドバイスレポートを作成し、このレポートを送付することによる電力需要削減効果を評価する実証実験を行った。実証実験は参加する家庭を募集するオプト・イン型で実施され、参加した 78 世帯のうち 37 世帯のレポートにクラスタ分析によって得られた情報を記載した。このレポートでは「普段の生活」（標準電力需要パターン）と「多くの電力を使った日」（標準以外で 1 日電力需要量が最も大きいパターン）での 1 日の電力の使いかた（電力需要カーブ）を示して、これらの日の生活行動の振り返りを提案することで、電力需要が増加する要因に対する気づきを促している。省エネアドバイスレポートに同封したアンケートによって、レポートに対する感想を質問するとともに、家庭電力需要のパネルデータを用いた回帰分析によってレポートを読むことによる電力需要への影響を評価した。まずレポート種類別でレポートを読んだ平均的な影響を評価した場合には、ブーメラン効果除去後で有意ではないが電力需要は削減される傾向を示した。つづいて家庭別でレポートを読んだ影響を個別に評価したところ、レポート送付によって電力需要が減少する傾向を示しているのは 32 世帯のうち 17 世帯（うち 2 世帯が有意水準 1% で電力需要が減少）、残る 15 世帯がレポート送付によって電力需要が増加する傾向（うち 6 世帯が有意水準 1% で電力需要が増加）を示した。この家庭ごとの電力需要削減・増加効果をアンケートの回答や電力需要の特徴量と回帰分析して、レポート送付によって電力需要が削減される家庭の特徴を調べた。アンケート結果に基づく回帰分析では β_{use} の推定量が 1% の有意水準で負の値（ -0.702 kWh/日）を取り、この結果は「1 日の電力の使いかたについて指摘された内容に事前に気づいていなかった家庭のほうが、レポート送付によって電力需要が削減される」という関係を意味している。クラスタ分析によって得られる電力需要の特徴量に基づく回帰分析では β_{Etyp} の推定量が 5% の有意水準で負の値（ -0.530 ）、 β_R の推定量も 10% の有意水準で負の値（ -2.468 kWh/日）を取り、この結果から「普段の生活」の 1 日電力需要量に関する情報と「普段の生活」と「多くの電力を使った日」の電力需要量の比率の情報がレポート送付による電力需要の削減効果に寄与していることが示唆された。以上の結果から、家庭電力需要データの分析に基づく生活行動パターンと電力需要に関する情報をフィードバックすることによって、一部の家庭においては電力需要削減効果が得られることが示された。

第二に分散型エネルギーに関する研究では、より長期的な生活行動の変化、具体的にはライフステージの進行による生活リズムの変化に着目した。まず家庭内での居住者の生活行動を再現し家庭のエネルギー需要をボトムアップ型で推計するモデルの開発を行った。開発したモデルの新規性は「家族構成員間の生活行動の関連性」「生活行動と対応する個々の家電製品・給湯の使用状況」の実態を考慮して需要推計を行う点にあり、これを実現するために家庭における生活行動と家電製品・給湯の使用状況に関するアンケート調査を実施した。そして、アンケートの回答結果を入力データとして、様々な季節・家族構成・生活様式における 15 分間隔での家庭電力・給湯需要カーブ 560 パターンを推計した。推計結果から、ライフステージの進行によって家族構成員間の生活行動の関連性が変化し、またそれが家庭エネルギー需要の量やタイミングに影響することを明らかにした。2 人世帯（若年夫婦・老年夫婦）と 4 人世帯（夫婦 2 人＋小中学生の子供 2 人・夫婦 2 人＋社会人の子供 2 人）の電力・給湯需要カーブを比較すると、若年夫婦と夫婦 2 人＋小中学生の子供 2 人の家族は平日朝早くに電力需要ピークが立ち上がって早

起きの傾向が見られ、一方で夫婦 2 人+社会人の子供 2 人の家族は平日の夜遅くまで給湯需要が大きく子供が深夜に入浴する割合が増えていることを反映している。同様に 1 日の電力・給湯需要量を比較すると、家族人数が 1 人増えるごとに電力需要量は 1.5 kWh/日ほど増加し、給湯需要量も同じく増加した。また同じ 4 人世帯でも、子供が未就学児 2 人の場合は電力需要量が 1.6~2.9 kWh/日ほど少なく、社会人 2 人の場合は給湯需要量が 9.1~10.9 kWh/日ほど多くなった。これは子供の生活行動に応じた家電製品・給湯の使用状況の違いを反映している。以上のように、アンケート調査によって得られた生活行動の実態から家庭エネルギー需要を推計することによって、家庭エネルギー需要のばらつきを現実的に即して再現することができた。

家庭のエネルギー需要は家族人数・家族構成ごとの生活行動の違いによって変化する。この違いが家庭用分散型エネルギー技術の運転性能に与える影響を評価するために、家庭用燃料電池システムに着目して燃料電池の最適運転モデルを開発した。新しく開発したモデルでは、「家庭のエネルギー需要は、日々の生活行動の違いによって不確実性を有している」という考えのもと、その時点から 24 時間後までの家庭エネルギー需要を予測して、家庭の電力・ガス料金の期待値が最小となるように家庭用燃料電池システムの運転を計画していく。先行研究のモデルによるシミュレーション結果との比較から、今回開発したモデルのアルゴリズムによって需要が不確実性を持つ場合でも効率的な燃料電池の運転が実現できることを示唆された。開発したモデルを用いて、推計した家庭エネルギー需要を入力値として燃料電池の運転をシミュレーションすることによって、様々な家族構成の家庭が家庭用燃料電池システムを導入した時の運転状況を再現し、そしてその時の経済性・環境性を評価した。評価の結果、家族構成の違いによって家庭用燃料電池システムの経済性・環境性は変化することを明らかにした。夫婦 2 人子供 2 人の 4 人世帯が家庭用燃料電池システムを導入した場合の電力・ガス料金の年間節約額は、子供が未就学児のとき 6.2 万円/年 (PEFC) / 7.2 万円/年 (SOFC)・小中学生のとき 7.2 万円/年 (PEFC) / 8.2 万円/年 (SOFC)・高大学生のとき 7.8 万円/年 (PEFC) / 8.7 万円/年 (SOFC)・社会人のとき 8.4 万円/年 (PEFC) / 9.1 万円/年 (SOFC) と、子供が成長するほど電力・ガス料金の節約効果が増していく。同様に年間 CO₂ 排出削減量は、子供が未就学児のとき 1.5 t-CO₂/年 (PEFC) / 1.9 t-CO₂/年 (SOFC)・小中学生のとき 1.6 t-CO₂/年 (PEFC) / 2.0 t-CO₂/年 (SOFC)・高大学生のとき 1.8 t-CO₂/年 (PEFC) / 2.1 t-CO₂/年 (SOFC)・社会人のとき 1.7 t-CO₂/年 (PEFC) / 2.1 t-CO₂/年 (SOFC) と、子供が成長するほど CO₂ 排出の削減効果が大きくなる傾向にある。このような家族構成の違いを考慮して、長期的なライフステージ進行の違いが長期的な導入効果に与える影響を評価したところ、燃料電池の導入から廃棄までの経済性・環境性に違いが生じることを定量的に示した。経済性の例として電力・ガス料金の節約によって燃料電池導入価格の投資回収ができる年数に着目すると、夫婦 2 人子供 2 人の 4 人世帯において子供が高校生で独立する場合と社会人で独立する場合とでは PEFC 導入の投資回収年数に 3 年の開きが生じ、SOFC については子供が社会人で独立する場合には 18 年目で投資回収できるが高校生で独立する場合には 20 年間以内での投資回収ができない。また環境性として 20 年間での CO₂ 排出削減量の合計に着目すると、子供が高校生で独立する場合の削減量が 36.0 t-CO₂、社会人で独立する場合の削減量が 39.7 t-CO₂ と、削減効果に 1 割程度の差が生じることを示した。以上の結果から、ライフステージの進行による長期的な生活リズムの変化が、家庭用燃料電池システムの運転性能に与える影響を明らかにすることができた。

省エネアドバイザーレポートに関する研究では、それぞれの家庭の生活行動パターン（普段の生活と多くの電力を使った日）とその生活での電力需要の関係性を明らかにするデータ分析手法を確立し、分析に基づく生活行動パターンと電力需要に関する情報提供が家庭の電力需要を削減する効果を持つことを示した。家庭用燃料電池システムに関する研究では、生活行動の実態をもとに家庭のエネルギー需要を推計するモデルを開発し、エネルギー需要の日々のばらつきやライフステージ進行による需要の変化を考慮して燃料電池の運転性能を評価した。

2つの研究に共通する結論は次の内容である。「家庭におけるエネルギー需要は生活行動のばらつき、すなわち日々の行動パターンの違いやライフステージ進行による生活リズムの変化に影響される。家庭の省エネルギー技術の効果も同様に、生活行動のばらつきによる影響を受ける。そこで、エネルギー需要の背景にある生活行動の違いを考慮し、家庭の省エネルギー技術の効果を示した。」ここで注意されたいのは、本研究の主張が「家庭の省エネルギー化のためには、このような生活行動をとらなければいけない」というような特定の生活行動のあり方を強制するものではないことである。省エネアドバイザーレポートでは日々の生活行動の振り返りによって電力需要の削減を促しているが、レポートによるアプローチはあくまで情報提供の範囲に留まっている。「生活行動の振り返りを実施するかどうか」「電力需要を削減するような生活行動変容をとるかかどうか」という判断は、情報の受け手の自由意志に委ねられている。また分散型エネルギー技術の評価についても、技術性能を高めるために特定の家族のあり方（家族人数・家族構成）を強いるよりも、それぞれの家庭が想定するライフステージ変化の中で技術性能を評価する方が、社会受容性は高いものと考えられる。このような点に注意したうえで、家庭の「生活行動」「エネルギー需要」「省エネルギー技術」の3つを内包する本研究の内容は日本の家庭部門における省エネルギー化のために有益な知見をもたらすと考える。

6.2 今後の課題

最後に、本研究をさらに発展させていくうえでの課題について述べる。個別の手法・モデルの課題については各章のまとめで述べてきたが、ここでは研究全体を視野に入れて本研究で開発したモデルや分析手法を統合させることによる発展性について議論したい。

まずは第2章の家庭電力需要データ分析と第4章の家庭エネルギー需要推計モデルの統合について述べる。電力需要データ分析では、クラスタ分析によるパターン分類に基づいて、各家庭における「普段の生活をした日」「普段の生活でなかった日」を与えた。しかし、これらの生活行動パターンはあくまでデータ分析によって類推したものであり、実際に各家庭がどのような生活行動をとっていたのかは不確定である。そこで、データ分析した家庭を対象に生活行動に関するアンケート調査を実施すれば、各家庭がどのような生活行動をとっていたかが分かり、そこから類推した生活行動パターンの妥当性を検証することができる。一方家庭エネルギー需要推計モデルでは、家族人数別の用途別エネルギー消費量が統計値と一致することを確認しているが、エネルギー需要カーブの妥当性については検討の余地がある。そこで、スマートメーターを設置した家庭のエネルギー需要データと個人属性を収集して、計測値をモデルの推計値と比較することで、モデルの妥当性を評価できる。このように、2つの手法・モデルを統合することで両者の妥当性を評価し、評価結果を手法・モデルの向上につなげることが期待される。

次に第3章の省エネアドバイスレポートと第4章の家庭エネルギー需要推計モデルの統合について述べる。省エネアドバイスレポートの感想から、電力需要全体ではなく電力需要の用途が分かる情報提供が求められていることが分かり、この情報提供を実現するためには電力需要を用途別に分類する手法を構築することが検討される。この電力需要の分類を行う際には、第4章の家庭エネルギー需要の推計モデルに基づく知見が有効である。このモデルでは家庭における生活行動の実態からエネルギー需要をボトムアップ型に推計しており、各時間帯に使用される家電製品の種類とその時生じる電力需要が明らかになっている。レポートを送付する家庭に対して同時に生活行動に関する調査を実施することで、用途別の電力需要を推計することができ、そこからより具体的な省エネアドバイスの提案が可能となる。

第5章の燃料電池の運転性能評価も同様に、第3章の省エネアドバイスレポートで具体的な省エネアドバイスを実施するのに役立つと考えられる。スマートメーターによって家庭の電力需要・給湯需要データが収集することができれば、そこから家庭用燃料電池システムを導入したときの経済性・環境性を評価することができる。さらに、その家庭の個人属性が分かればライフステージの進行を予測したうえで家庭用燃料電池システムが元をとれる年数を概算することが可能となる。このような情報を省エネアドバイスレポートによってフィードバックすれば、受け手が家庭用燃料電池システムの導入を検討する際の判断材料とすることができる。

最後に第2章の家庭電力需要データ分析と第5章の燃料電池の運転性能評価の統合について述べる。家庭用燃料電池システムの最適運転モデルでは、電力・給湯需要を予測する確率分布を時間帯ごとに独立して与えており、前の時間帯の需要に左右されない。これは運転計画を決定する際の期待値計算が計算量爆発を起こさないようにするための工夫であるが、この独立性の仮定を与えたとしても運転計画の決定にはかなりの計算時間を要してしまう。家庭電力需要データ分析によって各家庭の電力需要をパタ

ーン分類することができれば，このパターンに基づいてより少ない計算時間で効率的な運転計画を採用することが期待される。

以上，モデル・分析手法の統合による研究の発展性を図 6-1 に整理する．ここで挙げた課題に取り組んでいくことで，研究がさらに発展し省エネルギー社会の実現に貢献することが期待される。

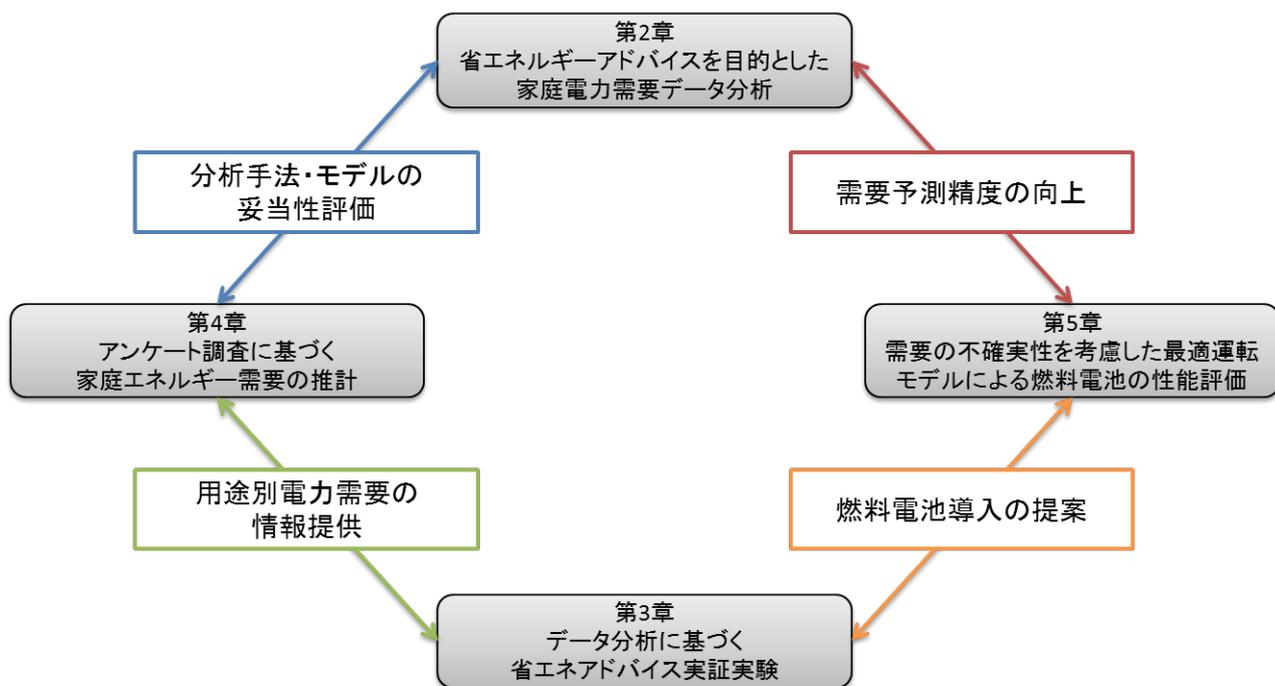


図 6-1 モデル・分析手法の統合による発展性の例

参考文献

- [1] 環境省；気候変動 2014 統合報告書 政策決定者向け要約,
http://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_syr_spmj.pdf, アクセス日：2016年1月4日.
- [2] 警察庁緊急災害警備本部；平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置,
<https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>, アクセス日：2016年1月4日.
- [3] 資源エネルギー庁；平成 22 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2011）,
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2011html/>, アクセス日：2016年1月4日.
- [4] 資源エネルギー庁；第 3 次エネルギー基本計画,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/100618honbun.pdf, アクセス日：
2016年1月4日.
- [5] 資源エネルギー庁；第 4 次エネルギー基本計画,
<http://www.meti.go.jp/press/2014/04/20140411001/20140411001-1.pdf>, アクセス日：2016年1月
4日.
- [6] 経済産業省；長期エネルギー需給見通し,
http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf, アクセス日：2016年1月
4日.
- [7] 資源エネルギー庁；平成 26 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2015）,
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/>, アクセス日：2016年1月4日.
- [8] 総務省統計局；日本の統計, <http://www.stat.go.jp/data/nihon/index1.htm>, アクセス日：2016年1
月4日.
- [9] 内閣府；消費動向調査, http://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/shouhi/menu_shouhi.html, アクセス日：
2016年1月4日.
- [10] 厚生労働省；平成 26 年 国民生活基礎調査 結果の概要,
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/k-tyosa14/dl/02.pdf>, アクセス日：2016年1月4
日.
- [11] 資源エネルギー庁；トップランナー対象機器の効率改善状況について 機器毎の効率改善状況一覧表,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/data/tr-kaizen.pdf, アクセス日：
2016年1月4日.
- [12] 経済産業省スマートメーター制度検討会；第 15 回検討会 資料 3 スマートメーターの導入促進に伴
う課題と対応について, http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004668/pdf/015_03_00.pdf,
アクセス日：2016年1月4日.
- [13] 日本電機工業会；分散型電源の構成, <https://jema-net.or.jp/Japanese/res/dispersed/kousei.html>,
アクセス日：2016年1月4日.
- [14] 資源エネルギー庁；総合資源エネルギー調査会 長期エネルギー需給見通し小委員会（第 6 回会合）
資料 1 分散型エネルギーについて,
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/006/pdf/006_05.pdf,
アクセス日：2016年1月4日.

- [15] 新エネルギー財団;新エネルギーとは, <http://www.nef.or.jp/what/whats00.html>, アクセス日:2016年1月4日.
- [16] 国家戦略室;コスト等検証委員会報告書 各電源の発電コスト (2004年試算/2010年・2030年モデルプラント),
http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20111221/hokoku_kosutohikaku.pdf, アクセス日:2016年1月4日.
- [17] 資源エネルギー庁燃料電池推進室;資料1 家庭用燃料電池について,
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/002_01_00.pdf, アクセス日:2016年1月4日.
- [18] ジャパンガスエナジー;業界情報 コージェネ財団、2014年度のエネファームメーカー販売台数を発表, <http://www.j-gasenergy.co.jp/professional/gyoukai/201506/index6.php>, アクセス日:2016年1月4日.
- [19] F. McLoughlin, A. Duffy, M. Conlon; Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study, *Energy and Buildings*, 48 (2012), 240-248.
- [20] A. Kavousian, R. Rajagopal, M. Fischer; Determinants of residential electricity consumption: Using smart meter data to examine the effect of climate, building characteristics, appliance stock, and occupants' behavior, *Energy*, 55 (2013), 184-194.
- [21] C. Beckel, L. Sadamori, T. Staake, S. Santini; Revealing household characteristics from smart meter data, *Energy*, 78 (2014), 397-410.
- [22] T. Räsänen, J. Ruuskanen, M. Kolehmainen; Reducing energy consumption by using self-organizing maps to create more personalized electricity use information, *Applied Energy*, 85(9) (2008), 830-840.
- [23] I.B. Sanchez, I.D. Espinos, L. Moreno Sarrion, A. Quijano López, I.N. Burgos; Clients segmentation according to their domestic energy consumption by the use of self-organizing maps, 6th International Conference on the European Energy Market (2009), 1-6.
- [24] J.D. Rhodes, W.J. Cole, C.R. Upshaw, T.F. Edgar, M.E. Webber; Clustering analysis of residential electricity demand profiles, *Applied Energy*, 135 (2014), 461-471.
- [25] F. McLoughlin, A. Duffy, M. Conlon; A clustering approach to domestic electricity load profile characterisation using smart metering data, *Applied Energy*, 141 (2015), 190-199.
- [26] J.M. Abreu, F.C. Pereira, P. Ferrão; Using pattern recognition to identify habitual behavior in residential electricity consumption, *Energy and Buildings*, 49 (2012), 479-487.
- [27] G. Chicco; Overview and performance assessment of the clustering methods for electrical load pattern grouping, *Energy*, 42 (2012), 68-80.
- [28] C. F. Walker, J. L. Pokoski; Residential Load Shape Modelling Based on Customer Behavior, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(7) (1985), 1703-1711.
- [29] A. Capasso, W. Grattieri, R. Lamedica, A. Prudenzi; A bottom-up approach to residential load modeling, *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2) (1994), 957-964.

- [30] Ian Richardson, Murray Thomson, David Infield and Conor Clifford; Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model, *Energy and Buildings*, 42(10) (2010), 1878-1887.
- [31] J. Widén, E. Wäckelgård; A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand, *Applied Energy*, 87(6) (2010), 1880-1892.
- [32] Y. Shimoda, T. Asahi, A. Taniguchi, M. Mizuno; Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model, *Energy*, 32(9) (2007), 1617-1633.
- [33] J. Tanimoto, A. Hagishima, H. Sagara; Validation of methodology for utility demand prediction considering actual variations in inhabitant behaviour schedules, *Journal of Building Performance Simulation*, 1(1) (2008), 31-42.
- [34] 小澤暁人, 吉田好邦; マルコフ連鎖を用いた生活行動再現による家庭エネルギー需要の推定, *環境情報科学学術研究論文集*, 27 (2013), 97-102.
- [35] 旭化成ホームズ 住生活総合研究所 共働き家族研究所; 家族の生活時間 そのバランスとリズム 調査報告書, <https://www.asahi-kasei.co.jp/hebel/dewks/090525.pdf>, アクセス日: 2016年1月4日.
- [36] NHK 放送文化研究所; データブック国民生活時間調査 2010, (2011), 640, NHK 出版.
- [37] 総務省統計局; 平成 23 年社会生活基本調査, <http://www.stat.go.jp/data/shakai/2011/>, アクセス日: 2016年2月9日.
- [38] ベネッセ教育総合研究所; 第 2 回 放課後の生活時間調査, <http://berd.benesse.jp/shotouchutou/research/detail1.php?id=4278>, アクセス日: 2016年2月9日.
- [39] 総務省情報通信政策研究所; 平成 26 年 情報通信メディアの利用時間と情報行動に関する調査報告書, http://www.soumu.go.jp/main_content/000357570.pdf, アクセス日: 2016年2月9日.
- [40] ビデオリサーチ; 視聴率がよくわかるブック TV RATING GUIDE BOOK, <https://www.videor.co.jp/rating/wh/rgb201502.pdf>, アクセス日: 2016年2月9日.
- [41] 向井登志広, 西尾健一郎, 小松秀徳, 内田鉄平, 石田恭子; 高圧一括受電マンションにおける電力ピーク抑制策の実証研究: 2013 年夏のピーク抑制・意識変容効果の検証, *エネルギー・資源*, 3(4) (2014), 7-17.
- [42] 向井登志広, 西尾健一郎, 小松秀徳, 内田鉄平, 石田恭子; 高圧一括受電マンションにおける電力ピーク抑制策の実証研究: 2013 年度冬の効果経時変化と要因検証, *エネルギー・資源*, 36(4) (2015), 1-11.
- [43] ジャパンスマートシティ; 「電気のかしこい使い方プログラム」 2 年目の需要抑制効果を確認, <http://jscp.nepc.or.jp/article/jscp/20140310/387279/index3.shtml>, アクセス日: 2016年1月4日.
- [44] ジャパンスマートシティ; 2 年間の大規模 DR 実証で需要抑制効果を確認, <http://jscp.nepc.or.jp/article/jscp/20150409/441869/index2.shtml>, アクセス日: 2016年1月4日.
- [45] 小松秀徳, 西尾健一郎, 向井登志広, 篠原靖志; 電力消費量データを活用した省エネルギーアドバイスレポートの自動生成システム, *電気学会論文誌 C 編*, 134(9) (2014), 1394-1405.
- [46] 三菱重工; けいはんなエコシティ次世代エネルギー・社会システム実証プロジェクト 大規模電力デマンドレスポンス「電気のかしこい使い方プログラム」の取組概要,

<http://www.nedo.go.jp/content/100564102.pdf>, アクセス日: 2016年1月4日.

- [47] 伊東弘一, 横山良平, 松本芳一, 赤木新介; ガスタービン・コージェネレーション・システムの設計計画法: 第1報, ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式の最適運用計画モデル, 日本機械学会論文集 C 編, 54(499) (1988), 773-780.
- [48] A. Ozawa, Y. Yoshida; Economic and environmental effects of installing distributed energy resources into a household, *Low Carbon Economy*, 6(2) (2015), 41-50.
- [49] 小原伸哉, 工藤一彦; 遺伝的アルゴリズムによる燃料電池およびヒートポンプ複合システムの多目的運用計画, *空気調和・衛生工学会論文集*, 91 (2003), 65-75.
- [50] 岩田寛哲, 森俊介; 電力託送と熱併給を含む分散型エネルギーシステムの分析とモデル化, *電気学会論文誌 B 編*, 114(4) (1994), 381-388.
- [51] 林宏興, 吉田好邦, 松橋隆治, 小澤暁人; 家庭における燃料電池と太陽光発電導入時の最適な制度に関する研究, *環境情報科学 学術研究論文集*, 26 (2012), 273-278.
- [52] 倉石英明, 林武人, 藤井康正, 山地憲治, 横山明彦; 確率動的計画法を用いた家庭用 CGS の最適運用, *電気学会研究会資料 PE*, 86 (2004), 51-56.
- [53] 田中洋一, 福島雅夫; 確率計画法によるコージェネレーションシステムの運用最適化, *電気学会論文誌 B 編*, 129(6) (2009), 765-775.
- [54] 小澤暁人; 家庭用エネルギー機器の導入による経済性・環境性評価と再生可能エネルギーの変動抑制手法の提案, 東京大学大学院新領域創成科学研究科 2012 年度修士論文, (2013).
- [55] 総務省統計局; 平成 22 年国勢調査, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/>, アクセス日: 2016年1月4日.
- [56] C. M. Bishop; *Pattern Recognition and Machine Learning*, (2007), 738, Springer.
- [57] 気象庁; 東京 平年値 (年・月ごとの値) 主な要素,
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_sfc_ym.php?prec_no=44&block_no=47662&year=&month=&day=&view=, アクセス日: 2016年1月4日.
- [58] 竹林の事前分布; クラスタリング手法紹介シリーズ 2 ~k-means~,
<http://fistofmath.sakura.ne.jp/%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%AA%E3%83%B3%E3%82%B0%E6%89%8B%E6%B3%95%E7%B4%B9%E4%BB%8B%E3%82%B7%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%82%BA2%E3%80%80k-means/>, アクセス日: 2016年1月4日.
- [59] 竹林の事前分布; クラスタリング手法紹介シリーズ 4 ~fuzzy c-means~,
<http://fistofmath.sakura.ne.jp/%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%AA%E3%83%B3%E3%82%B0%E6%89%8B%E6%B3%95%E7%B4%B9%E4%BB%8B%E3%82%B7%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%82%BA4%E3%80%80fuzzy-c-means/>, アクセス日: 2016年1月4日.
- [60] M. R. Anderberg; *Cluster analysis for applications*, (1973), 359, Academic Press.
- [61] D.L. Davies, D.W. Bouldin; A cluster Separation measure, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-1(2)* (1979), 224-227.
- [62] 古里亮太, 小澤暁人, 吉田好邦; 生活行動変容を介した一般家庭の省エネルギー促進策の実証, 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, 32 (2016), 印刷中.

- [63] 西尾健一郎, 向井登志広; その効果は正しいか? - 省エネルギー・節電・デマンドレスポンス実証の実験計画と効果検証のあり方 - (BECC JAPAN 2015 発表資料),
<http://seeb.jp/wp-content/uploads/2015/10/2015BECC-4B1Nishio.pdf>, アクセス日: 2016年1月4日.
- [64] マイボイス; 家計簿に関するアンケート調査,
http://myel.myvoice.jp/products/detail.php?product_id=20609, アクセス日: 2016年1月4日.
- [65] 箕谷千風彦; 計量経済学大全, (2007), 981, 東洋経済新報社.
- [66] 高橋青天, 北岡孝義; Eviewsによるデータ分析入門, (2013), 246, 東京図書.
- [67] 気象庁; 過去の気象データ・ダウンロード, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>,
アクセス日: 2016年1月4日.
- [68] W. P. Schultz, J. M. Nolan, R. B. Cialdini, N. J. Goldstein, V. Griskevicius; The Constructive, Destructive, and Reconstructive Power of Social Norms, *Psychological Science*, 18 (2007), 429-434.
- [69] 大久保暢俊; 環境配慮行動のコントロール感と平均以上効果, 「エコ・フィロソフィ」研究, 7 (2003), 51-70.
- [70] 小澤暁人, 吉田好邦; アンケート調査に基づく家庭エネルギー需要モデル, *エネルギー・資源*, 36(5) (2015), 12-23.
- [71] 厚生労働省; 平成 25 年 国民生活基礎調査 結果の概要,
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/k-tyosa13/dl/01.pdf>, アクセス日: 2016年1月4日.
- [72] 総務省統計局; 平成 25 年住宅・土地統計調査, <http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/>, アクセス日: 2016年1月4日.
- [73] 山口容平, 佐藤大樹, 田中マルコス, 下田吉之; 家庭における世帯構成員生活時間行動モデルの開発, *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*, 28 (2012), 361-364.
- [74] 空気調和・衛生工学会 住宅設備委員会住宅のエネルギーシミュレーション小委員会; 住宅における生活スケジュールとエネルギー消費, *空気調和・衛生工学会シンポジウム*, (2000).
- [75] 資源エネルギー庁省エネルギー対策課; 平成 22 年度省エネルギー政策分析調査事業「家庭におけるエネルギー消費実態について」(調査概要),
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/more/pdf/h22_bunsekityosa.pdf, アクセス日: 2016年1月4日.
- [76] 厚生労働省; 平成 21 年 国民生活基礎調査 結果の概要,
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-tyosa/k-tyosa09/index.html>, アクセス日: 2016年1月4日.
- [77] 東京都水道局; 暮らしと水道 水の上質な使い方,
<https://www.waterworks.metro.tokyo.jp/kurashi/shiyou/jouzu.html>, アクセス日: 2016年1月4日.
- [78] 服部公裕; 家庭用エネルギー機器の費用最小化運転モデルによる CO₂ 排出量削減ポテンシャルに関する研究, 東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士論文, (2011).

- [79] 建築環境・省エネルギー機構；住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説，http://ees.ibec.or.jp/documents/img/kaisetsu200903_all_ver2.pdf，アクセス日：2016年1月4日。
- [80] 建築環境・省エネルギー機構；The BEST Program，<http://www.ibec.or.jp/best/index.html>，アクセス日：2016年1月4日。
- [81] 空気調和・衛生工学会；試して学ぶ熱負荷 HASPEE ～新最大熱負荷計算法～ サポートページ，<http://www.shasej.org/iinkai/haspee/index.html>，アクセス日：2016年1月4日。
- [82] 建築環境ソリューションズ；温熱環境シミュレーションプログラム AE-Sim/Heat，<http://www.ae-sol.co.jp/aesol02.html>，アクセス日：2016年1月4日。
- [83] JIS C 9612，(2013)。
- [84] 宇田川光弘；標準問題の提案 住宅用標準問題，日本建築学会環境工学委員会熱分科会 第15回熱シンポジウム，(1985)，23-33。
- [85] 野池政宏；省エネ・エコ住宅設計究極マニュアル 増補改訂版，(2014)，280，エクスナレッジ。
- [86] 三菱総合研究所環境・エネルギー研究本部；平成24年度エネルギー消費状況調査（民生部門エネルギー消費実態調査）報告書，http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E003078.pdf，アクセス日：2016年1月4日。
- [87] 宮森剛；住宅・建築物の省エネルギー施策について，http://www.jst.go.jp/lcs/result/ws20140224/pdf/20140224shiryo_miyamori.pdf，アクセス日：2016年1月4日。
- [88] 齊藤周；消費者選好を考慮した民生家庭部門におけるエネルギー需要予測と省エネ政策の評価，東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士論文，(2006)。
- [89] 日本電機工業会；各種燃料電池の原理と特徴，http://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/fuel/images/syurui_01.pdf，アクセス日：2016年1月4日。
- [90] 東京ガス；ガス料金メニュー《エネファームで発電エコぷらん》，<http://home.tokyo-gas.co.jp/ryokin/enefarm/index.html>，アクセス日：2016年1月4日。
- [91] 省エネルギーセンター；家庭の省エネ百貨，http://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/shiene/data/20141201katei_shoenehyakka.pdf，アクセス日：2016年1月4日。
- [92] 日本ガス協会；電気の使用に係るCO₂排出係数を考える CO₂削減対策の評価に用いる電気のCO₂排出係数について<2010年施行温対法対応版>，http://www.gas.or.jp/kankyo/co2taisaku_20130221.pdf，アクセス日：2016年1月4日。
- [93] 東京ガス；プレスリリース 家庭用燃料電池「エネファーム」の戸建向け新製品発売について ～よりお求めやすい価格を実現し、バリエーションを充実～，<http://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20150204-01.html>，アクセス日：2016年1月4日。
- [94] 大阪ガス；プレスリリース 家庭用燃料電池エネファーム type S (SOFC) の新製品発売について，http://www.osakagas.co.jp/company/press/pr_2014/1209206_10899.html，アクセス日：2016年1月4日。
- [95] 全国家庭電気製品公正取引協議会 製造業部会 表示委員会・広告委員会，「電力料金の目安単価」の

改定に関する件, https://www.eftc.or.jp/qa/qa_pdf.pdf, アクセス日 : 2016 年 1 月 4 日.

[96] 鍋島一郎 ; 動的計画法, (1968), 145, 森北出版.

[97] 退職給付会計情報ポータル ; 国債利回り情報 20 年国債平均利回り,

<http://www.e-pbo.jp/bond/bond20.html>, アクセス日 : 2016 年 1 月 4 日.

[98] 燃料電池普及促進協会 ; 平成 26 年度民生用燃料電池導入支援事業 補助金制度のご案内,

<http://www.fca-enefarm.org/subsidy26/subsidy.html>, アクセス日 : 2016 年 1 月 4 日.

[99] 東京都環境公社 ; 家庭用蓄電池、燃料電池 (エネファーム) 等に対する補助金,

<http://www.tokyo-co2down.jp/subsidy/hems/>, アクセス日 : 2016 年 1 月 4 日.

謝辞

本研究を遂行し博士論文を執筆するにあたっては、多くの方々からのご指導・ご協力を頂きました。論文の締めくくりとして、ここに謝辞を述べたいと思います。

指導教員である吉田好邦教授には深く感謝しております。修士・博士課程をあわせて5年間にわたって、研究テーマの取りまとめから論文執筆に至るまで、熱心に指導していただきました。また吉田研究室に在籍している間に、多くの共同研究や研究発表を経験する機会を持たせていただいたことで、環境・エネルギーに関する広い見識と豊かな交流の機会を得ることができました。

新領域創成科学研究科環境システム学専攻の大島義人教授、田崎智宏客員教授、井原智彦准教授、および同研究科人間環境学専攻の坂東茂客員准教授には、ご多忙のなか審査委員をお引受けいただきました。先生方には時間を割いて論文を精読していただき、また研究を前進させる上での貴重なご意見を頂きましたこと、大変感謝申し上げます。

本研究を行うにあたっては、学外の多くの方々にもご協力いただきました。

共同研究先である株式会社ミサワホーム総合研究所には、研究のために家庭電力需要データを提供していただきました。同研究所環境エネルギー研究室の飯島雅人様と太田勇様には、電力需要データの分析について実用面から貴重なご意見を頂くとともに、省エネアドバイスレポートの実証実験においても協力世帯募集にご尽力いただきました。また、省エネアドバイスレポートをお送りした家庭の皆さまには、アンケートへの回答やアドバイスの実践など実証実験へのご協力をしていただきました。

一般社団法人日本ガス協会の皆様には、家庭エネルギー需要推計モデルと家庭用燃料電池システムの運転性能評価について貴重なご意見を頂きました。本研究に対して業界人の視点でのご意見を頂いたことで、より実用性の高い研究に仕上げることができました。また、需要推計モデルの開発にあたっては、多くの皆さまに家庭における生活行動や家電製品・給湯の使用状況に関するアンケート調査にご協力いただきました。

本研究の一部は、「東京大学新領域創成科学研究科環境システム学専攻博士課程学生研究奨励金」によるものです。

吉田研究室・井原研究室に在籍された方々にも非常にお世話になりました。皆さんと一緒に研究室の一員として公私共に有意義な大学院生活を送れたことを嬉しく思います。

最後に、私生活の面から私を支えてくれた身内に感謝いたします。

小澤 暁人

A 付録

(ア) 高速離散フーリエ変換による 1 週間の家庭電力需要カーブの周波数解析

私たち人間の生活が 1 日 24 時間を 1 周期とするサイクルであるため、生活行動に伴って発生する家庭の電力需要カーブにも、一定の周期性が存在する。そのため、「電力カーブの周期性の特徴が家庭の生活行動の特徴を反映する」との仮説を置けば、電力需要カーブの代表的な周期を特徴量とすることで、それぞれの家庭における生活行動の大まかなリズムを類推することができる。そこで、この仮説を検証するために、高速フーリエ変換によって各家庭の 1 週間の電力需要カーブの周波数解析をおこなった。周波数解析によって求められた代表周期を特徴量として家庭を分類し、需要カーブの形状や 1 日電力需要量を比較した。

高速フーリエ変換とは、式 A-1 に示す離散フーリエ変換を応用して、アルゴリズム処理によって計算時間を短縮したものである。ここで、 $F(t)$ は周波数 $t/(NT)$ の周波数成分に対応するスペクトル、 $f(n)$ は離散データの値、 N は等間隔データの個数、 T はデータの計測時間間隔とする。

$$F(t) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-i\frac{2\pi tn}{N}} \quad (t = 0, 1, \dots, N-1) \quad \text{式 A-1}$$

高速フーリエ変換では短い計算時間で周波数解析が可能となる代わりに、データ個数 N が 2 の累乗でなければならないという制約が加わる。そこで、この分析では $N = 2^{10} = 1024$ [個]とした。また消費電力データの計測時間間隔 $T = 10$ [分]とすると、周波数解析を行う期間は $NT/1440 = 7.11$ [日]とほぼ 1 週間に相当する。また、このときスペクトル $F(t)$ に対応する周期は $NT/60t = 512/3t$ [時間]となる。

分析する 1 週間電力需要カーブは土曜日 0 時 00 分を起点として翌週の土曜日 2 時 10 分までの 1024 個の消費電力データを 1 セットとし、2013 年 10 月第 1 週 (2013 年 10 月 5 日 0:00~10 月 12 日 2:10) から 2014 年 9 月第 4 週 (2014 年 9 月 20 日 0:00~9 月 27 日 2:10) の電力需要カーブの周波数解析をおこなった。そして周波数解析の結果、スペクトルが最大となる周期をその家庭における 1 週間電力需要カーブの代表周期として、代表周期を特徴量として家庭を分類する。周波数解析の例を図 A-1 に示す。赤線で示す世帯 A の 1 週間の電力需要カーブをフーリエ変換したところ、スペクトルが最大となる周期は $512/3 \cdot 14 = 12.19$ [時間]となった。ここから世帯 A の代表周期は「12 時間周期」となる。一方で、青線で示す世帯 B の 1 週間の電力需要カーブをフーリエ変換したところ、スペクトルが最大となる周期は $512/3 \cdot 7 = 24.38$ [時間]となった。ここから世帯 B の代表周期は「24 時間周期」となる。

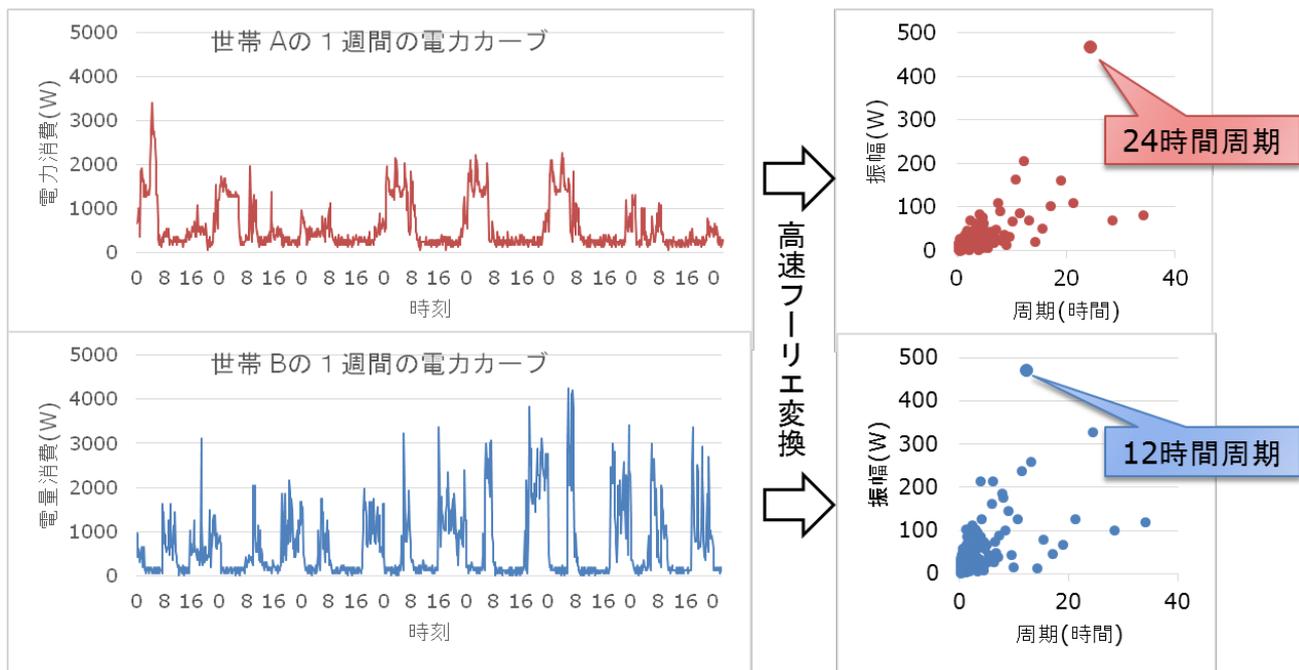


図 A-1 周波数解析の例

フーリエ変換による周波数解析の結果を説明する。それぞれの週における代表周期の世帯数を図 A-2 に示す。12 時間周期・24 時間周期のいずれかを代表周期とする家庭は全体の約 80%を占めている。季節別に見ると、秋・冬・春（2013 年 10 月～2014 年 6 月）にかけては 12 時間周期を代表周期とする家庭の割合が多く、夏（2014 年 7 月～9 月）には 24 時間周期を代表周期とする家庭の割合が多い。

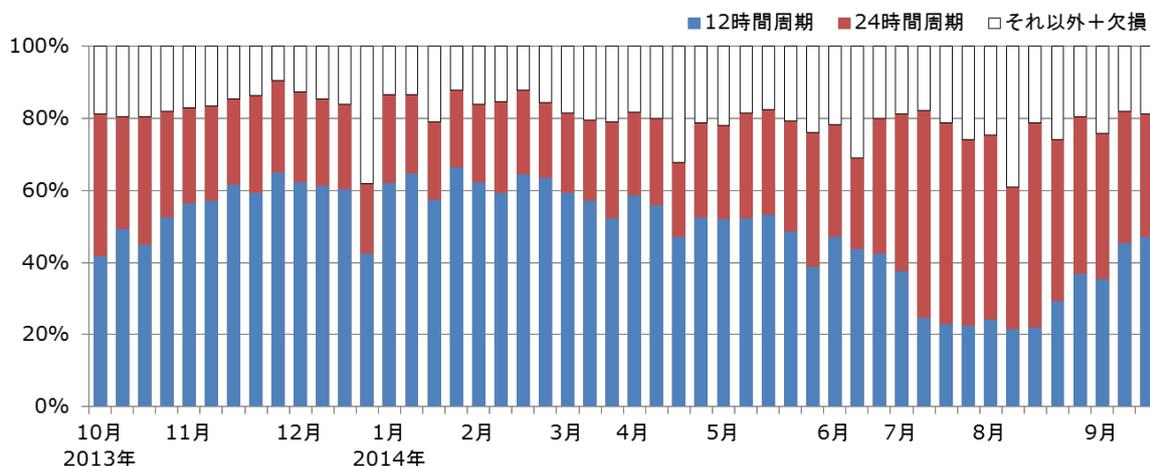


図 A-2 代表周期別の世帯数（2013 年 10 月第 1 週～2014 年 9 月第 4 週）

異なる代表周期における電力需要カーブの形状の違いを確認する。12 時間周期と 24 時間周期の場合での平均電力需要カーブを図 A-3 に示す。12 時間周期では、電力ピークは 1 日に 2 回（朝 7 時前後と夜 20 時前後）訪れる。ピーク時の消費電力はいずれも等しく 800W 程度である。24 時間周期のときは朝 7 時前後の電力ピークが 700W 程度に留まる。一方で夜 20 時から 24 時にかけて幅の広いピークが発生し、

消費電力も 850W 程度と大きい。以上の点から、12 時間周期の場合は朝の電力ピークが大きいことから「朝型生活」の傾向、24 時間周期の場合は夜の電力ピークが持続することから「夜型生活」の傾向があるというように、生活リズムの特徴が読み取れる。

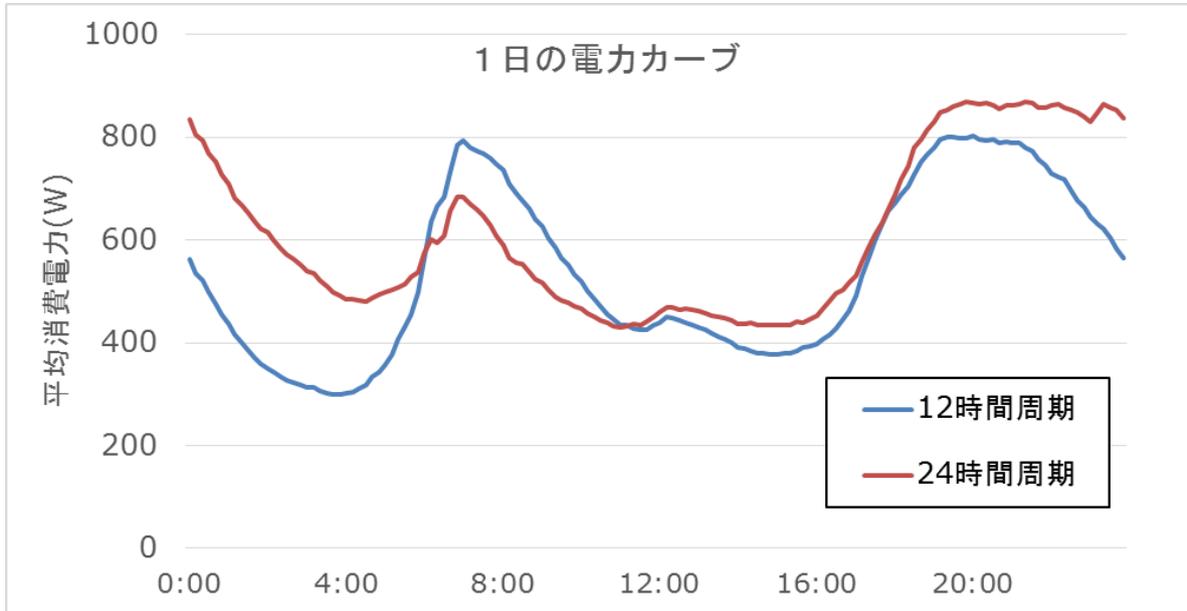


図 A-3 代表周期別の電力需要カーブ

つづいて、異なる代表周期における消費電力量の違いを確認する。12 時間周期と 24 時間周期の場合での 1 日電力需要量の比較を表 A-1・表 A-2 に示す。春・夏・秋（2013 年 10 月・11 月，2014 年 3 月～9 月）にかけての週では 24 時間周期を代表する家庭の 1 日電力需要量の方が 12 時間周期を代表周期とする家庭よりも大きくなる傾向にある。一方で、冬（2013 年 12 月～2014 年 2 月）には、大小関係が逆転して、12 時間周期を代表する家庭の 1 日電力需要量の方が 24 時間周期を代表周期とする家庭よりも大きくなる傾向にある。

以上の結果から、12 時間周期の「朝型生活」傾向の家庭は、24 時間周期の「夜型生活」傾向の家庭と比べて、春・夏・秋の 1 日電力需要量が少なく、冬の 1 日電力需要量が多いという関係が明らかになる。このような関係が導かれる理由として、基本的に朝型生活をとる方が照明による電力需要を削減することができるため 1 日電力需要量が少なくなり、一方で冬において朝型生活をとると早朝の冷え込みによって暖房需要が増加し 1 日電力需要量が多くなっているものと考えられる。

表 A-1 代表周期別の 1 日電力需要量 (2013 年 10 月第 1 週～2014 年 3 月第 5 週)

週		世帯数		平均使用電力 (kWh/日)		差の有意性(両側) **:5%,*:10%	
番号	開始日	24H	12H	24H	12H	p値	
1	2013/10/5	289	306	10.8	9.6	0%	**
2	2013/10/12	227	362	10.1	9.4	1%	**
3	2013/10/19	261	329	10.9	10.1	0%	**
4	2013/10/26	215	386	10.3	10.1	26%	
5	2013/11/2	194	414	10.7	10.3	17%	
6	2013/11/9	192	419	12.0	12.6	7%	(*)
7	2013/11/16	174	452	12.6	12.6	49%	
8	2013/11/23	197	435	13.7	13.2	19%	
9	2013/11/30	186	476	14.1	13.8	26%	
10	2013/12/7	183	456	14.5	15.4	5%	(*)
11	2013/12/14	176	449	16.1	17.2	5%	(**)
12	2013/12/21	172	442	16.4	17.3	8%	(*)
13	2013/12/28	143	311	16.9	18.0	9%	(*)
14	2014/1/4	180	455	16.4	18.0	1%	(**)
15	2014/1/11	160	475	17.5	19.0	3%	(**)
16	2014/1/18	158	421	17.1	17.5	31%	
17	2014/1/25	157	487	16.1	16.3	37%	
18	2014/2/1	157	457	16.3	17.7	2%	(**)
19	2014/2/8	185	435	19.2	20.3	8%	(*)
20	2014/2/15	170	473	18.5	18.5	49%	
21	2014/2/22	152	466	15.8	15.4	28%	
22	2014/3/1	62	166	15.8	17.2	8%	(*)
23	2014/3/8	0	0	-	-	-	
24	2014/3/15	161	435	13.9	13.5	24%	
25	2014/3/22	162	420	12.7	11.9	4%	**
26	2014/3/29	194	384	11.1	10.7	16%	

表 A-2 代表周期別の 1 日電力需要量 (2013 年 4 月第 1 週～2014 年 9 月第 4 週)

週		世帯数		平均使用電力 (kWh/日)		差の有意性(両側) **:5%,*:10%	
番号	開始日	24H	12H	24H	12H	p値	
27	2014/4/5	168	430	12.0	11.7	24%	
28	2014/4/12	174	411	10.7	10.6	37%	
29	2014/4/19	150	346	10.7	10.8	36%	
30	2014/4/26	191	385	10.2	9.6	3%	**
31	2014/5/3	191	381	9.6	9.3	24%	
32	2014/5/10	212	384	9.5	9.2	16%	
33	2014/5/17	213	390	9.7	9.2	5%	*
34	2014/5/24	224	356	9.7	9.2	4%	**
35	2014/5/31	274	284	10.2	9.4	1%	**
36	2014/6/7	0	0	-	-	-	
37	2014/6/14	228	345	10.2	9.2	0%	**
38	2014/6/21	186	320	10.4	9.3	0%	**
39	2014/6/28	275	311	10.7	9.7	0%	**
40	2014/7/5	318	276	11.7	11.0	3%	**
41	2014/7/12	422	180	12.5	11.6	1%	**
42	2014/7/19	408	168	13.2	11.8	0%	**
43	2014/7/26	379	164	13.7	12.8	3%	**
44	2014/8/2	374	178	14.1	13.6	17%	
45	2014/8/9	289	157	12.6	11.5	1%	**
46	2014/8/16	415	161	13.9	13.4	15%	
47	2014/8/23	328	214	11.9	10.9	0%	**
48	2014/8/30	319	271	11.1	10.1	0%	**
49	2014/9/6	297	259	11.0	10.0	0%	**
50	2014/9/13	267	333	10.0	9.2	0%	**
51	2014/9/20	249	345	10.0	9.4	2%	**

(イ) 省エネアドバイザーレポートに関するアンケート

アンケートはご記入後、返信用封筒にて返送をお願いいたします

アンケートにご協力頂きまして誠に有難うございます。調査結果は学術目的のみで利用し、調査によって得た個人情報厳重に管理し、一定の期間を経て破棄されます。また個別の回答を開示することは一切ありません。何卒ご協力のほど、よろしくお願い致します。

住まいの省エネアドバイザーレポートを読んだ日： 月 日
アンケートに記入した日： 月 日

1. 住まいの省エネアドバイザーレポートについて、あてはまるものをチェックしてください。

参考になった あまり参考にならなかった 興味がない わからない

2. 「他世帯との比較」の内容について、どの程度ご自分で気づいていましたか？

十分気づいていた なんとなく気づいていた 余り気づいてなかった 全然気づいてなかった

3. 「1日の電気の使い方」の内容について、どの程度ご自分で気づいていましたか？

十分気づいていた なんとなく気づいていた 余り気づいてなかった 全然気づいてなかった

4. 「1日の電気の使い方」の省エネアドバイザーについて、当てはまるものにチェックしてください。

アドバイスにしたがって行動した アドバイスを実施していないが今後実施する予定
アドバイスを実施してなくて今後も実施しない わからない

5. 住まいの省エネアドバイザーレポートについての感想をご記入ください。(改善した方がよい点や、こんな情報がほしい点などを自由に記してください)

6. 今回のような省エネアドバイザーレポートを定期的に送付する無料のサービスがあれば、希望しますか？

希望する 希望しない

希望する にチェックされた方にお尋ねします。レポートの送付方法としてあなたにとって最もよいものにチェックしてください。

郵送で 電子メールで enecocoで
その他 ()

7. あなたの性別をチェックして年齢をお答えください。 男性 女性 () 歳

8. 同居している家族構成についてあてはまるものにチェックしてください。

単身世帯 夫婦2人世帯 親と子(2世帯) 祖父母と親と子(3世代)
その他 ()

裏面に
続きます



図 A-4 省エネアドバイザーレポートに関するアンケート紙面(表面)

(ウ) アンケート調査による時間帯別の在室・行動割合

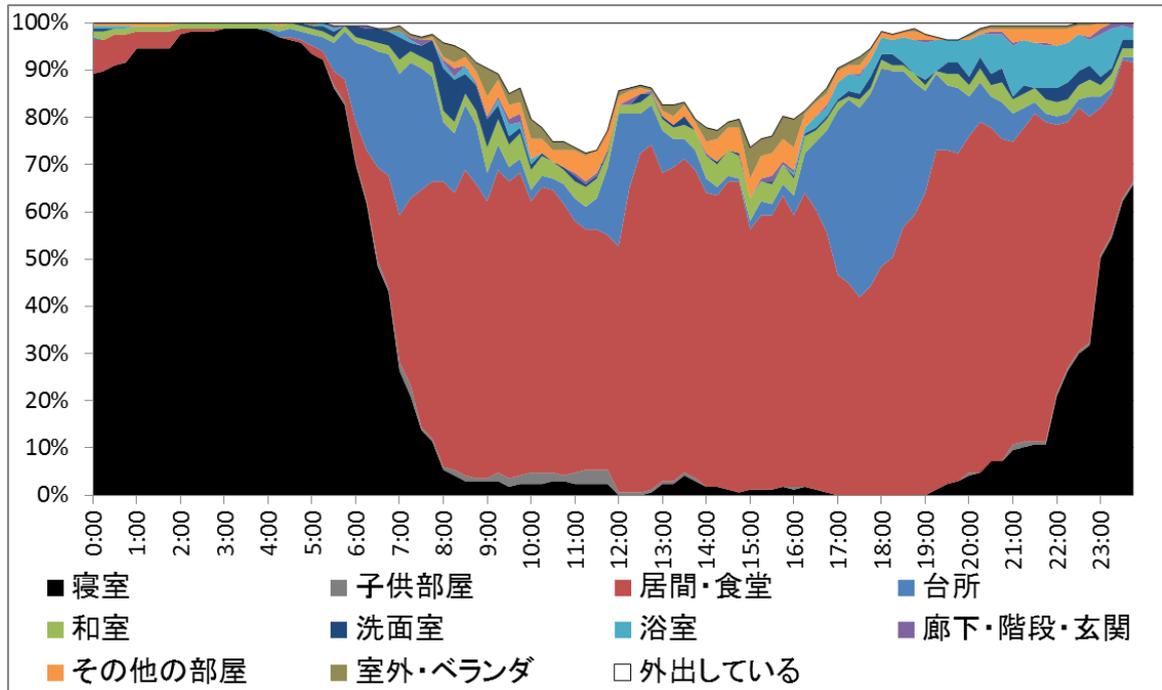


図 A-6 時間帯別の在室割合 (主婦・冬・平日)

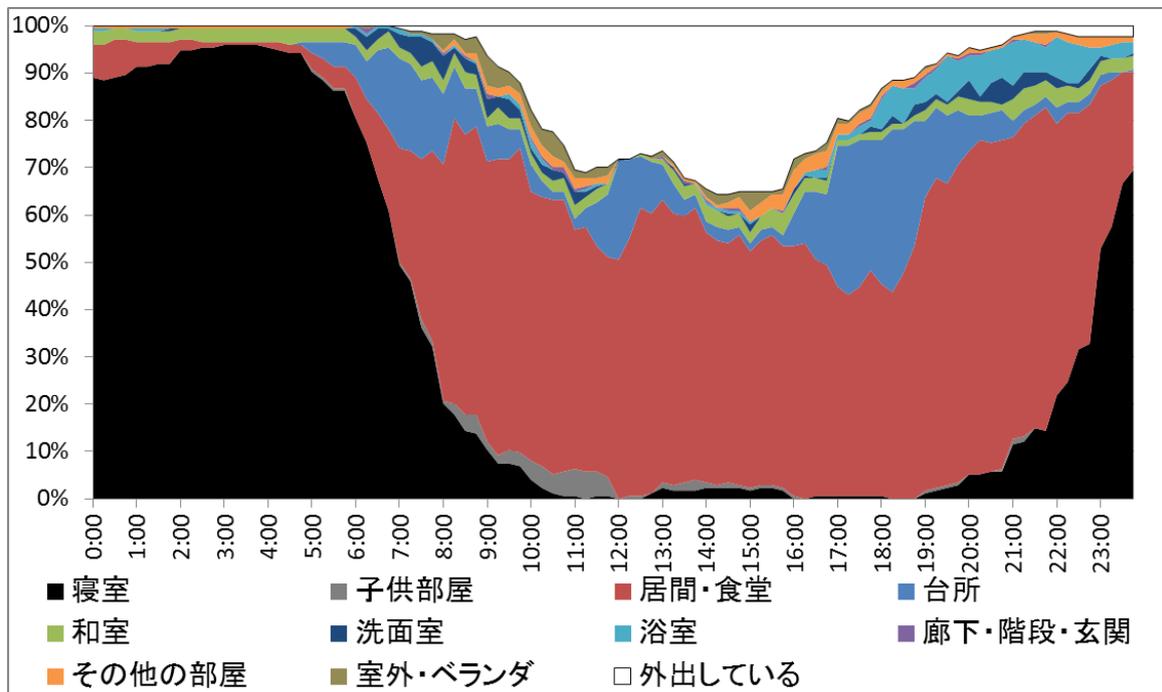


図 A-7 時間帯別の在室割合 (主婦・冬・休日)

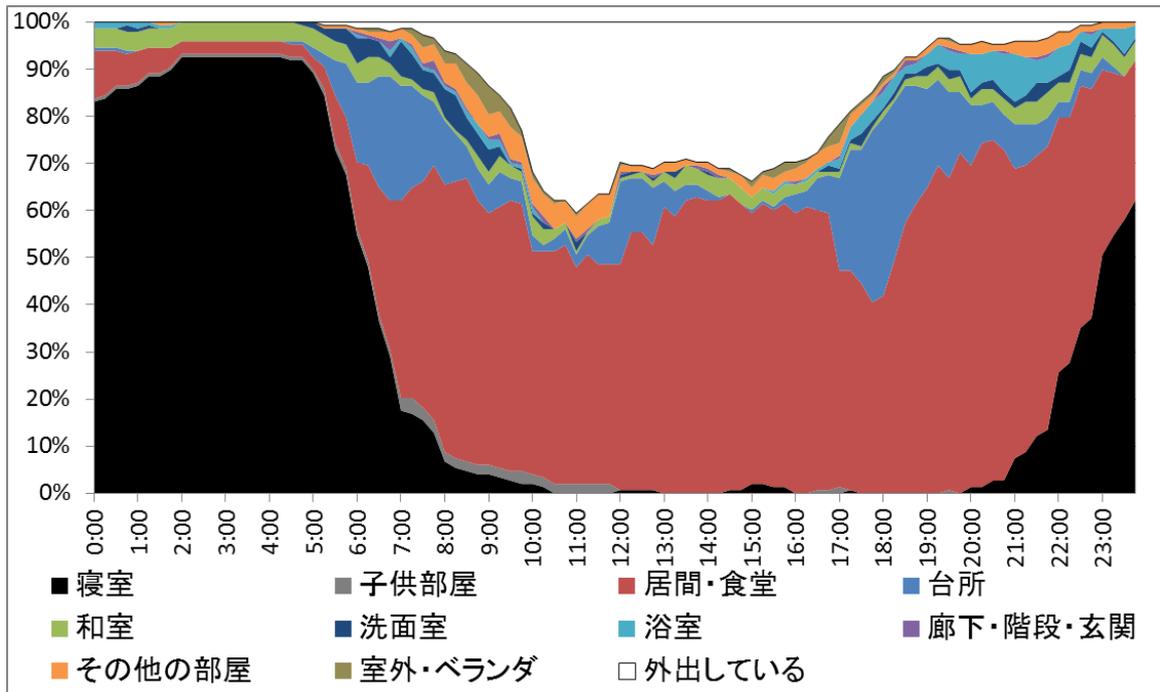


図 A-8 時間帯別の在室割合（主婦・夏・平日）

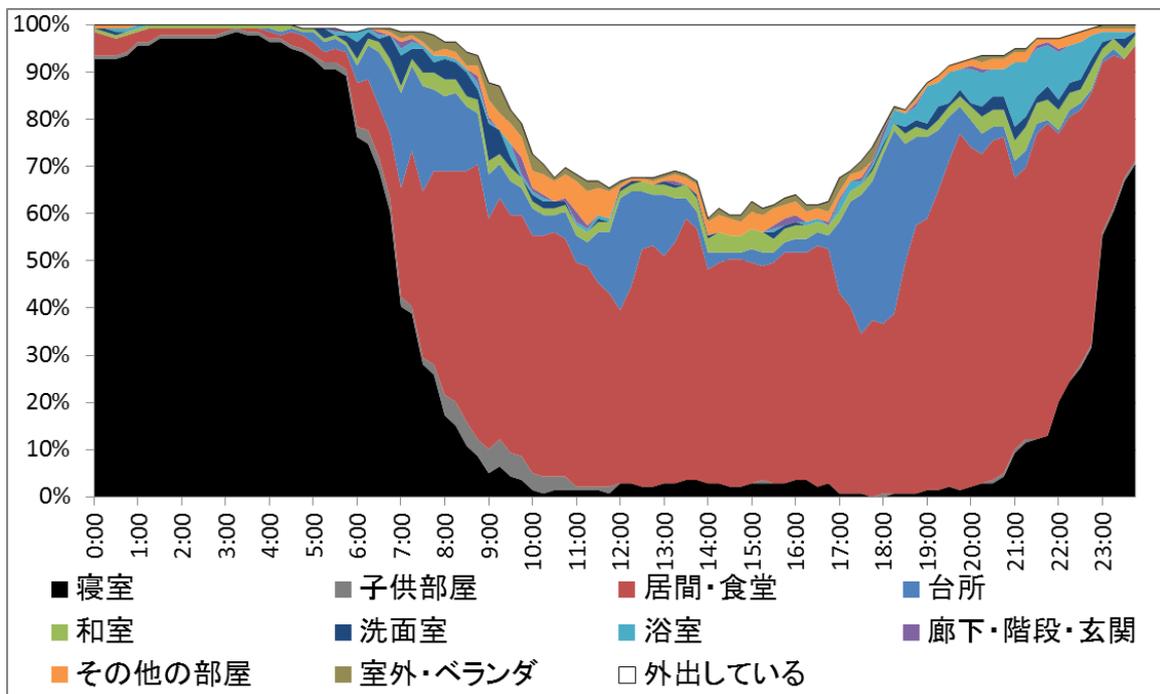


図 A-9 時間帯別の在室割合（主婦・夏・休日）

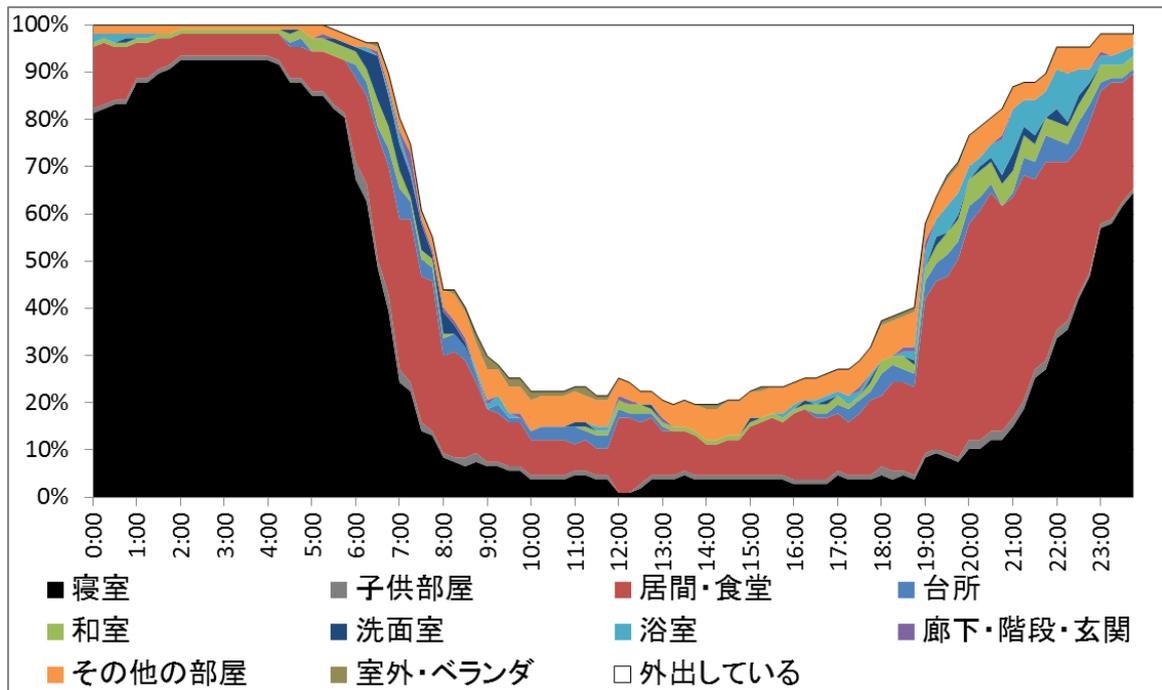


図 A-10 時間帯別の在室割合 (男性・冬・平日)

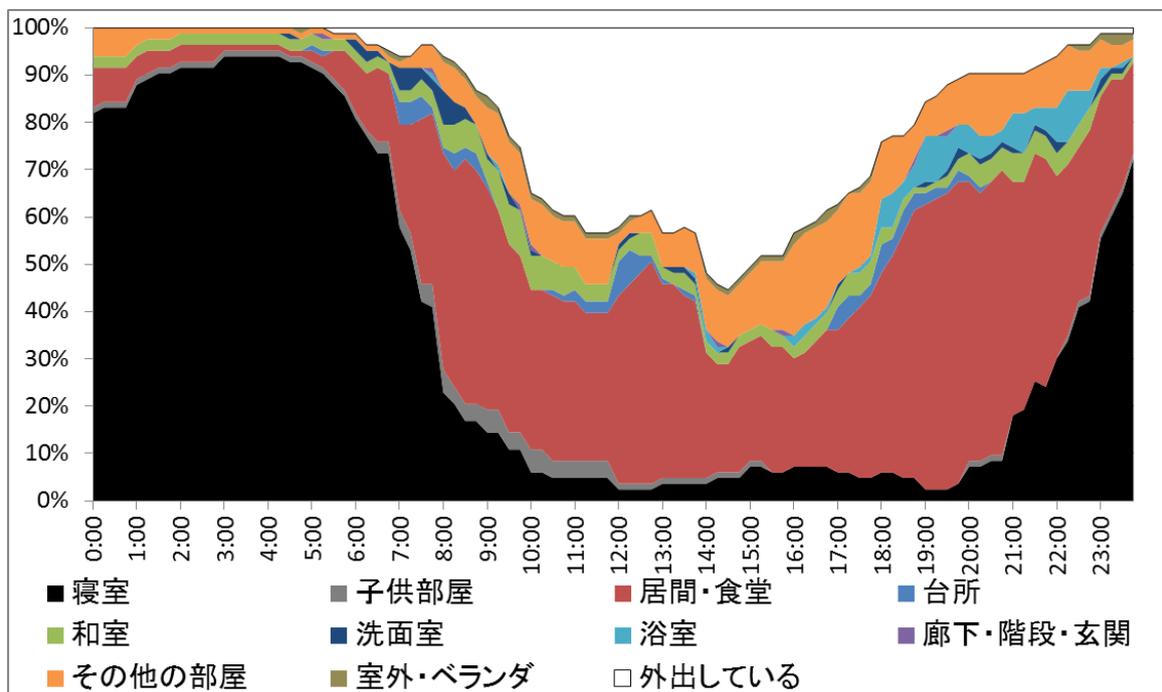


図 A-11 時間帯別の在室割合 (男性・冬・休日)

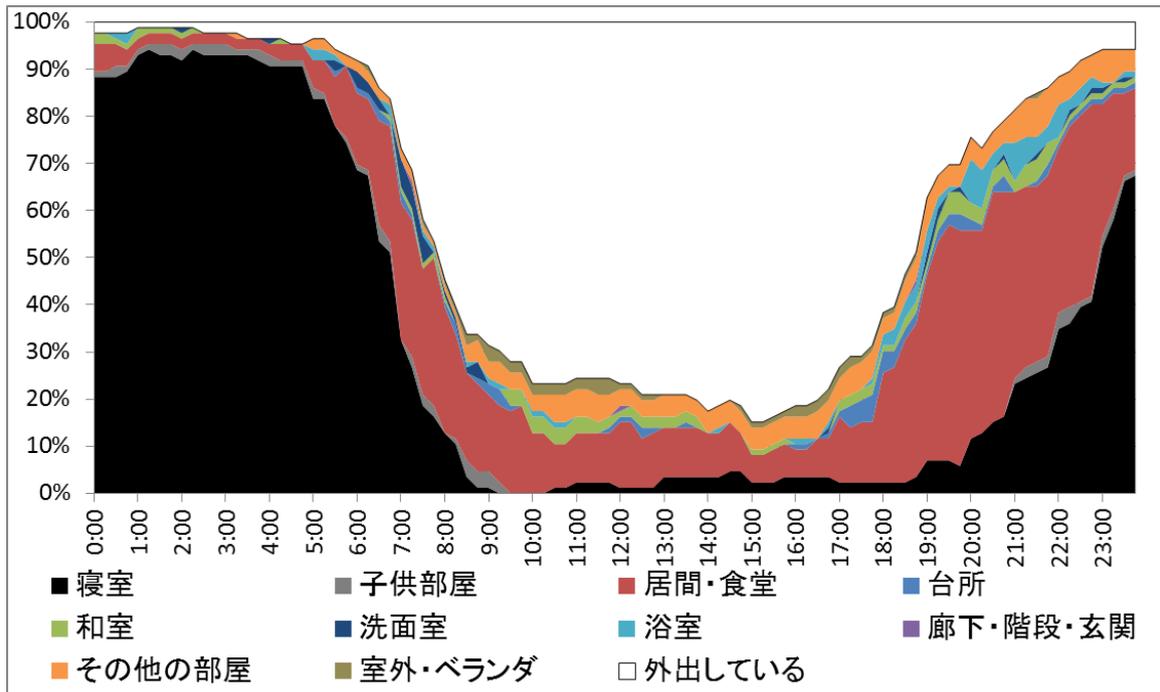


図 A-12 時間帯別の在室割合 (男性・夏・平日)

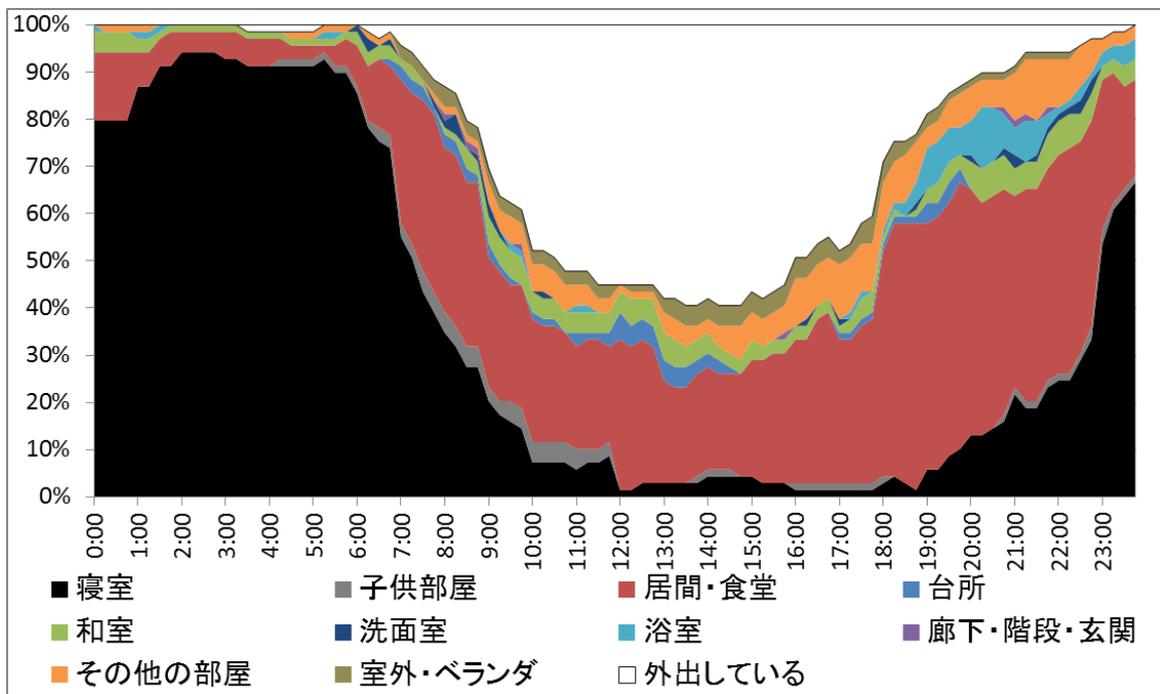


図 A-13 時間帯別の在室割合 (男性・夏・休日)

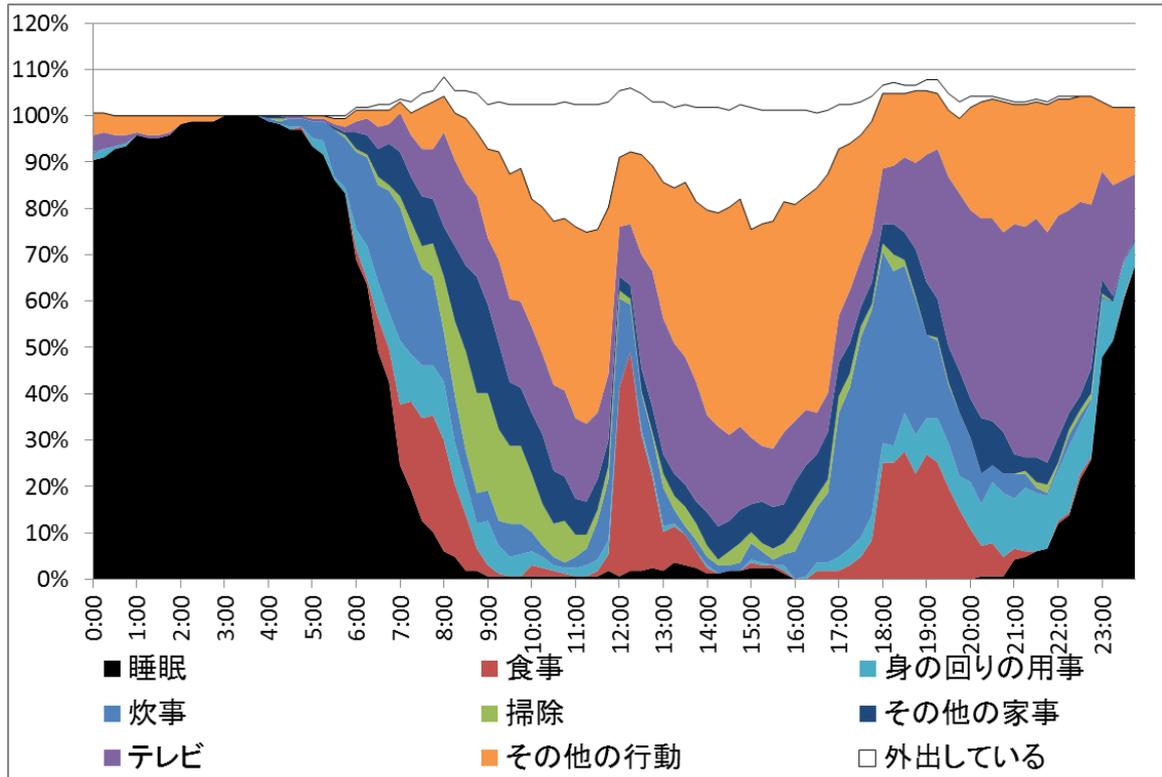


図 A-14 時間帯別の行動割合（主婦・冬・平日）

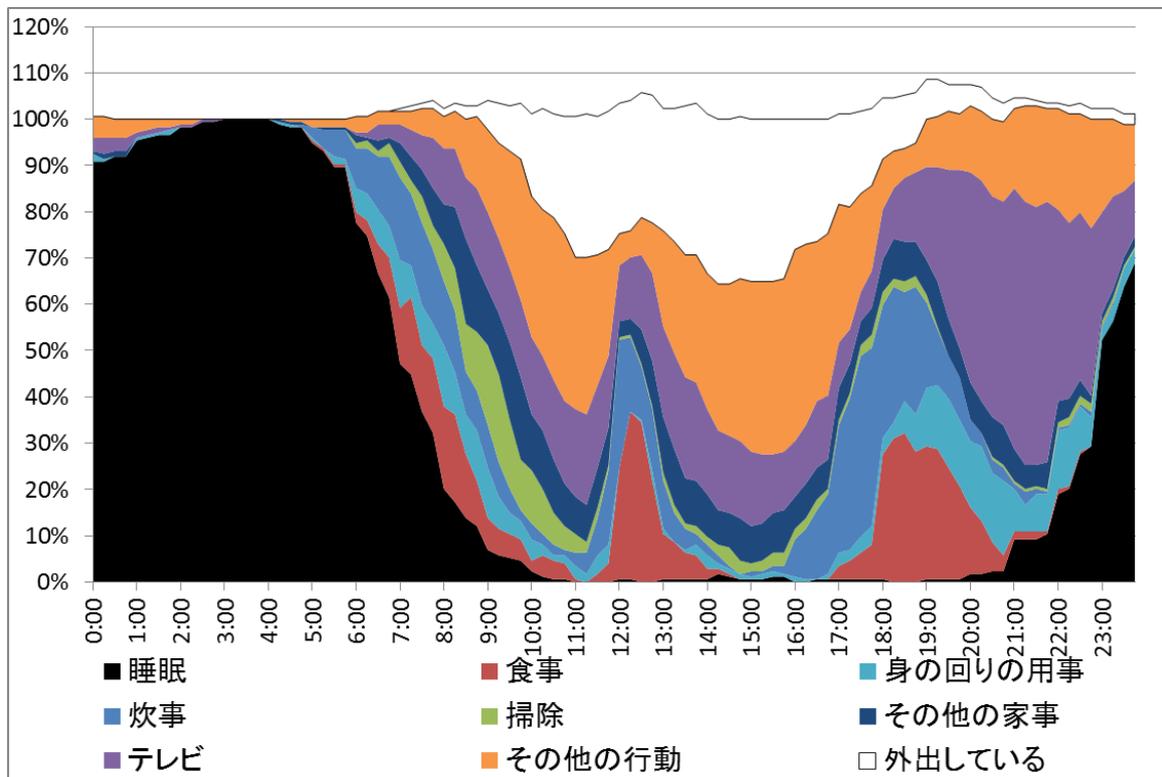


図 A-15 時間帯別の行動割合（主婦・冬・休日）

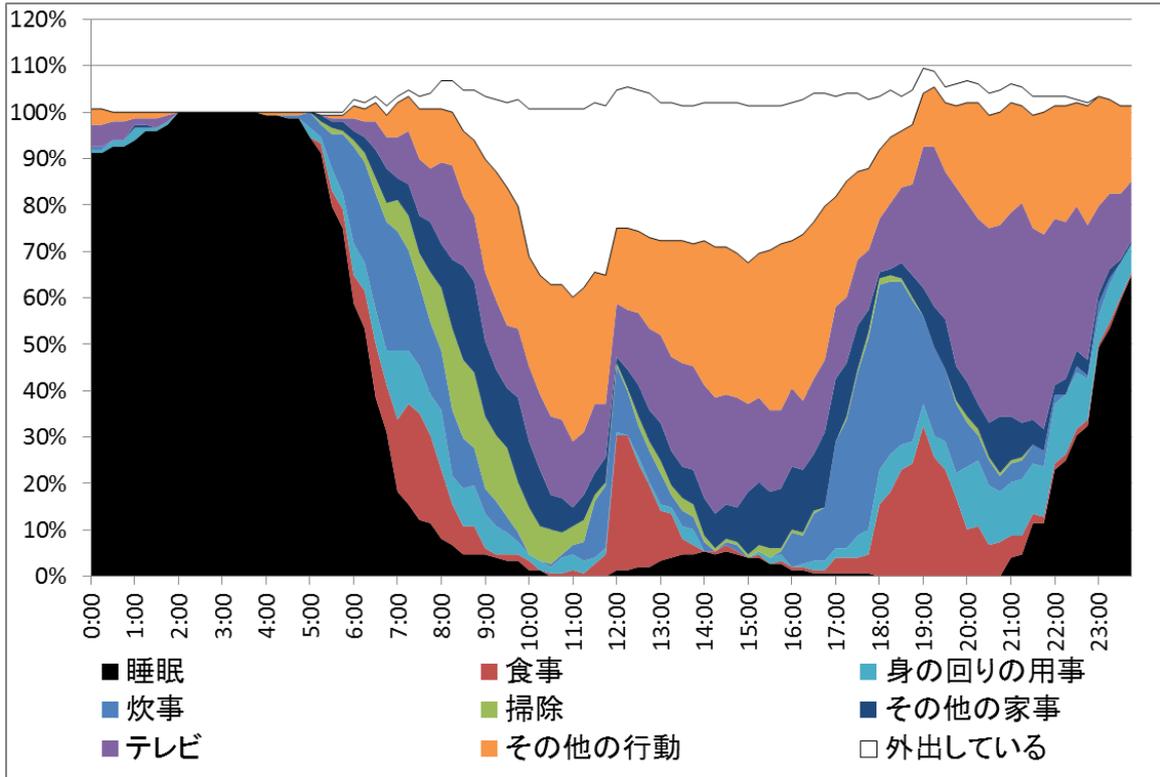


図 A-16 時間帯別の行動割合（主婦・夏・平日）

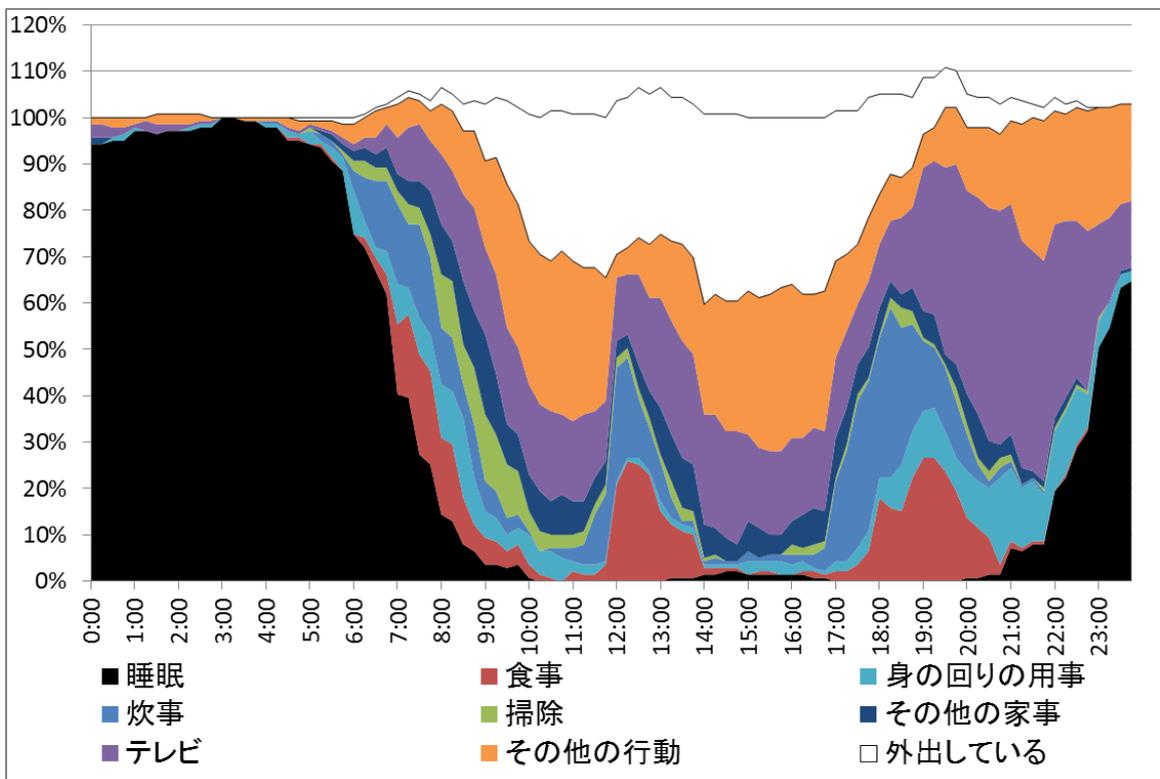


図 A-17 時間帯別の行動割合（主婦・夏・休日）

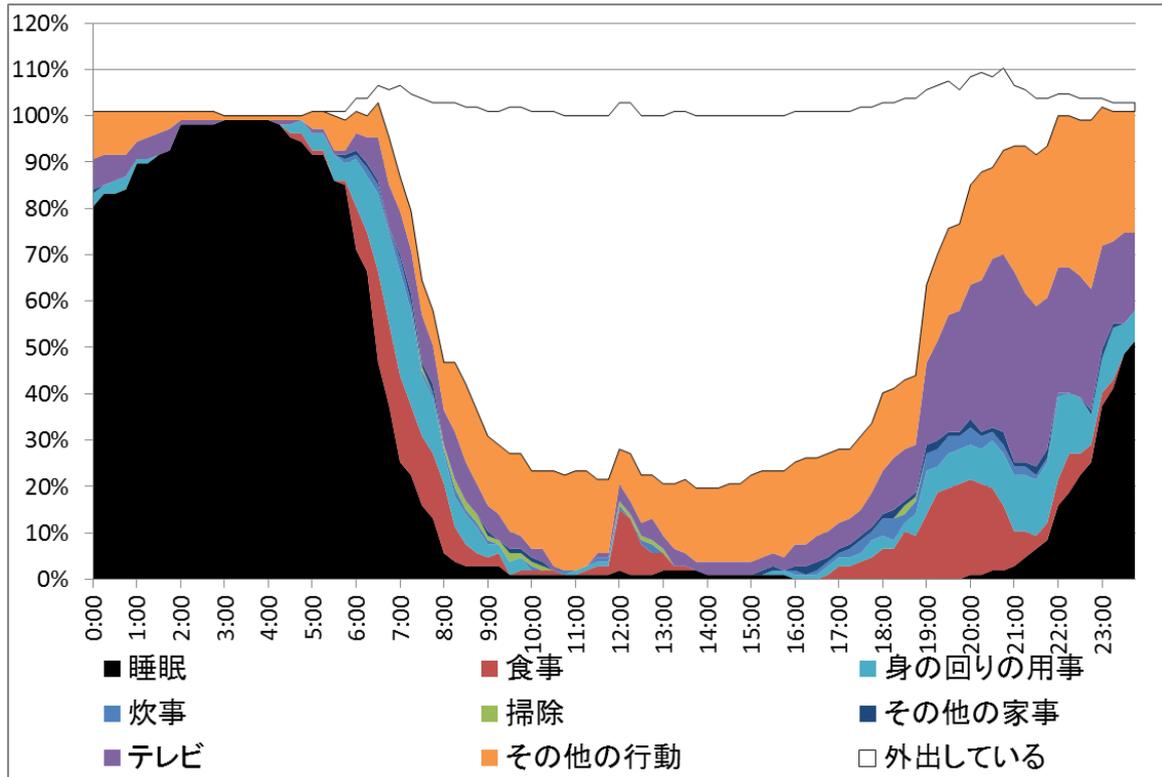


図 A-18 時間帯別の行動割合 (男性・冬・平日)

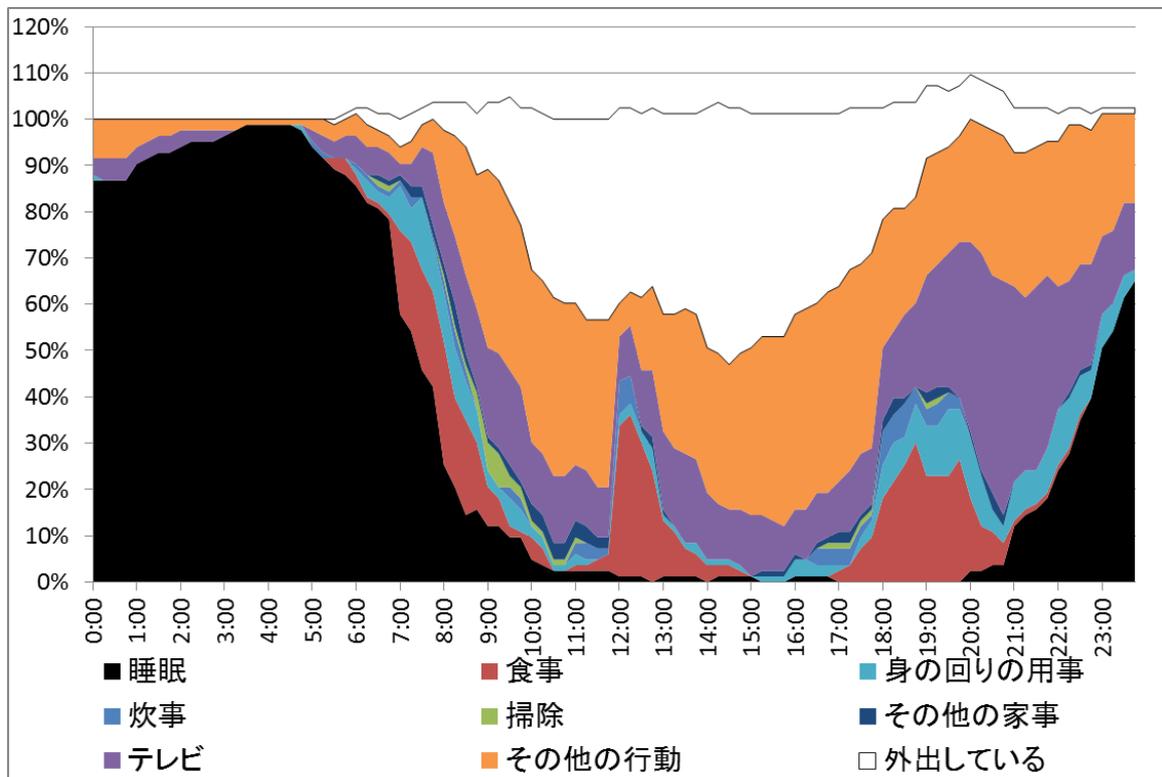


図 A-19 時間帯別の行動割合 (男性・冬・休日)

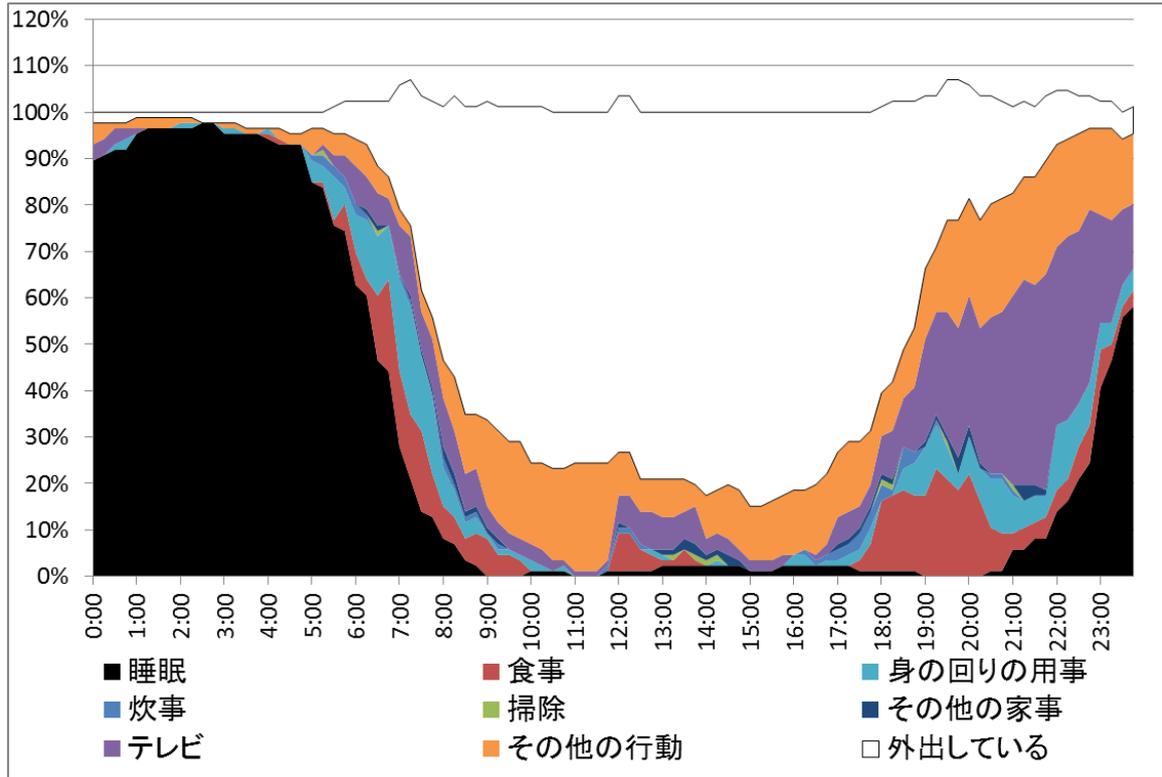


図 A-20 時間帯別の行動割合（男性・夏・平日）

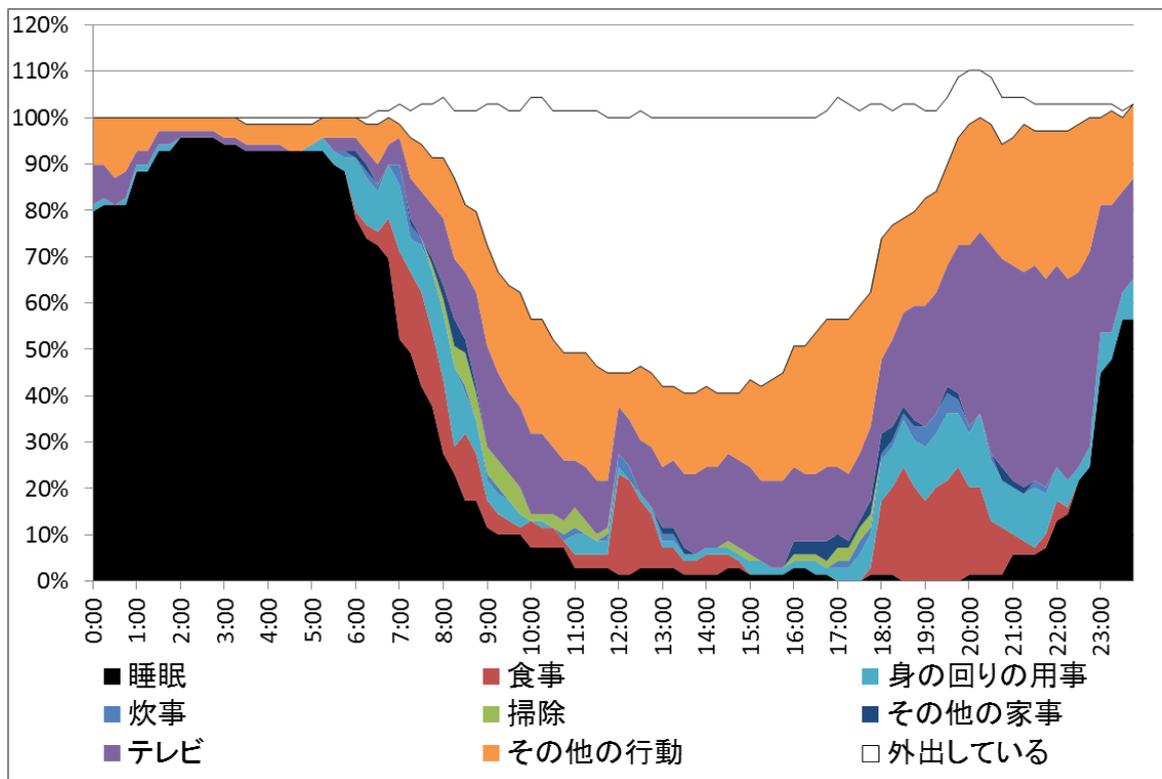


図 A-21 時間帯別の行動割合（男性・夏・休日）

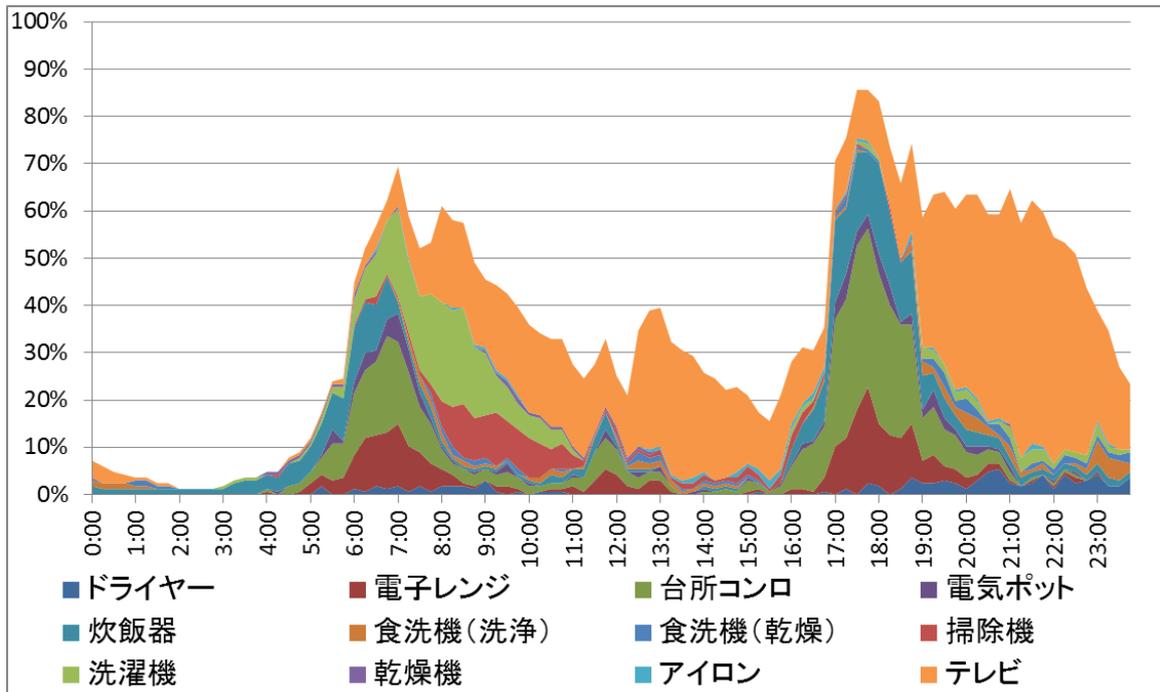


図 A-22 時間帯別の家電製品使用割合（主婦・冬・平日）

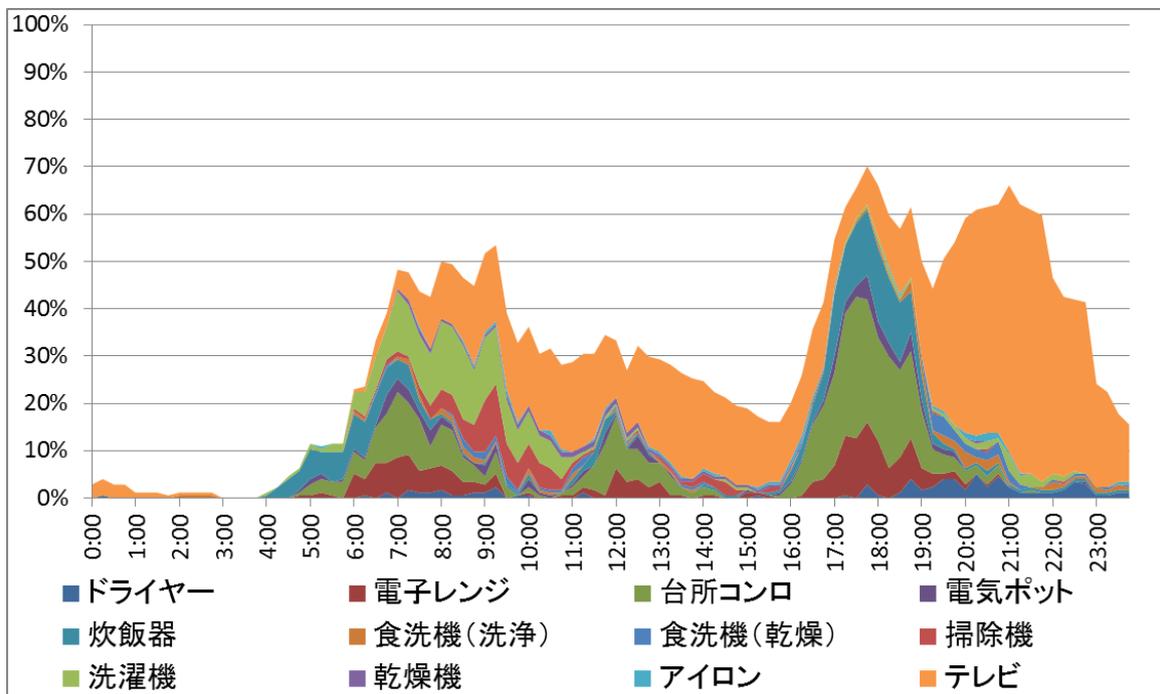


図 A-23 時間帯別の家電製品使用割合（主婦・冬・休日）

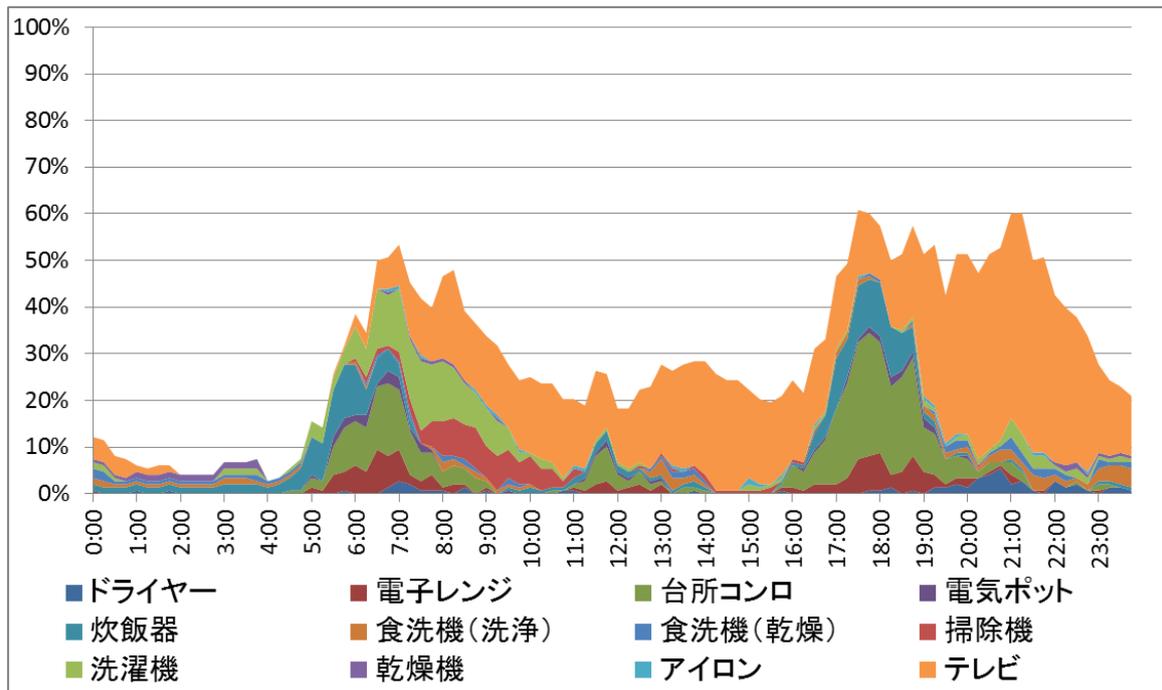


図 A-24 時間帯別の家電製品使用割合（主婦・夏・平日）

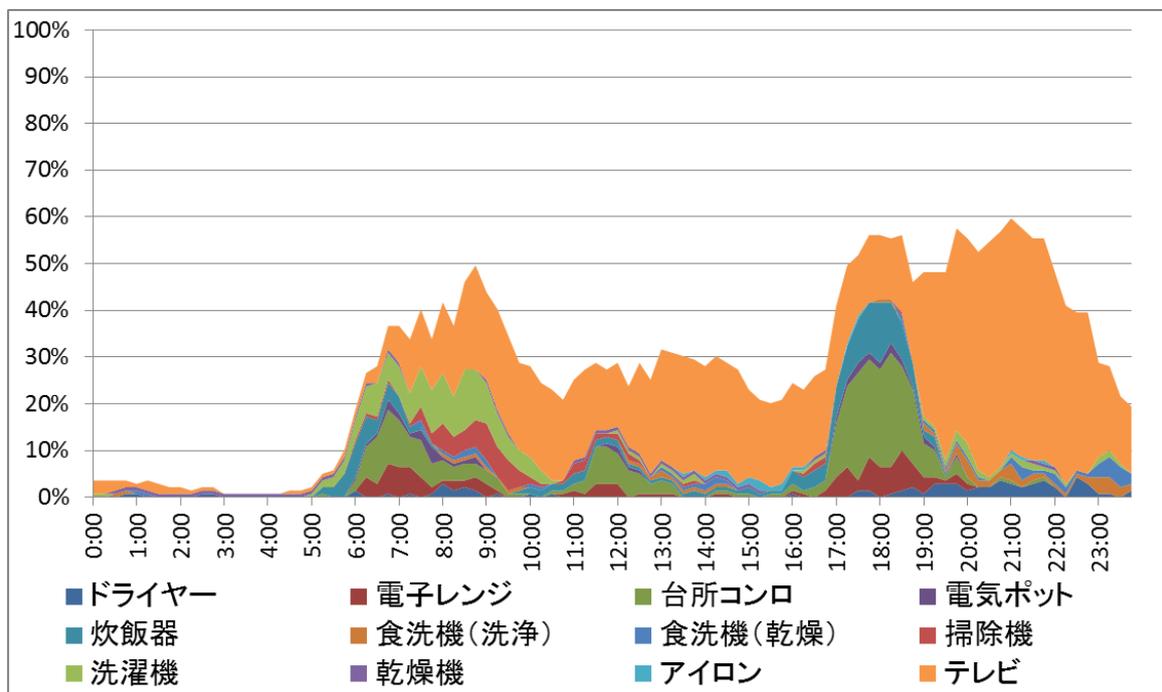


図 A-25 時間帯別の家電製品使用割合（主婦・夏・休日）

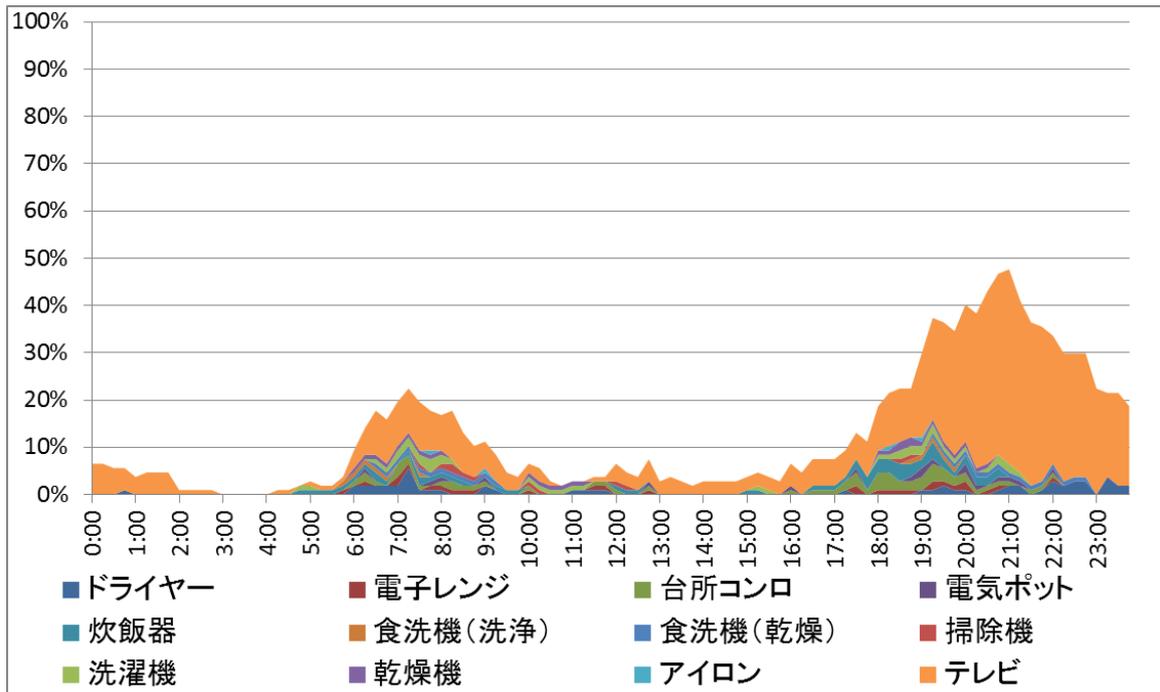


図 A-26 時間帯別の家電製品使用割合 (男性・冬・平日)

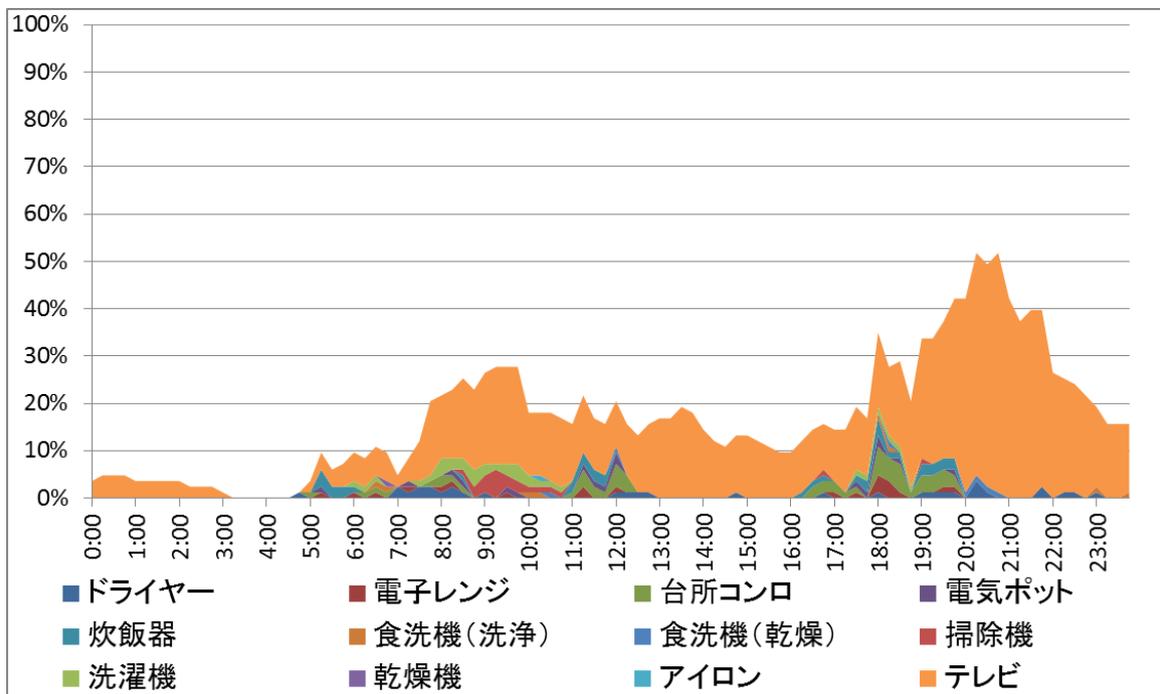


図 A-27 時間帯別の家電製品使用割合 (男性・冬・休日)

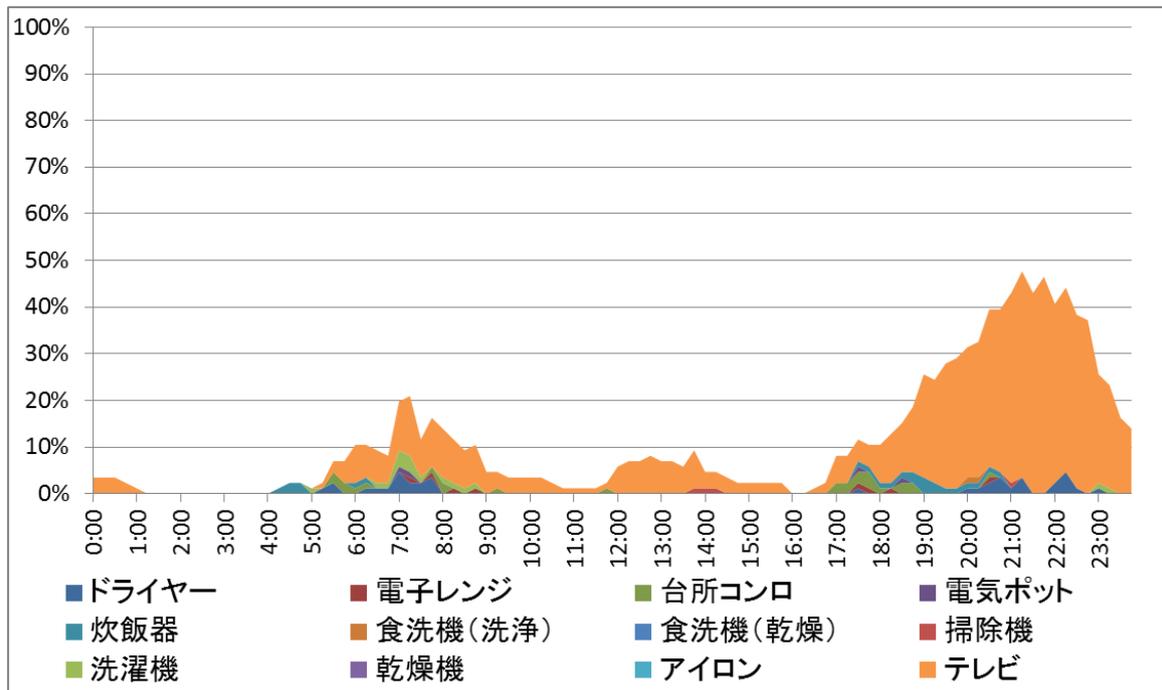


図 A-28 時間帯別の家電製品使用割合（男性・夏・平日）

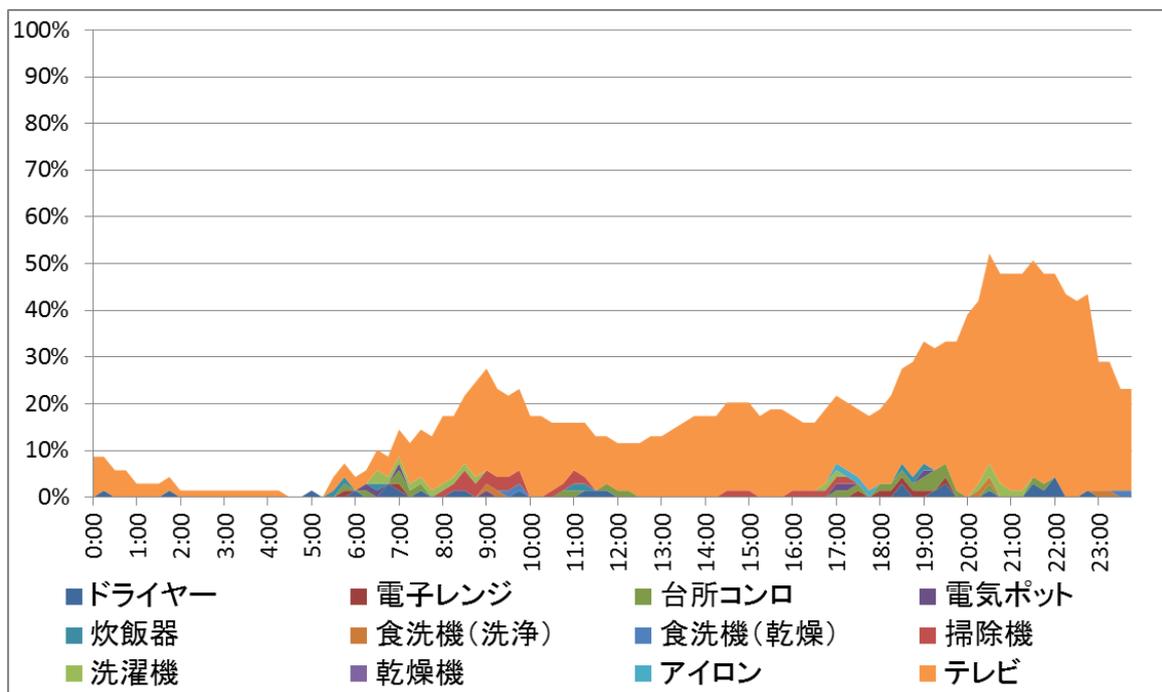


図 A-29 時間帯別の家電製品使用割合（男性・夏・休日）

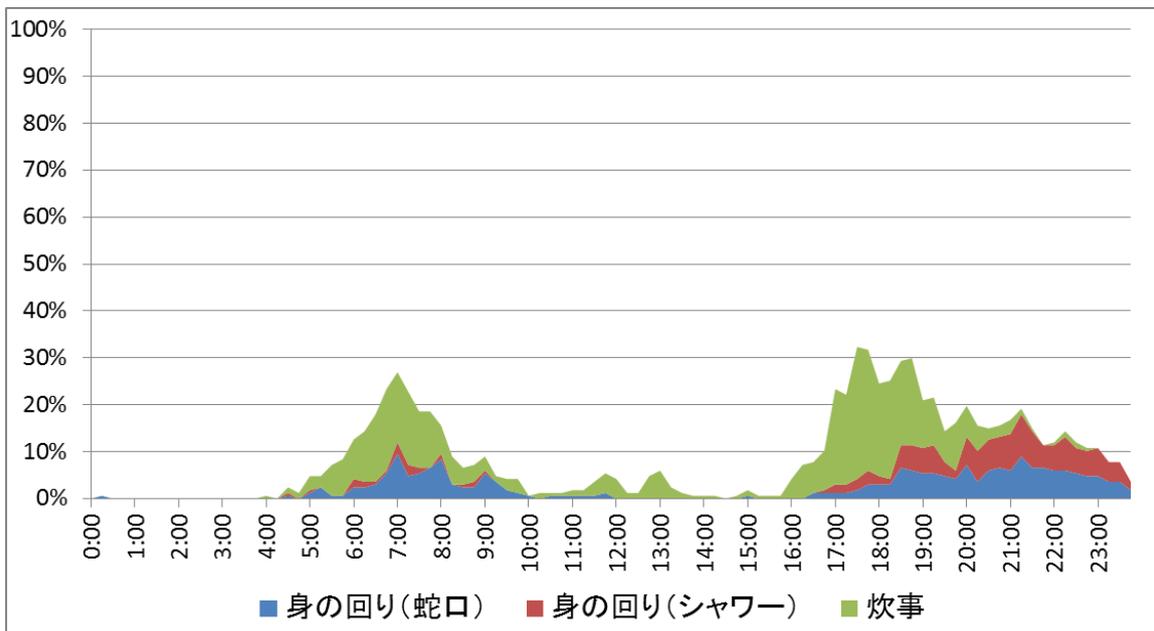


図 A-30 時間帯別の給湯使用割合（主婦・冬・平日）

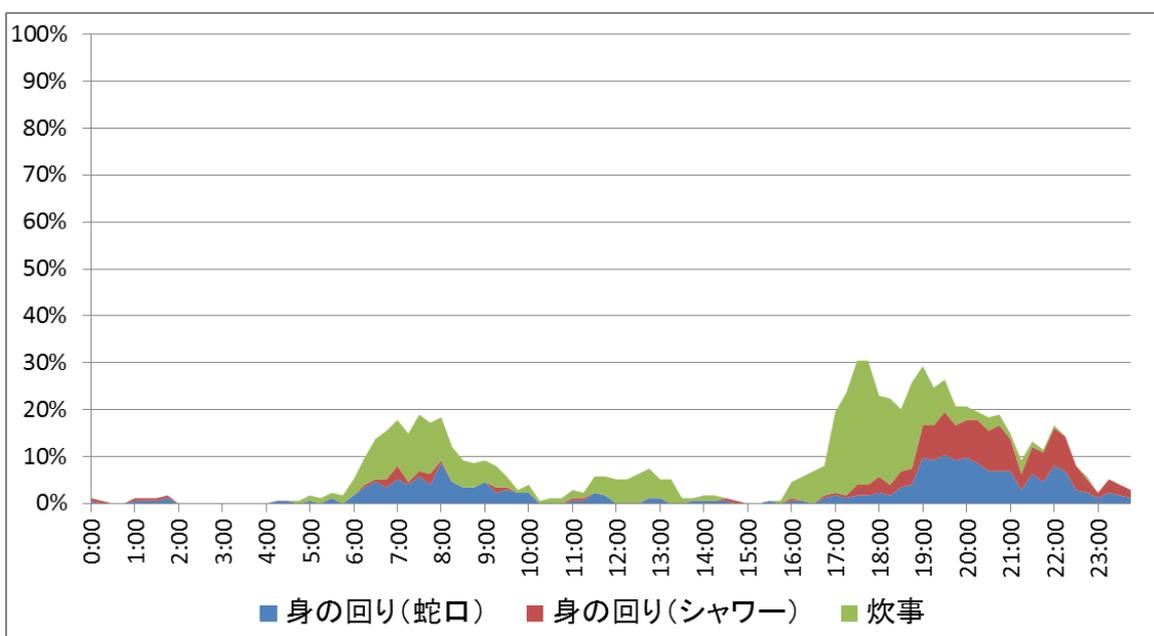


図 A-31 時間帯別の給湯使用割合（主婦・冬・休日）

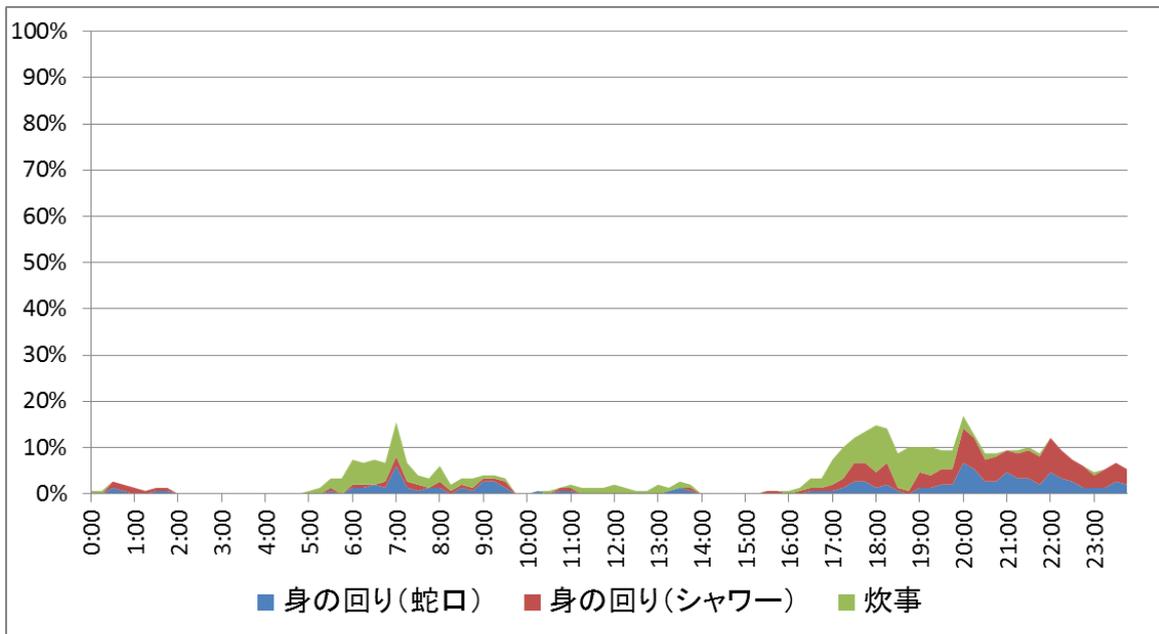


図 A-32 時間帯別の給湯使用割合（主婦・夏・平日）

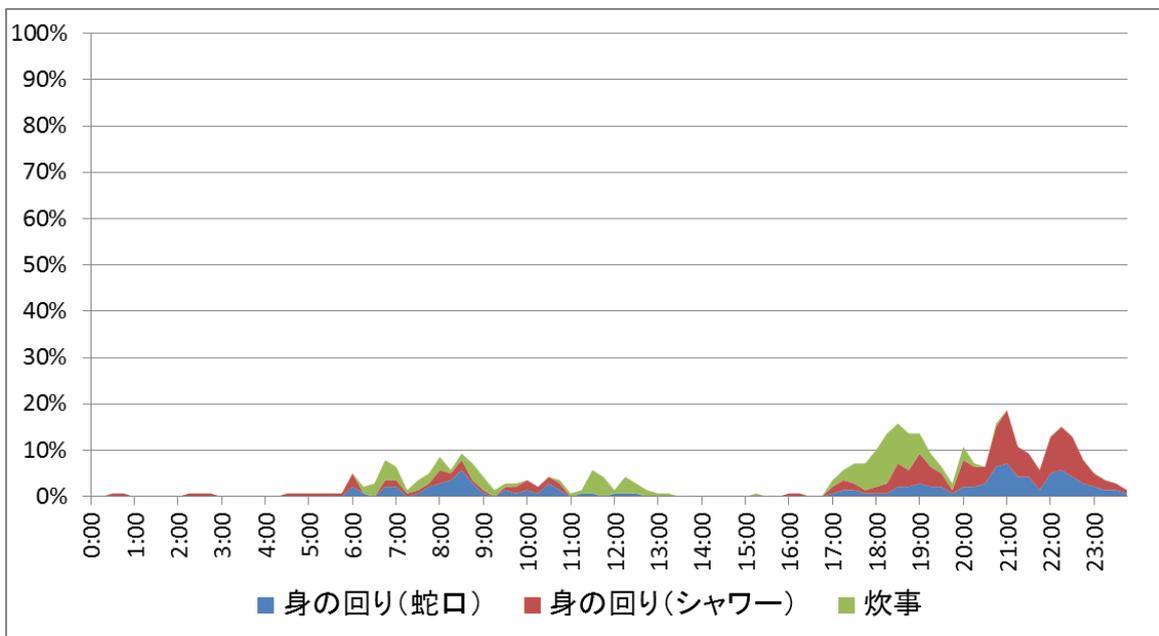


図 A-33 時間帯別の給湯使用割合（主婦・夏・休日）

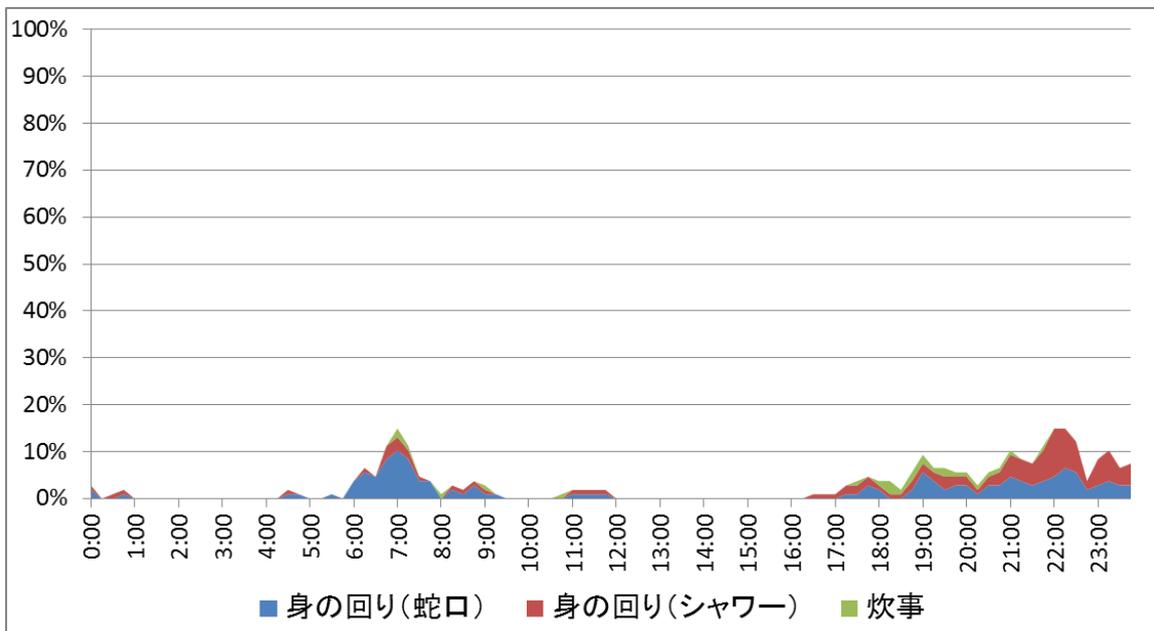


図 A-34 時間帯別の給湯使用割合（男性・冬・平日）

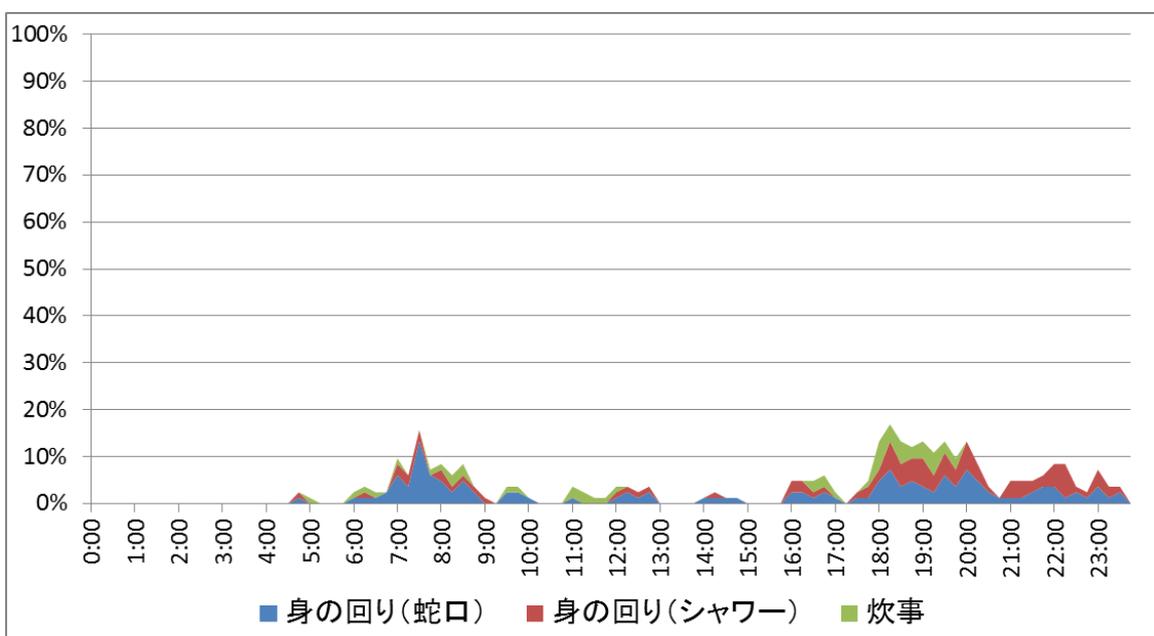


図 A-35 時間帯別の給湯使用割合（男性・冬・休日）

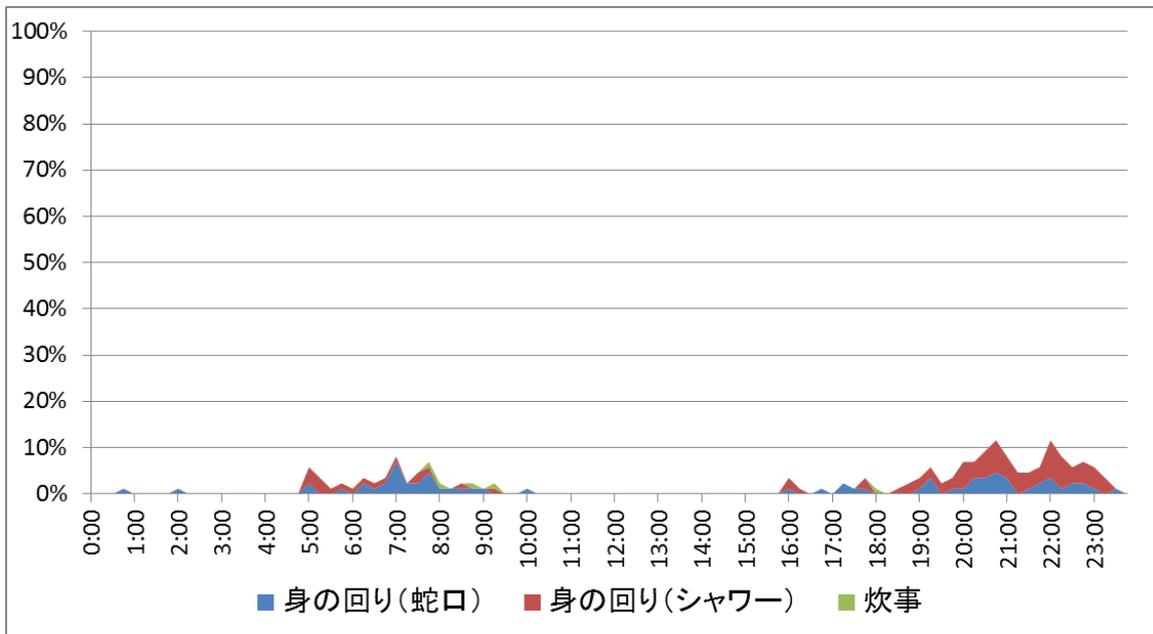


図 A-36 時間帯別の給湯使用割合（男性・夏・平日）

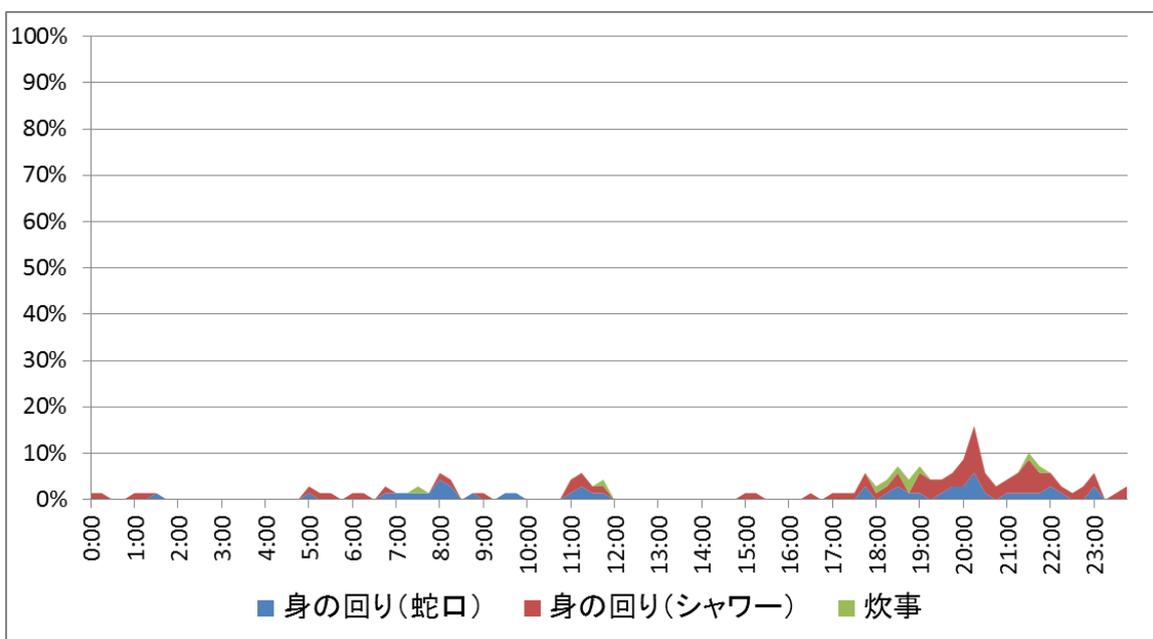


図 A-37 時間帯別の給湯使用割合（男性・夏・休日）

(エ) エネルギー需要カーブの推計結果

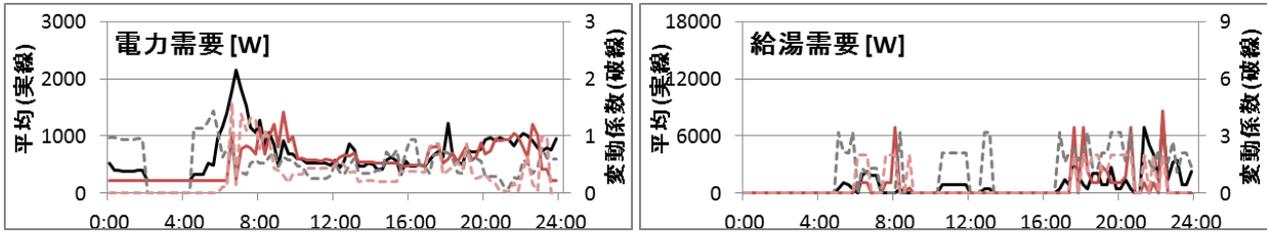


図 A-38 電力・給湯需要の平均と変動係数 (若年夫婦・冬)

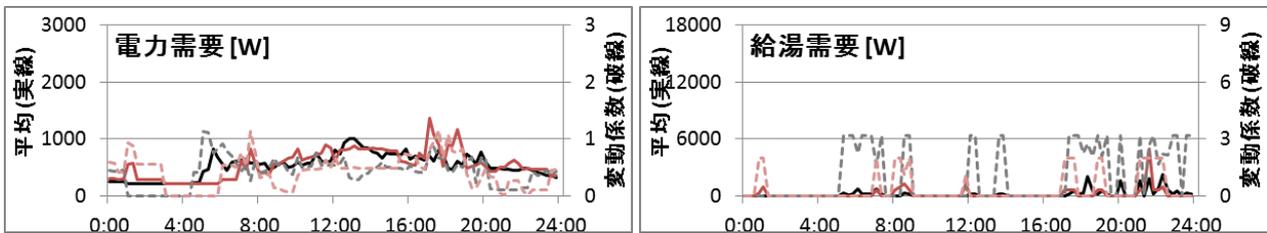


図 A-39 電力・給湯需要の平均と変動係数 (若年夫婦・夏)

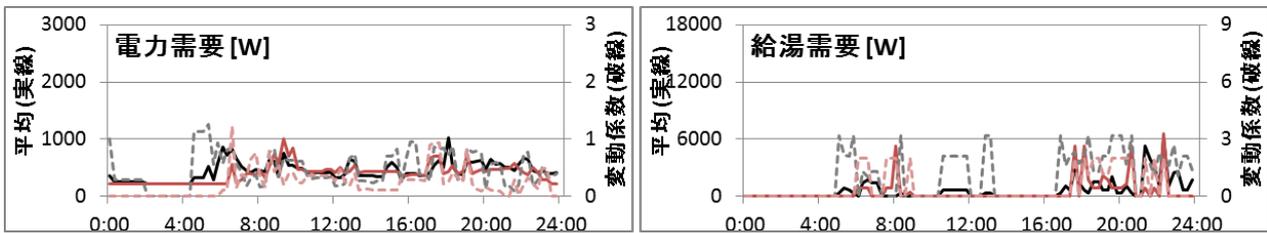


図 A-40 電力・給湯需要の平均と変動係数 (若年夫婦・中間期(冬寄り))

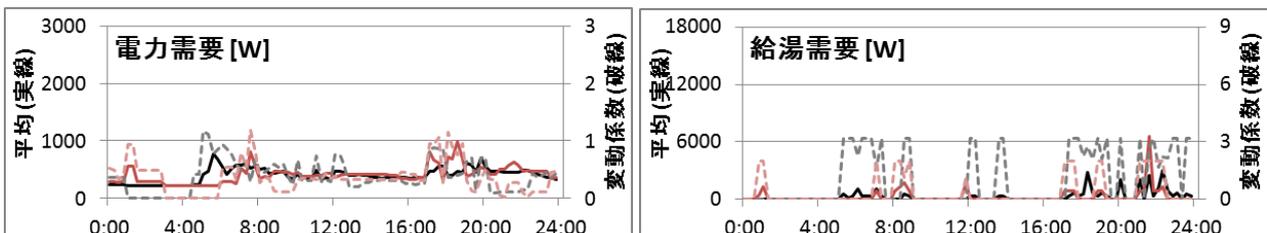


図 A-41 電力・給湯需要の平均と変動係数 (若年夫婦・中間期(夏寄り))

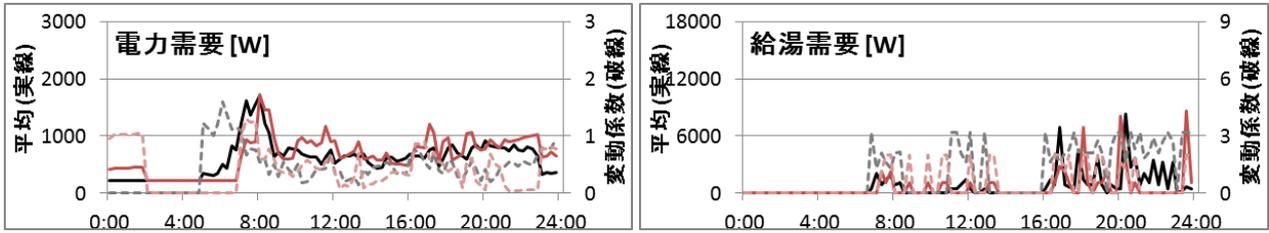


図 A-42 電力・給湯需要の平均と変動係数（老年夫婦・冬）

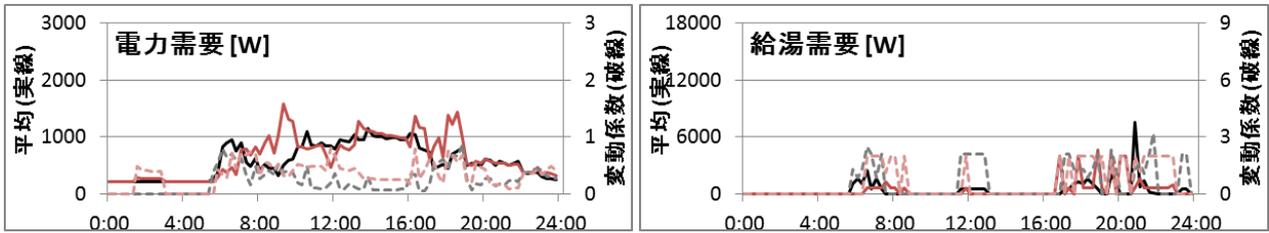


図 A-43 電力・給湯需要の平均と変動係数（老年夫婦・夏）

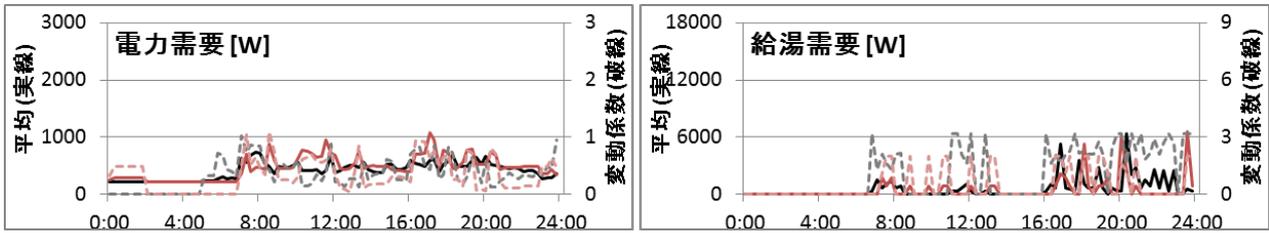


図 A-44 電力・給湯需要の平均と変動係数（老年夫婦・中間期(冬寄り)）

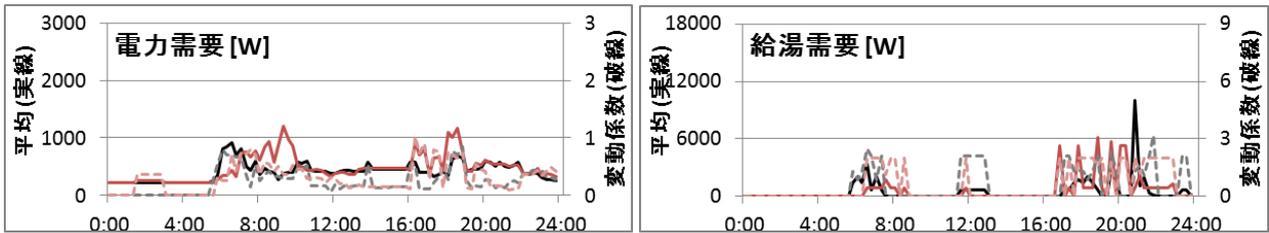


図 A-45 電力・給湯需要の平均と変動係数（老年夫婦・中間期(夏寄り)）

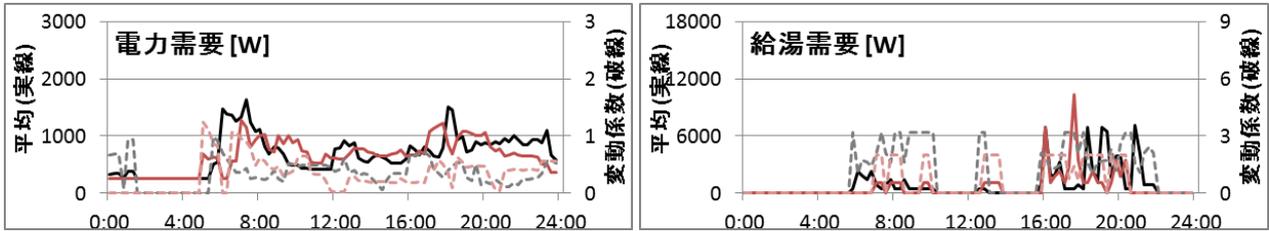


図 A-46 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子未就学1・冬)

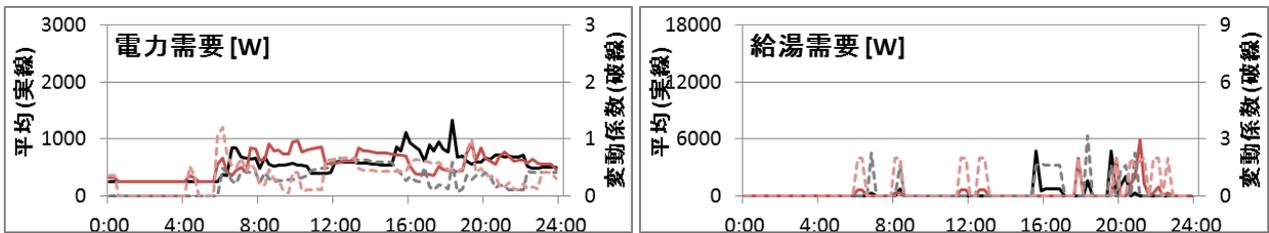


図 A-47 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子未就学1・夏)

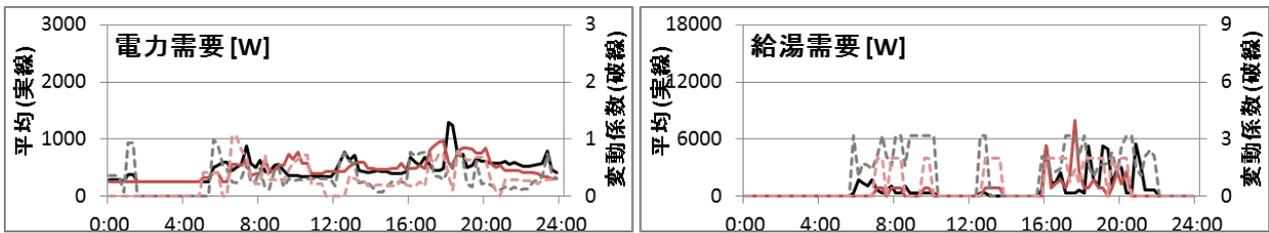


図 A-48 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子未就学1・中間期(冬寄り))

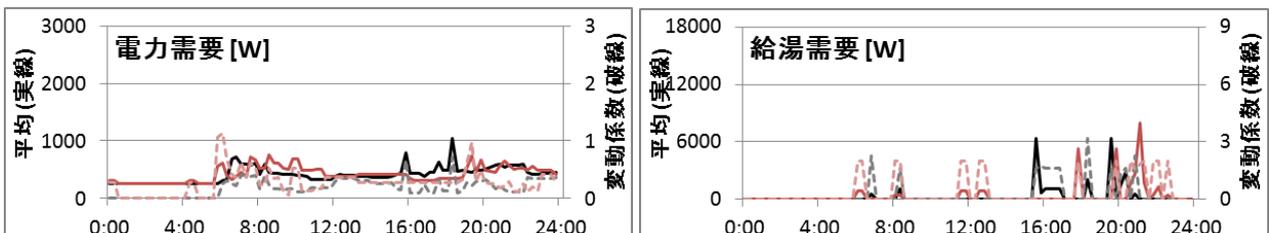


図 A-49 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子未就学1・中間期(夏寄り))

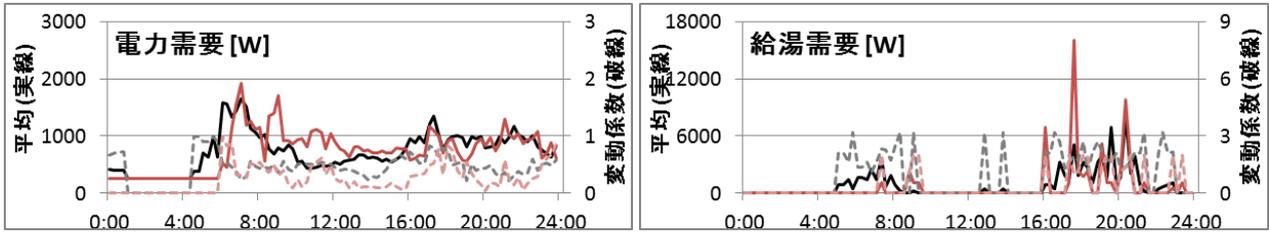


図 A-50 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子小中学1・冬)

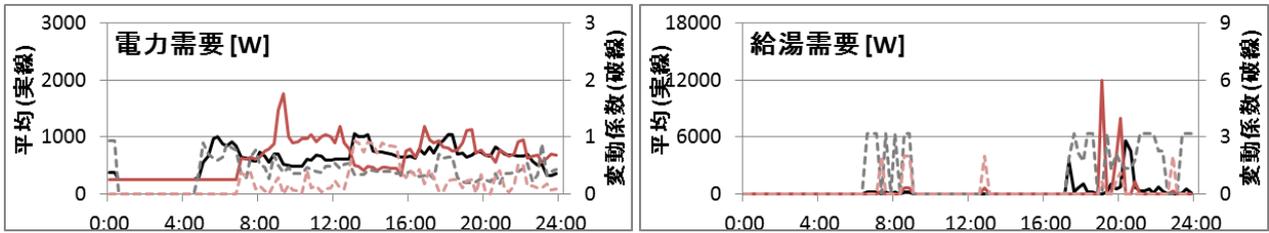


図 A-51 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子小中学1・夏)

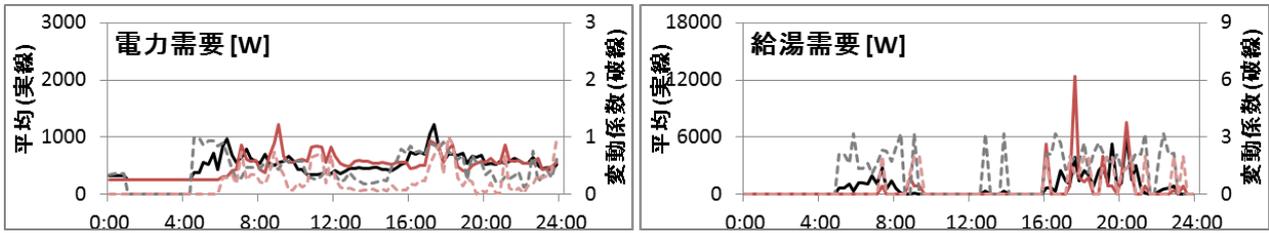


図 A-52 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子小中学1・中間期(冬寄り))

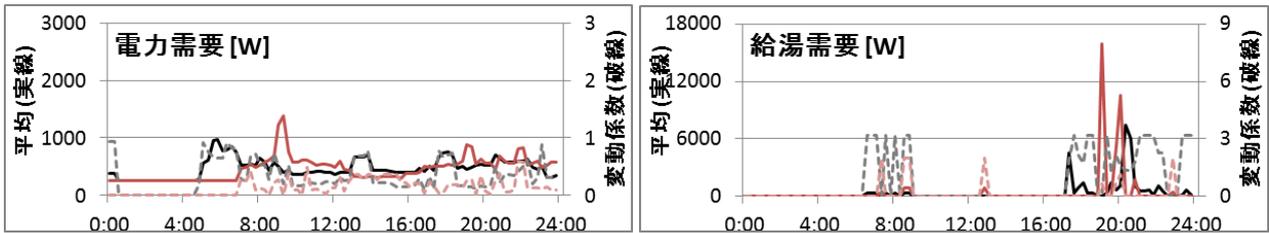


図 A-53 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子小中学1・中間期(夏寄り))

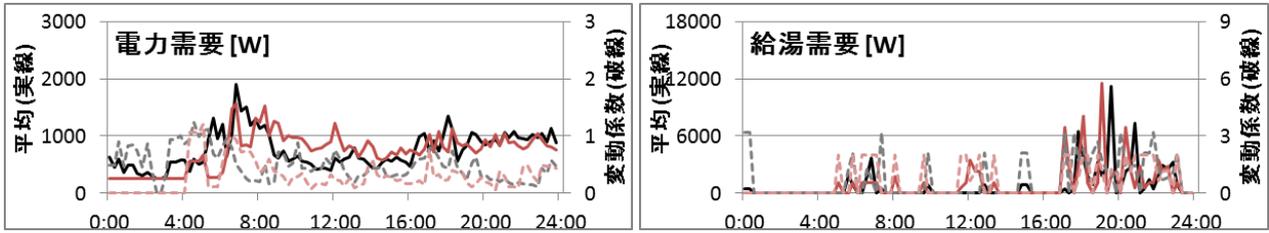


図 A-54 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子高大学1・冬)

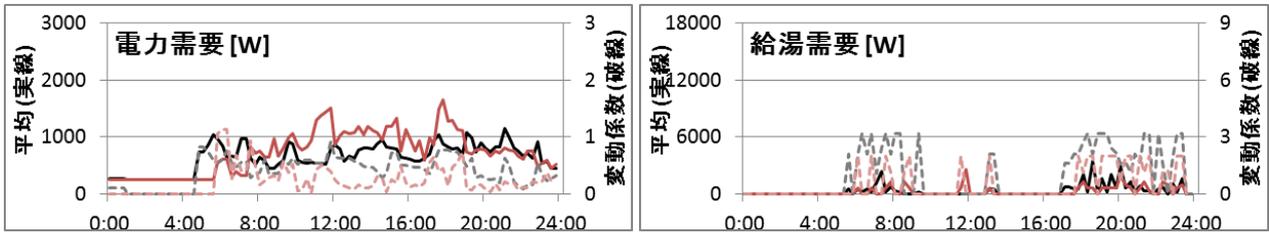


図 A-55 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子高大学1・夏)

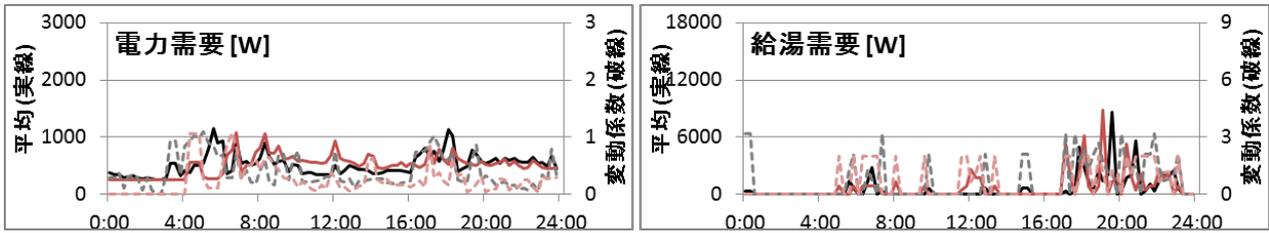


図 A-56 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子高大学1・中間期(冬寄り))

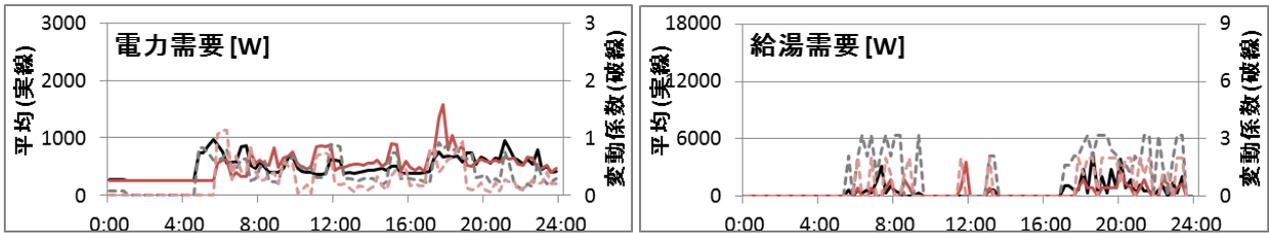


図 A-57 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子高大学1・中間期(夏寄り))

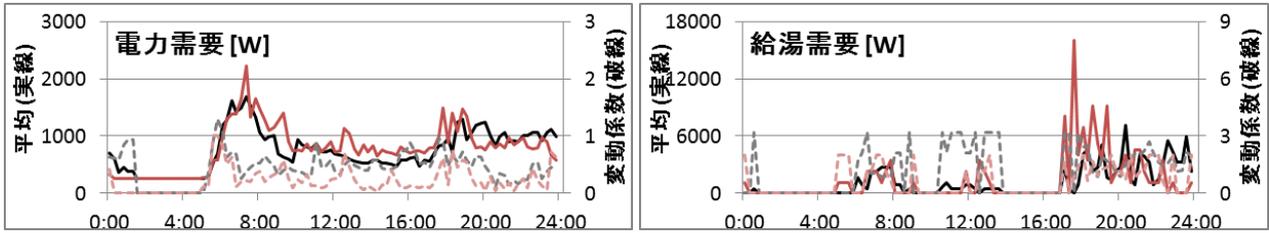


図 A-58 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子社会人1・冬)

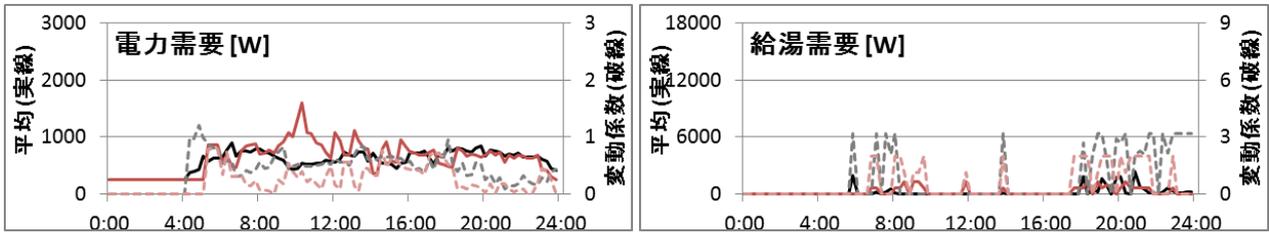


図 A-59 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子社会人1・夏)

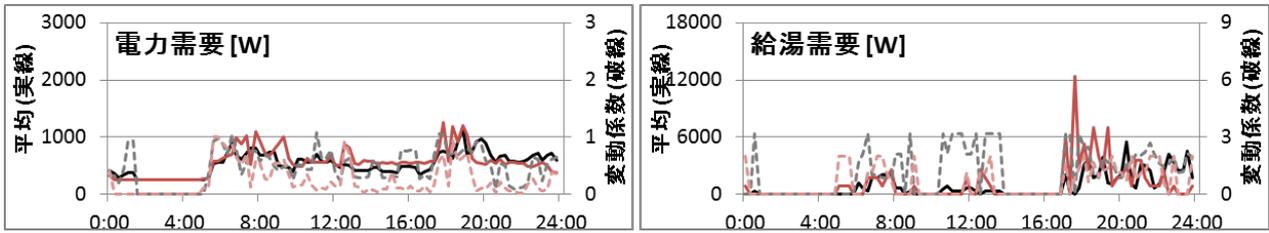


図 A-60 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子社会人1・中間期(冬寄り))

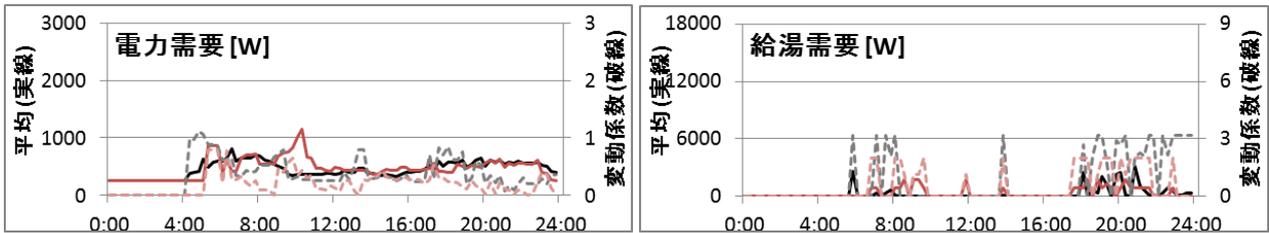


図 A-61 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子社会人1・中間期(夏寄り))

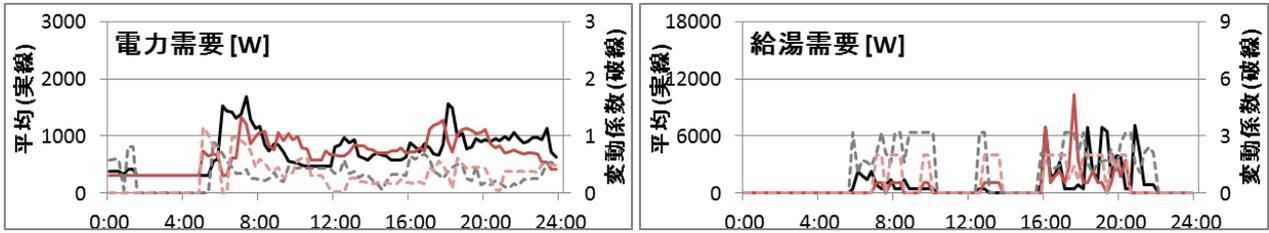


図 A-62 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子未就学2・冬)

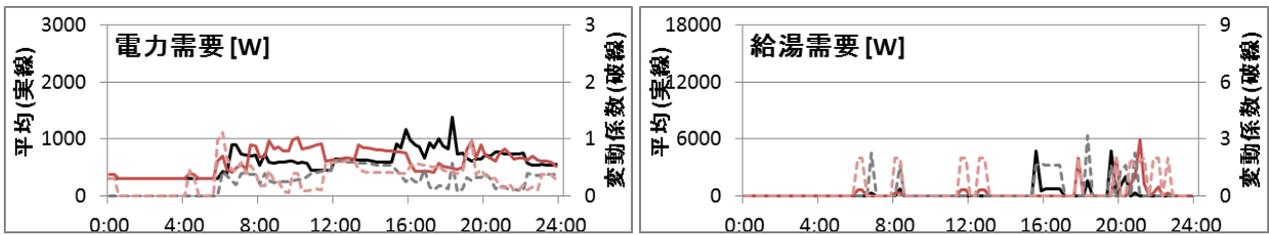


図 A-63 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子未就学2・夏)

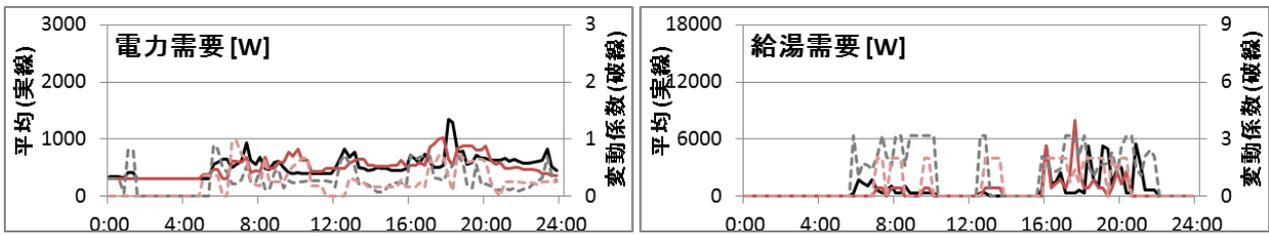


図 A-64 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子未就学2・中間期(冬寄り))

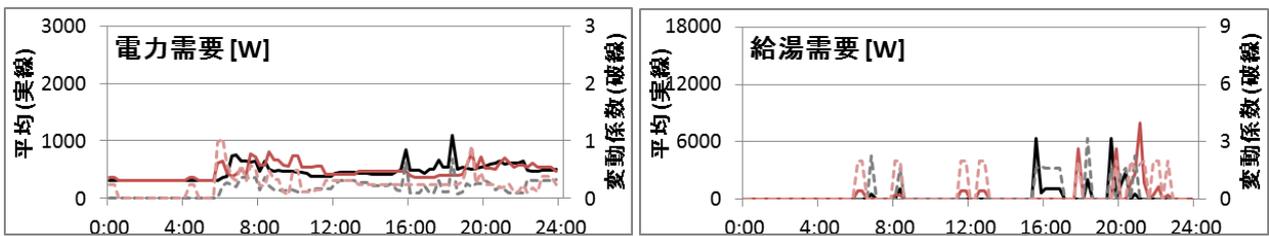


図 A-65 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子未就学2・中間期(夏寄り))

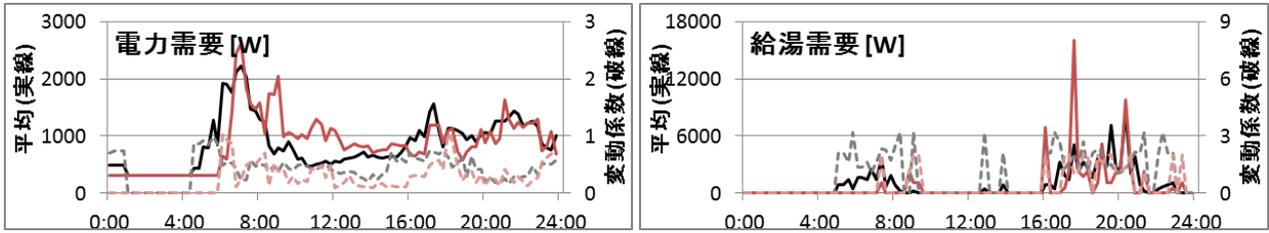


図 A-66 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子小中学 2・冬)

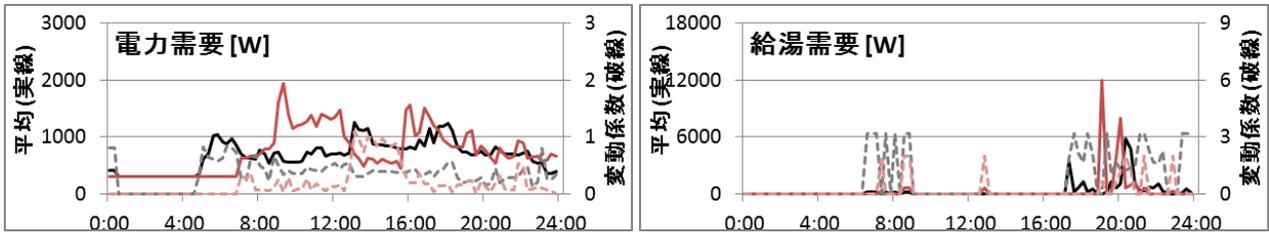


図 A-67 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子小中学 2・夏)

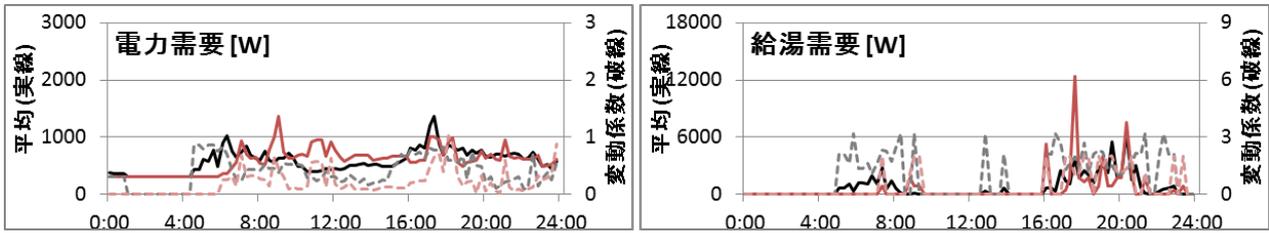


図 A-68 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子小中学 2・中間期(冬寄り))

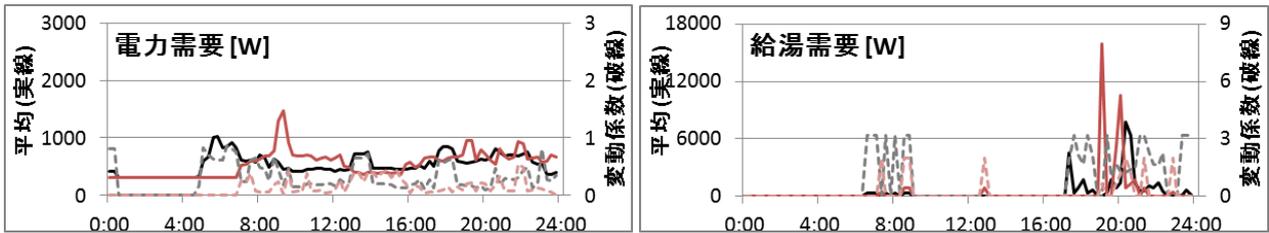


図 A-69 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子小中学 2・中間期(夏寄り))

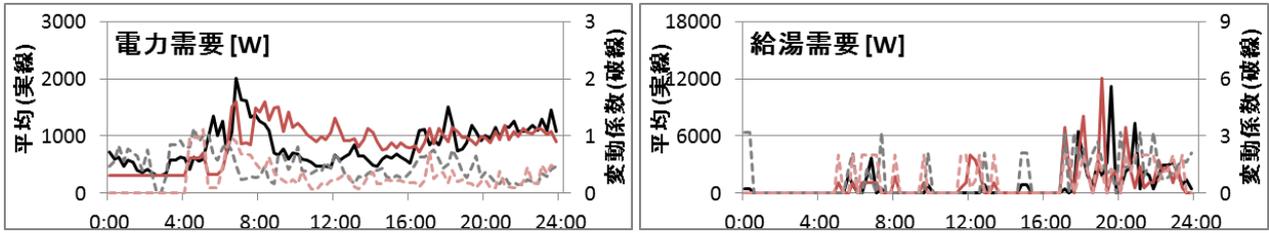


図 A-70 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子高大学2・冬)

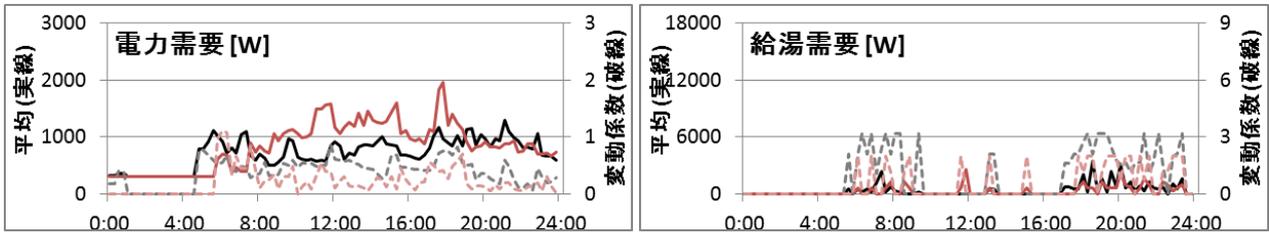


図 A-71 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子高大学2・夏)

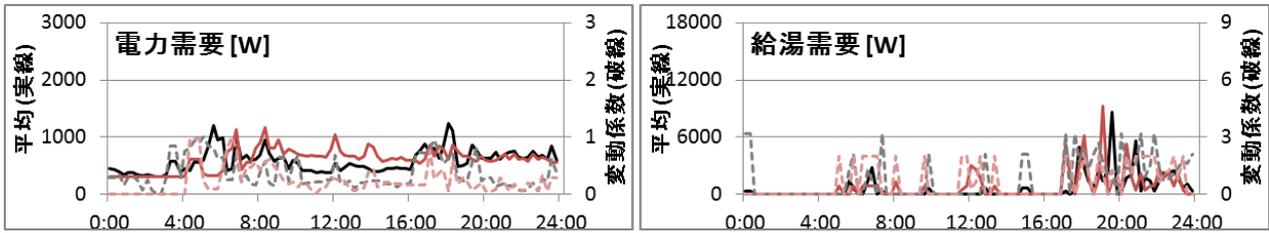


図 A-72 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子高大学2・中間期(冬寄り))

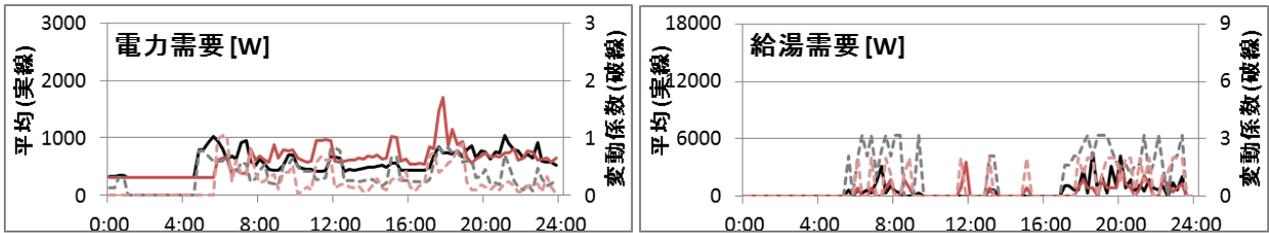


図 A-73 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子高大学2・中間期(夏寄り))

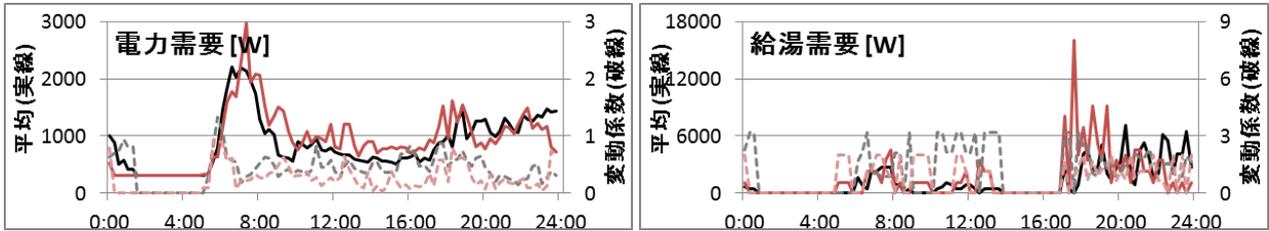


図 A-74 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子社会人 2・冬)

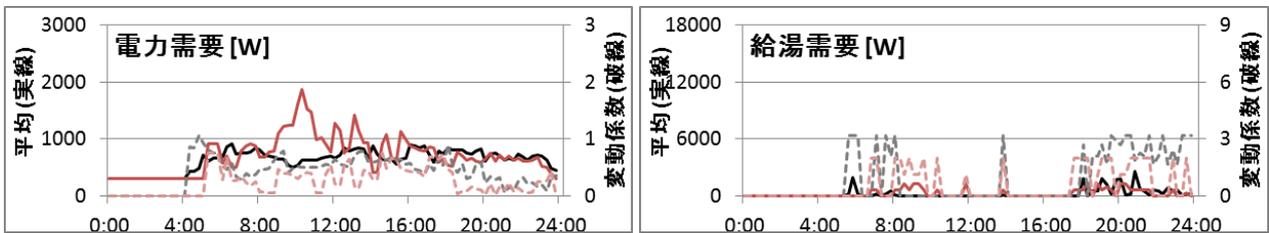


図 A-75 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子社会人 2・夏)

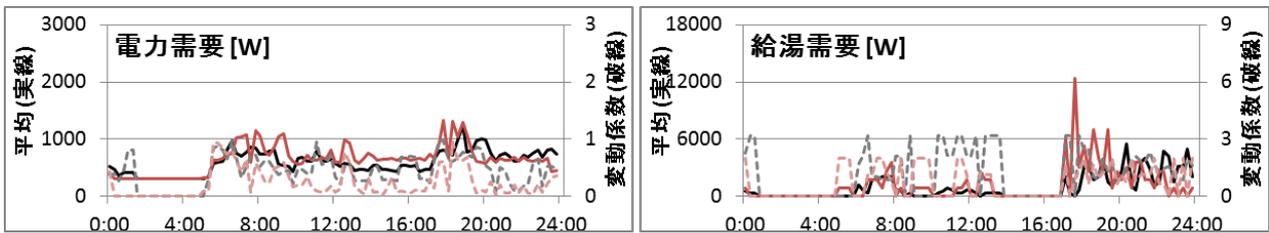


図 A-76 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子社会人 2・中間期(冬寄り))

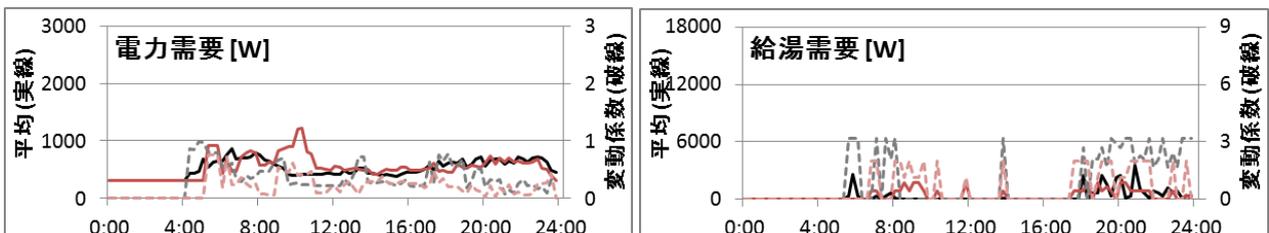


図 A-77 電力・給湯需要の平均と変動係数 (子社会人 2・中間期(夏寄り))

(オ) 家庭用燃料電池システムの運転シミュレーション結果

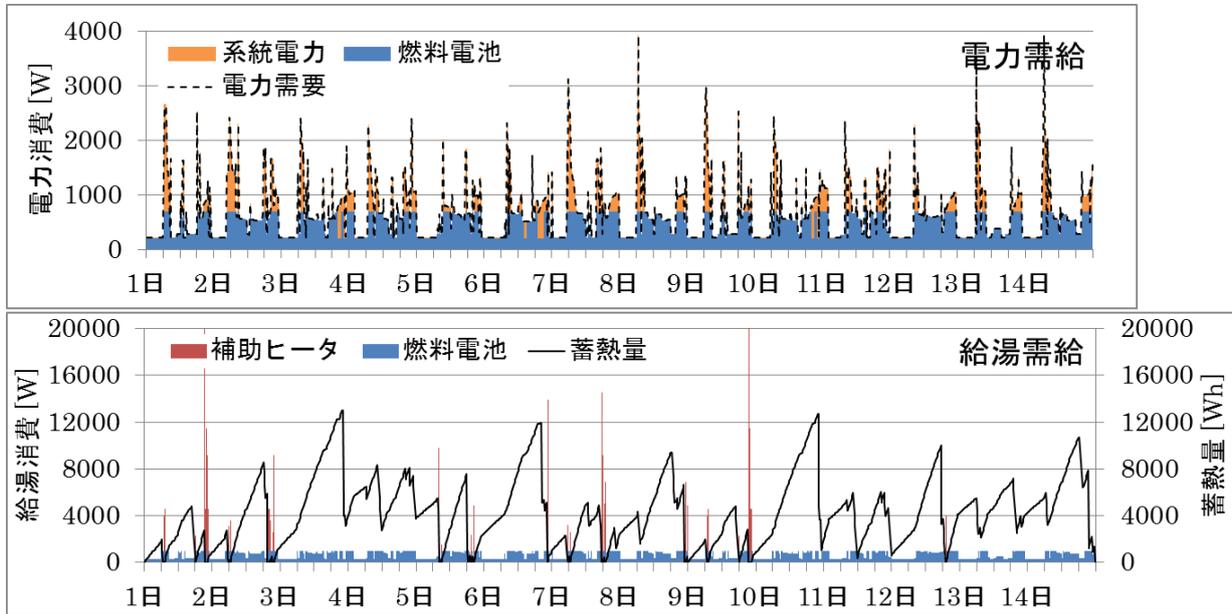


図 A-78 PEFC の運転シミュレーション結果 (若年夫婦・冬)

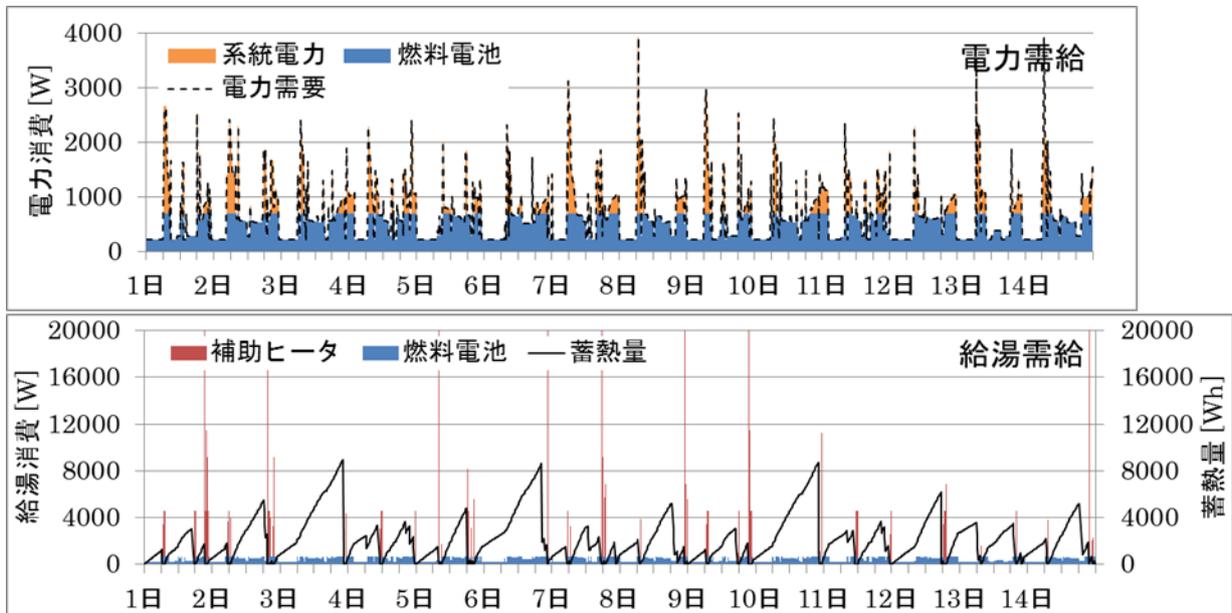


図 A-79 SOFC の運転シミュレーション結果 (若年夫婦・冬)

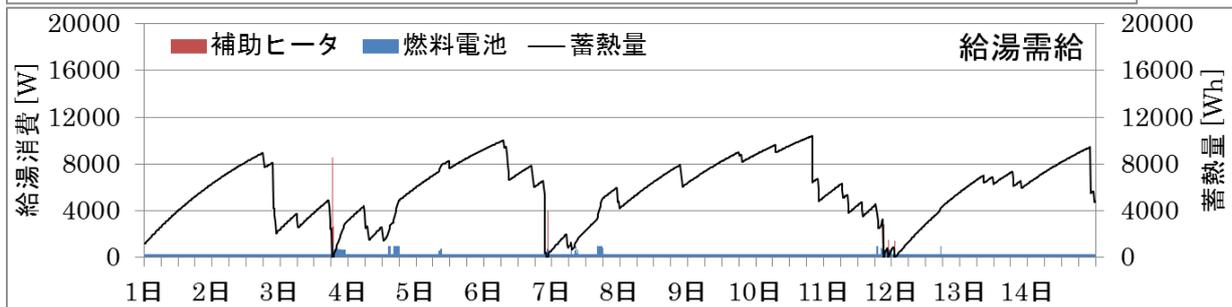
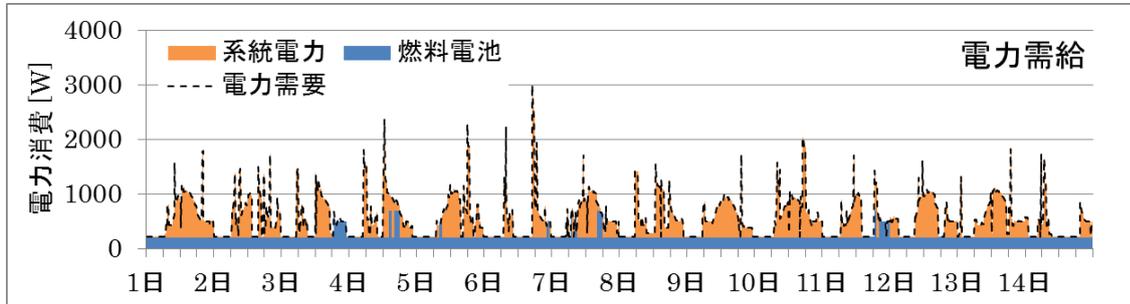


図 A-80 PEFC の運転シミュレーション結果 (若年夫婦・夏)

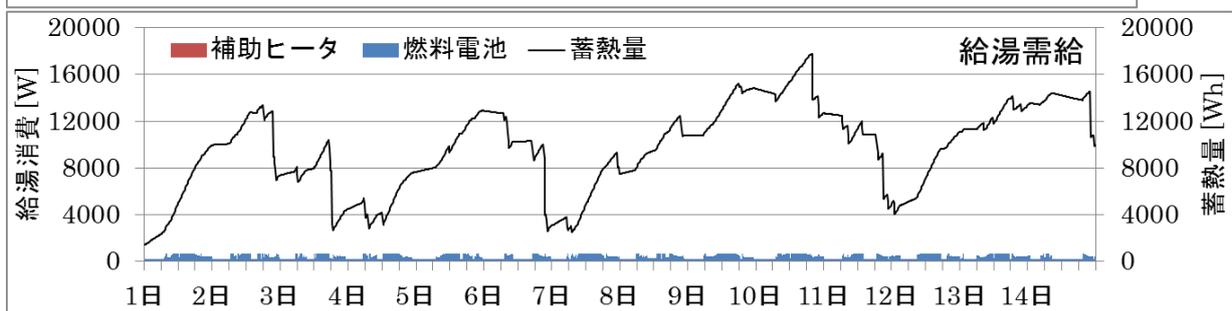
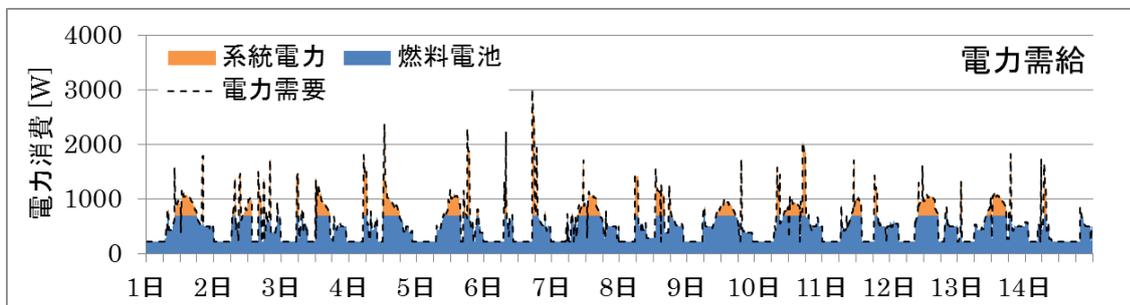


図 A-81 SOFC の運転シミュレーション結果 (若年夫婦・夏)

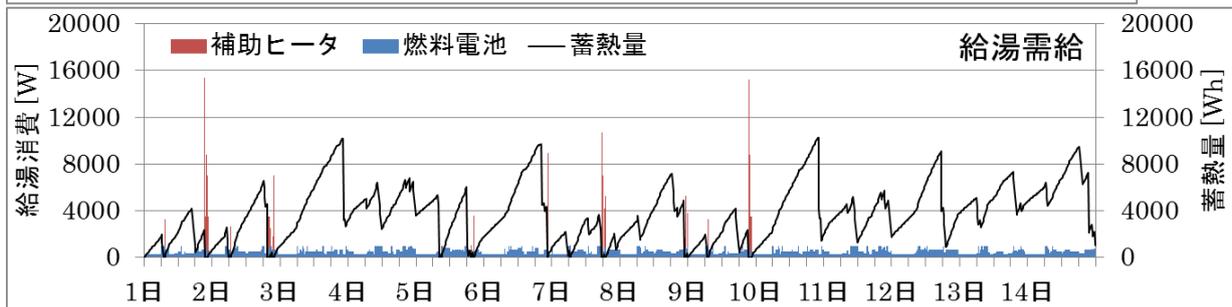
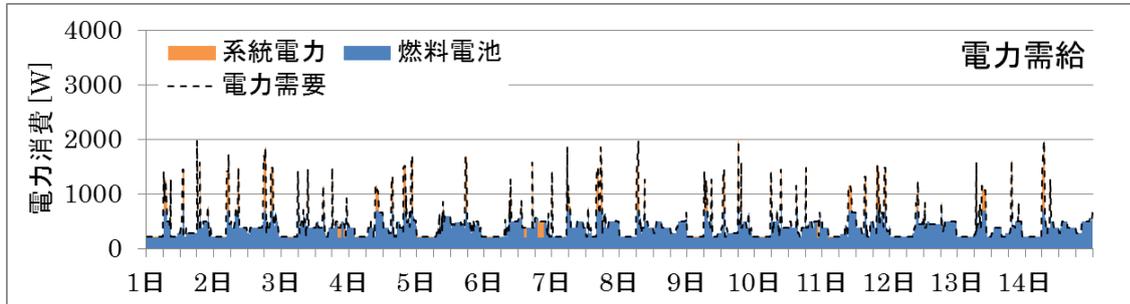


図 A-82 PEFC の運転シミュレーション結果 (若年夫婦・中間期(冬寄り))

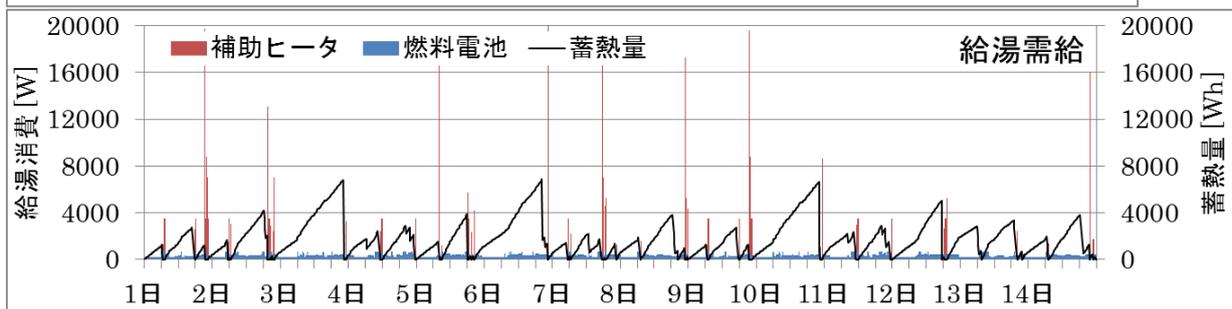
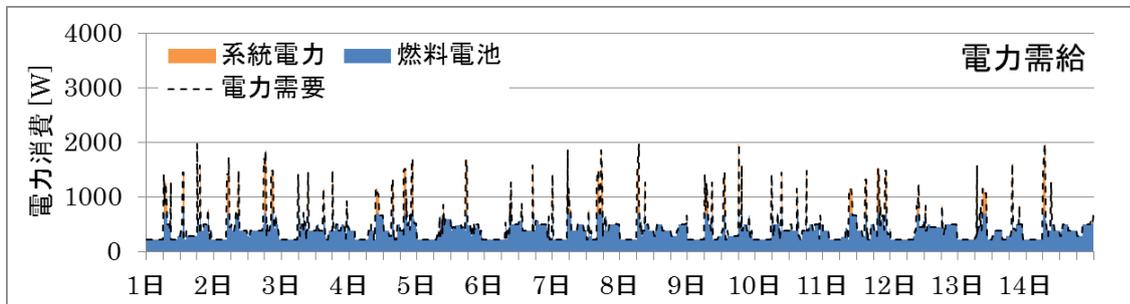


図 A-83 SOFC の運転シミュレーション結果 (若年夫婦・中間期(冬寄り))

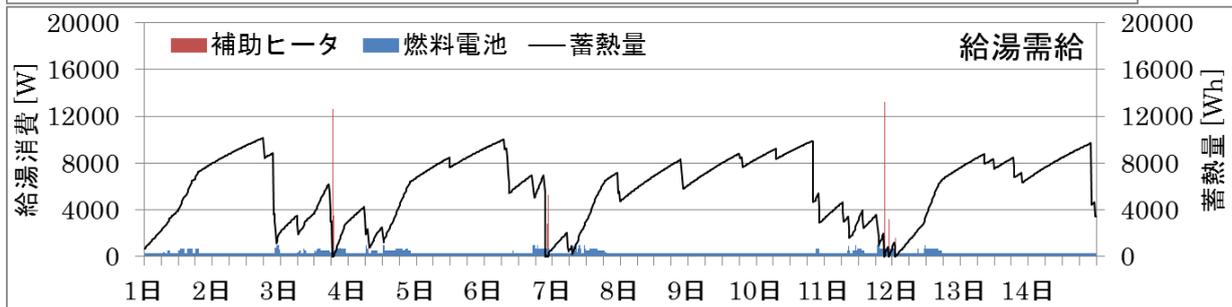
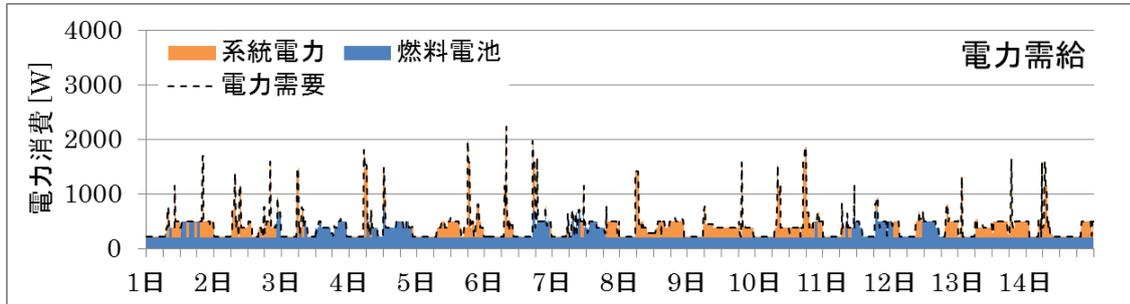


図 A-84 PEFC の運転シミュレーション結果 (若年夫婦・中間期(夏寄り))

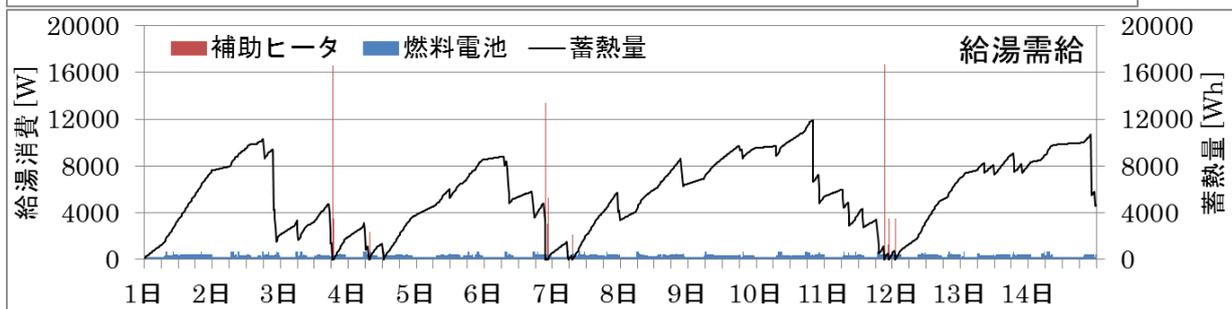
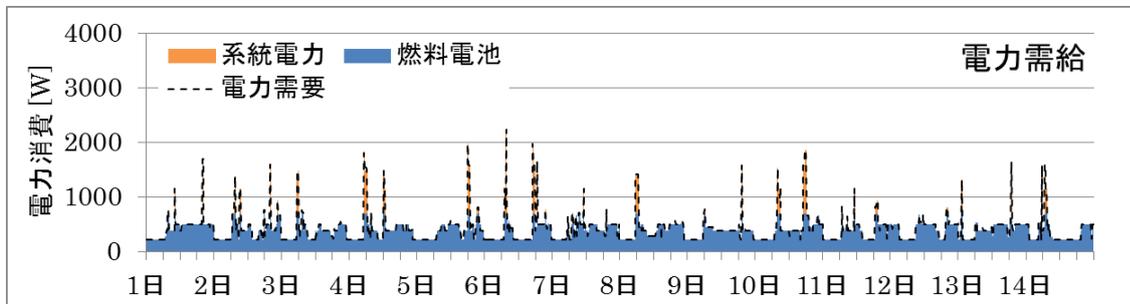


図 A-85 SOFC の運転シミュレーション結果 (若年夫婦・中間期(夏寄り))

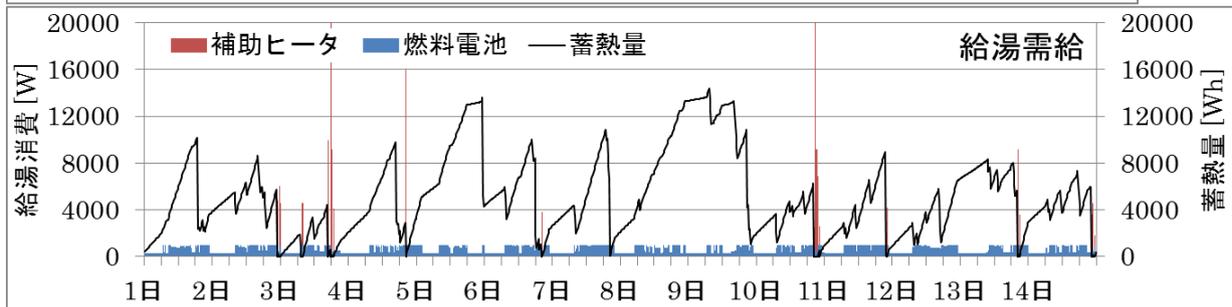
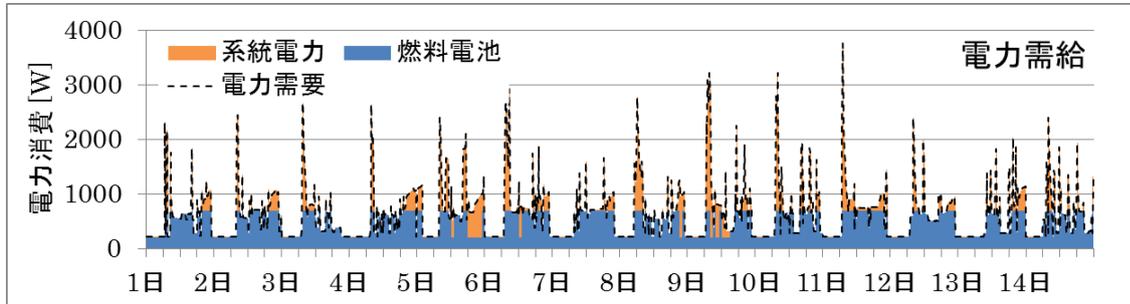


図 A-86 PEFCの運転シミュレーション結果 (老年夫婦・冬)

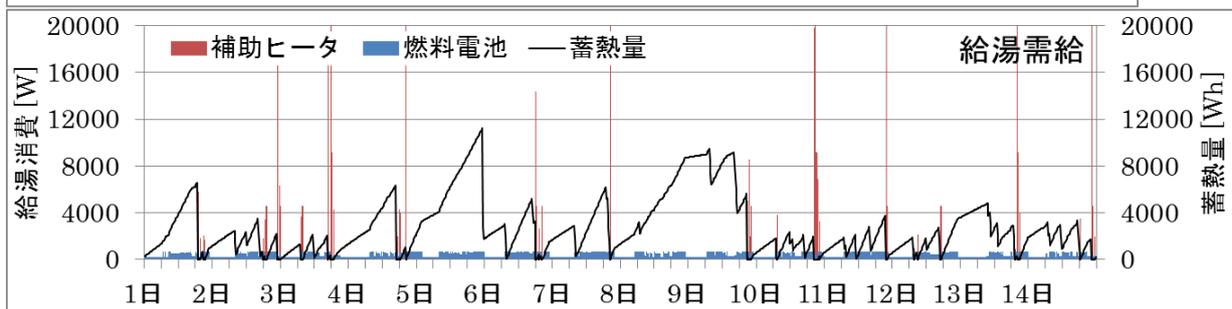
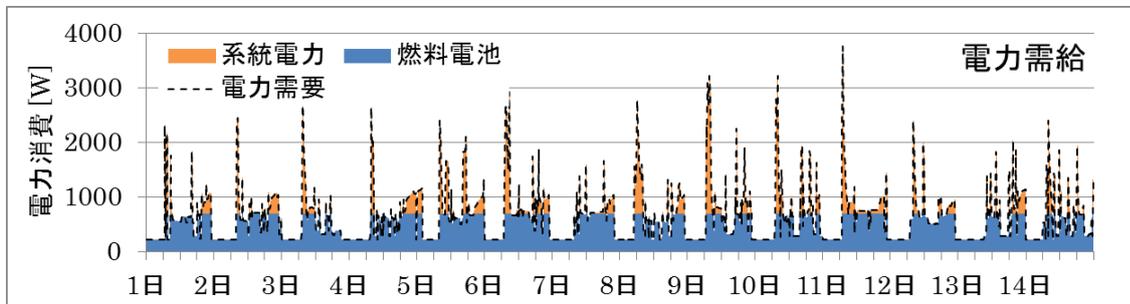


図 A-87 SOFCの運転シミュレーション結果 (老年夫婦・冬)

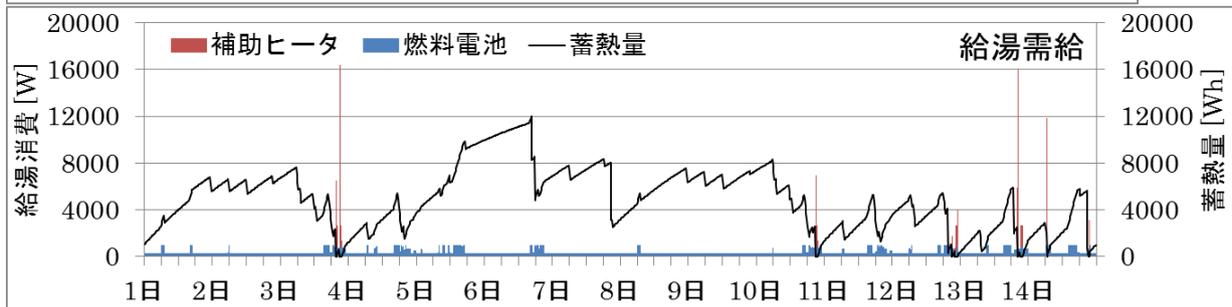
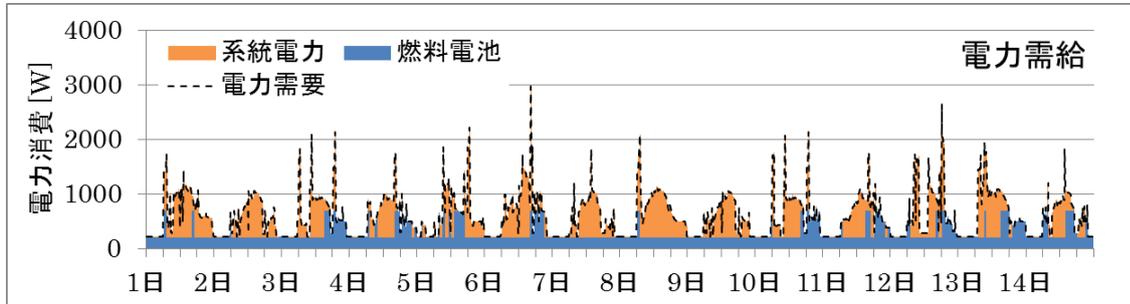


図 A-88 PEFC の運転シミュレーション結果 (老年夫婦・夏)

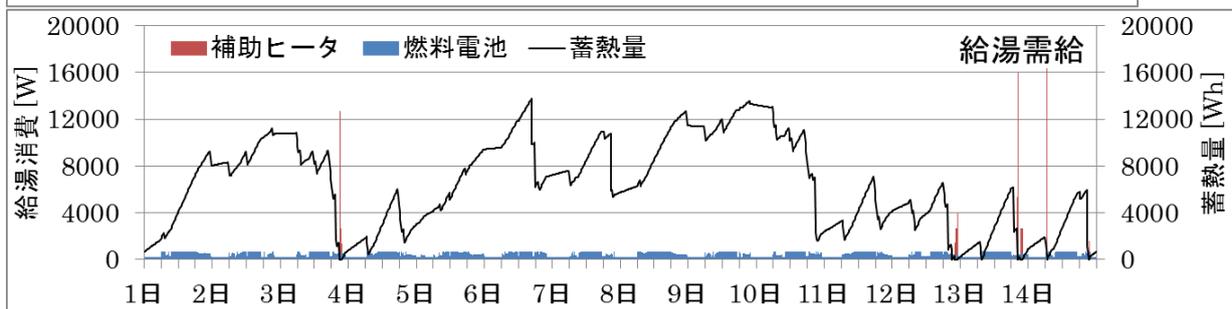
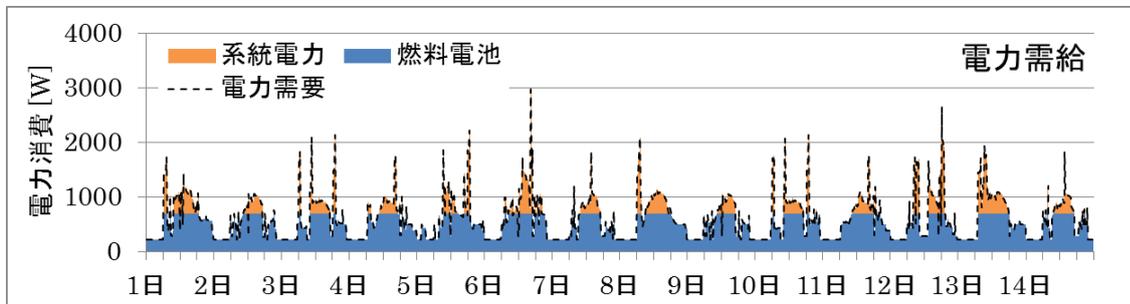


図 A-89 SOFC の運転シミュレーション結果 (老年夫婦・夏)

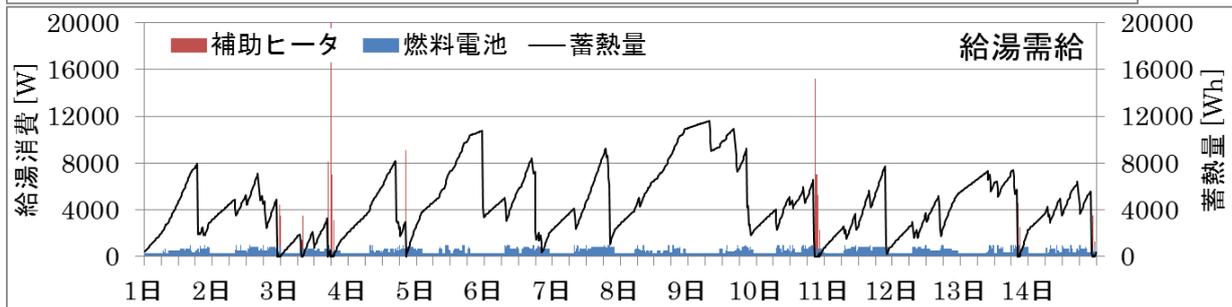
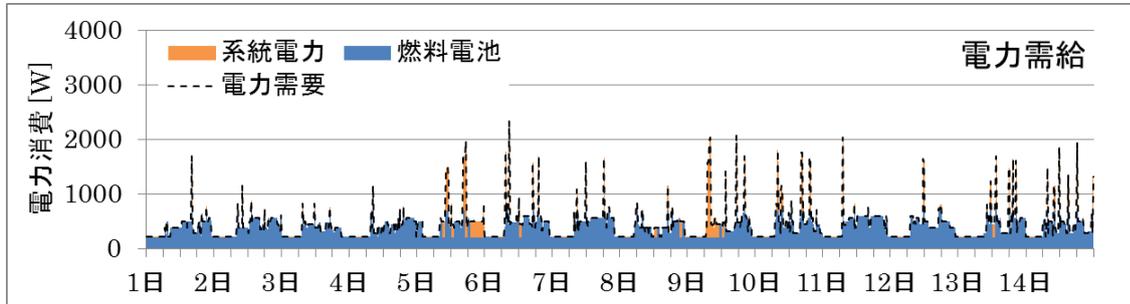


図 A-90 PEFC の運転シミュレーション結果 (老年夫婦・中間期(冬寄り))

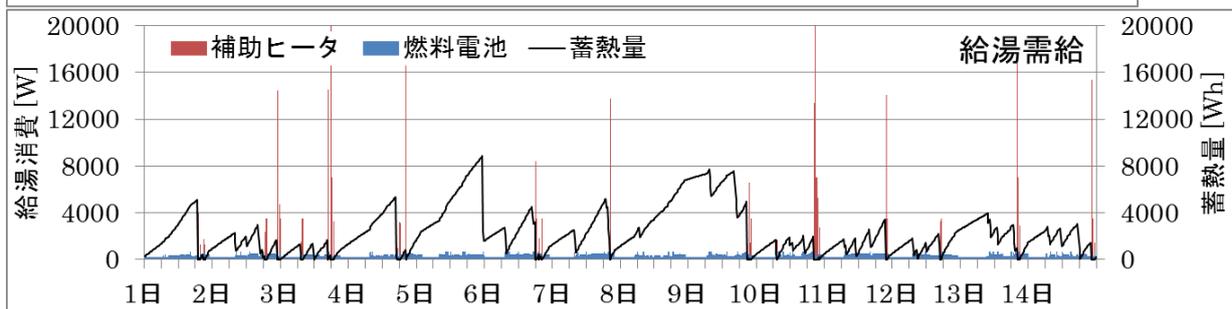
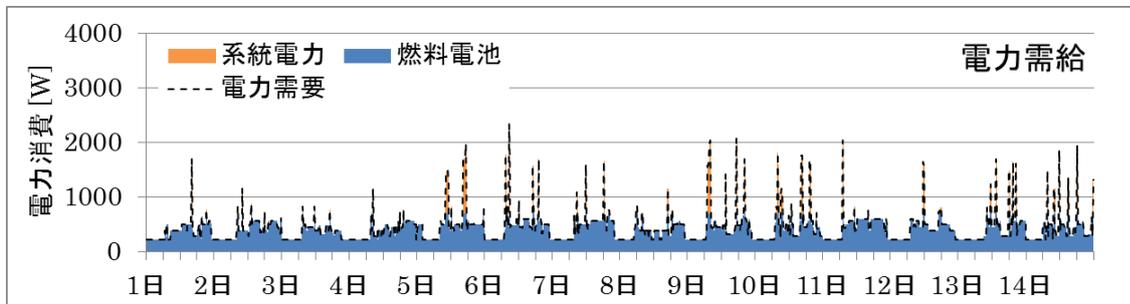


図 A-91 SOFC の運転シミュレーション結果 (老年夫婦・中間期(冬寄り))

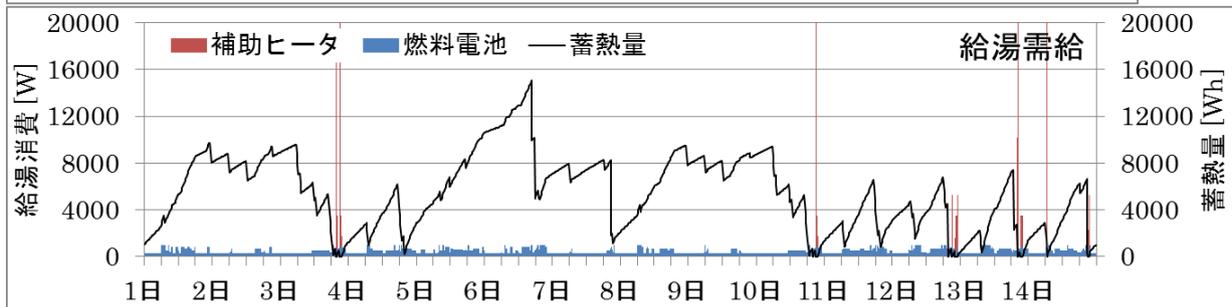
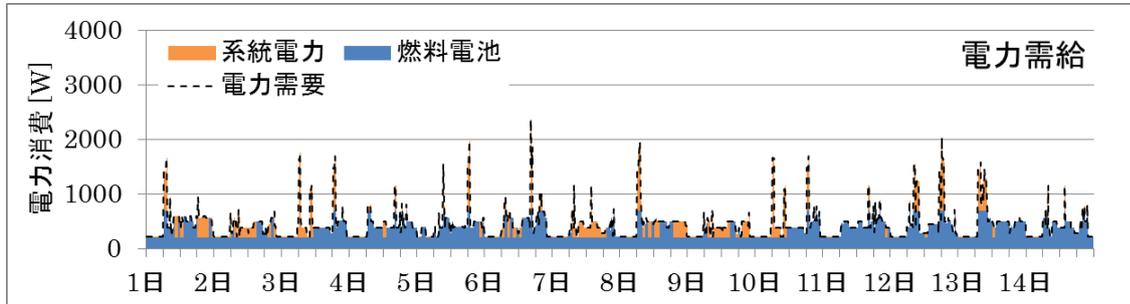


図 A-92 PEFC の運転シミュレーション結果 (老年夫婦・中間期(夏寄り))

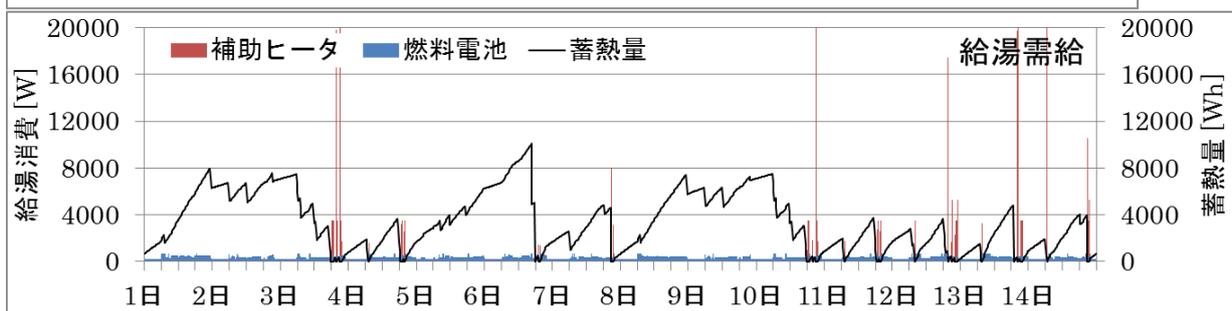
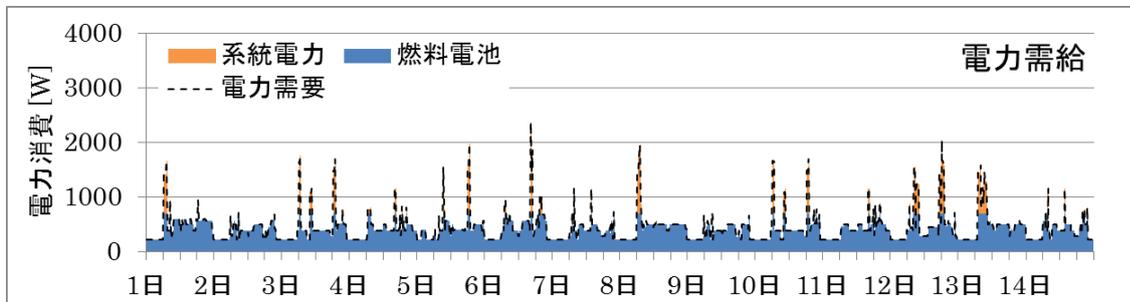


図 A-93 SOFC の運転シミュレーション結果 (老年夫婦・中間期(夏寄り))

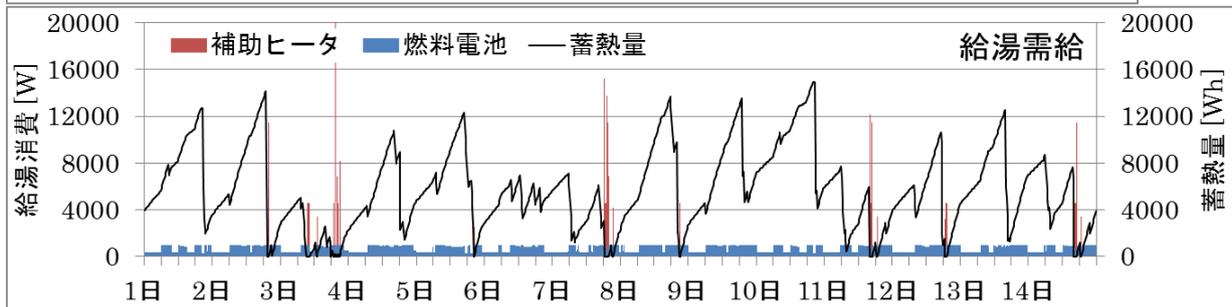
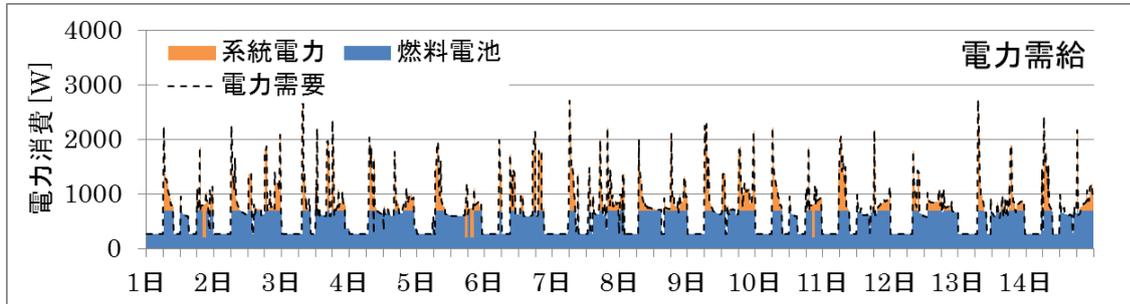


図 A-94 PEFCの運転シミュレーション結果 (子未就学1・冬)

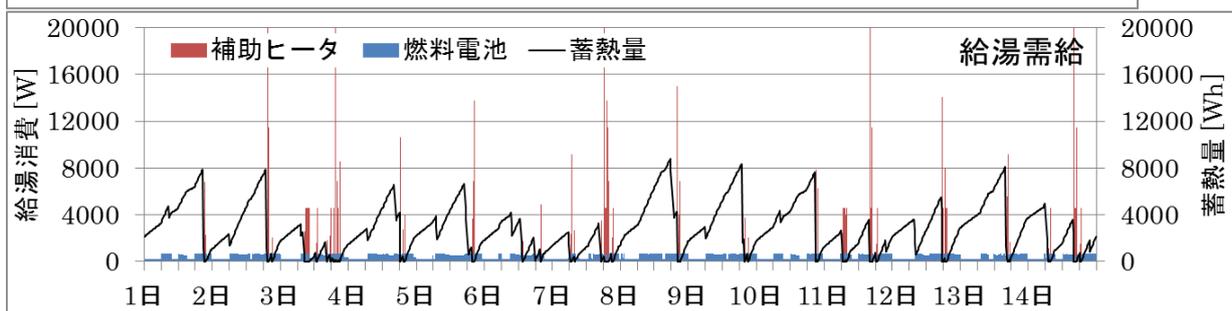
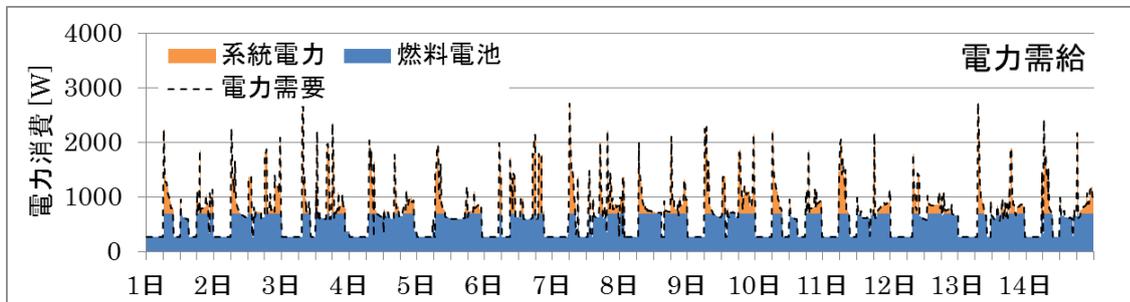


図 A-95 SOFCの運転シミュレーション結果 (子未就学1・冬)

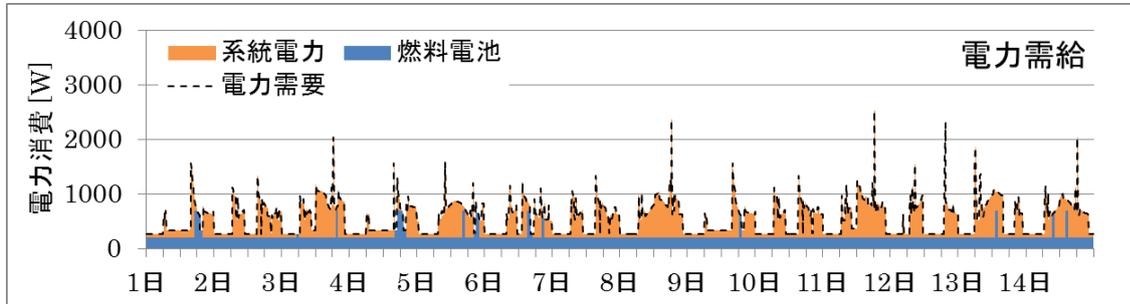


図 A-96 PEFC の運転シミュレーション結果 (子未就学1・夏)

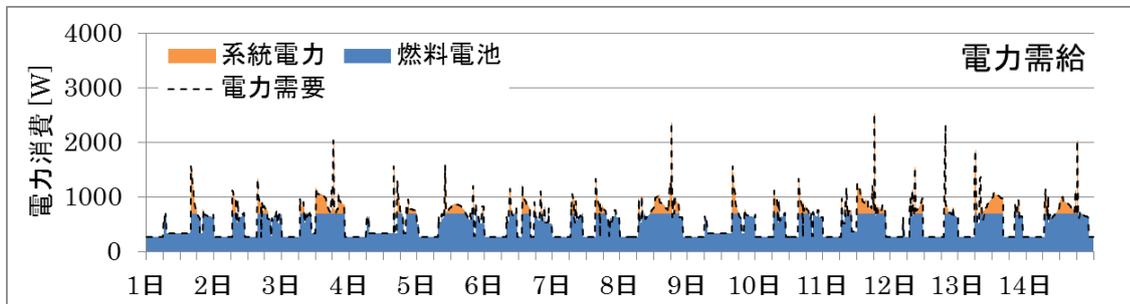


図 A-97 SOFC の運転シミュレーション結果 (子未就学1・夏)

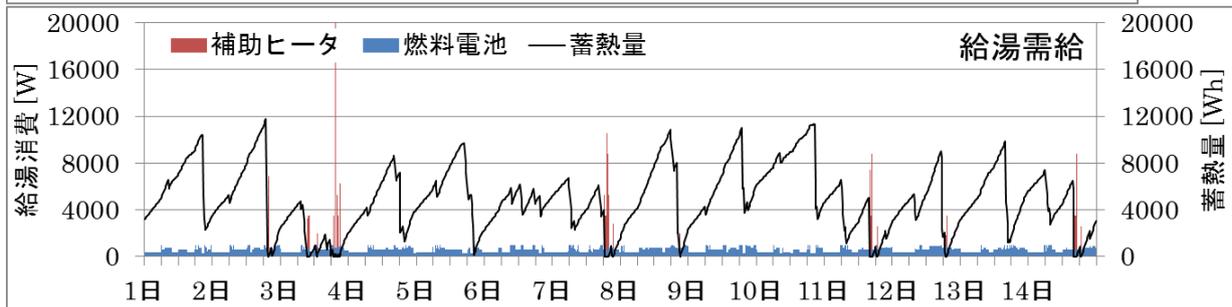
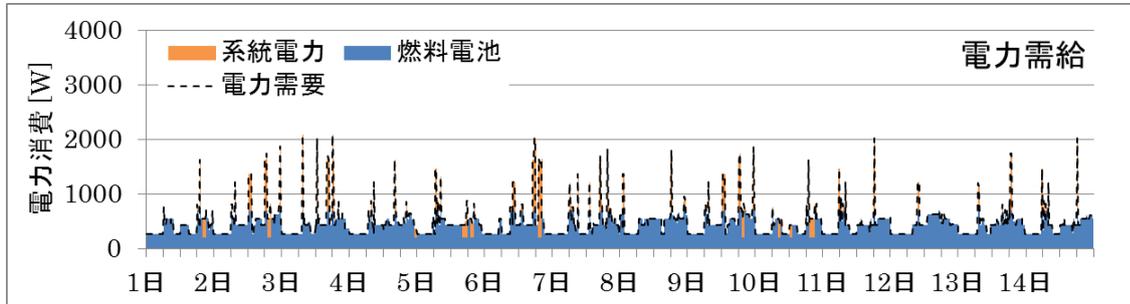


図 A-98 PEFC の運転シミュレーション結果 (子未就学1・中間期(冬寄り))

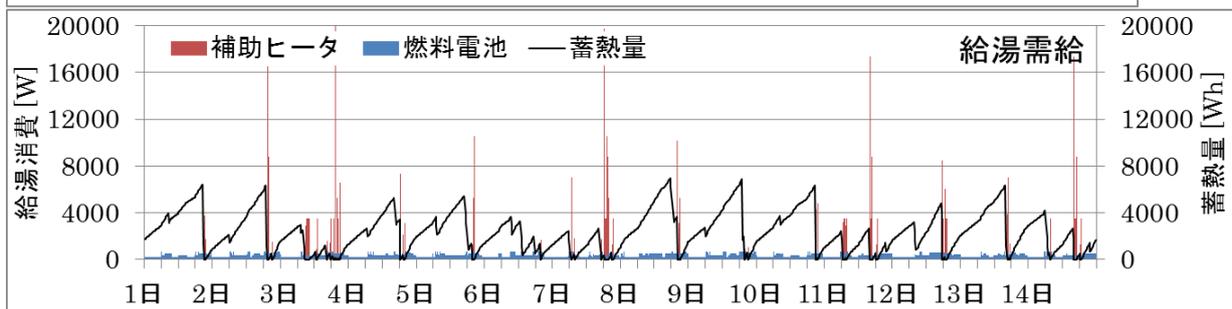
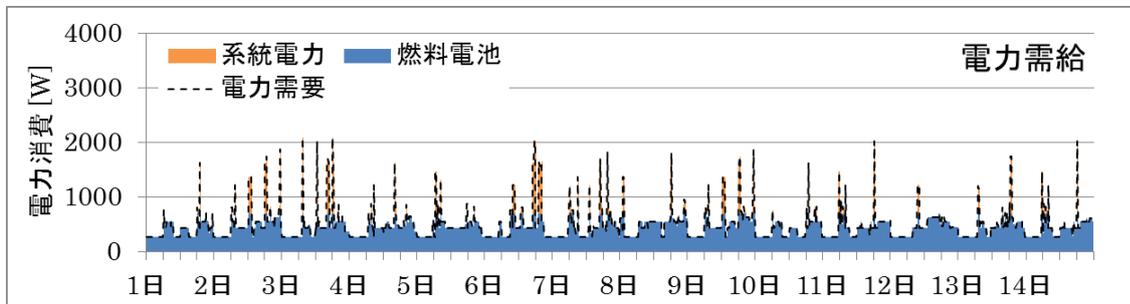


図 A-99 SOFC の運転シミュレーション結果 (子未就学1・中間期(冬寄り))

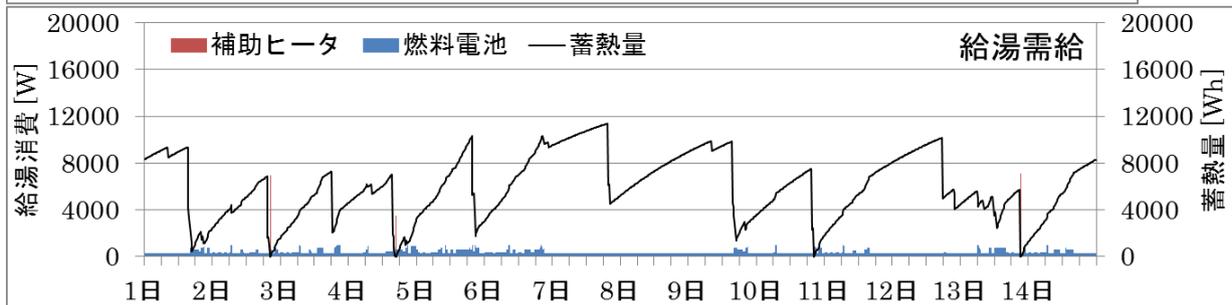
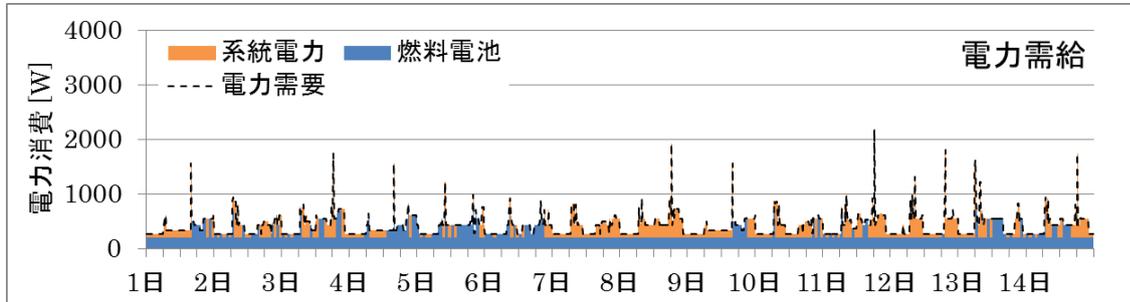


図 A-100 PEFC の運転シミュレーション結果 (子未就学1・中間期(夏寄り))

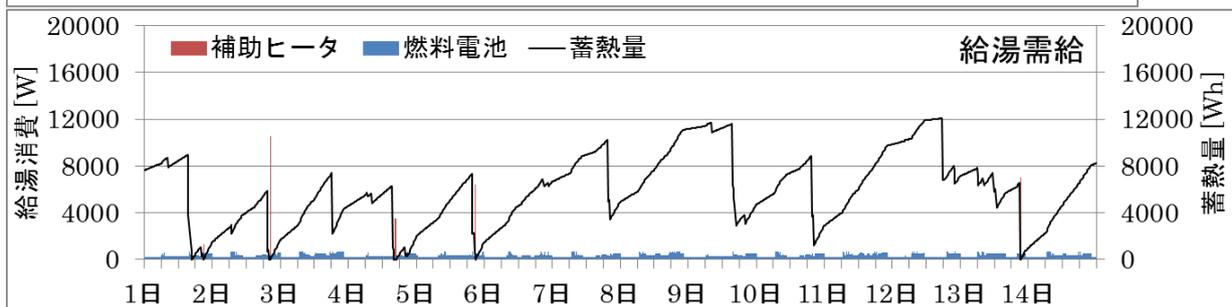
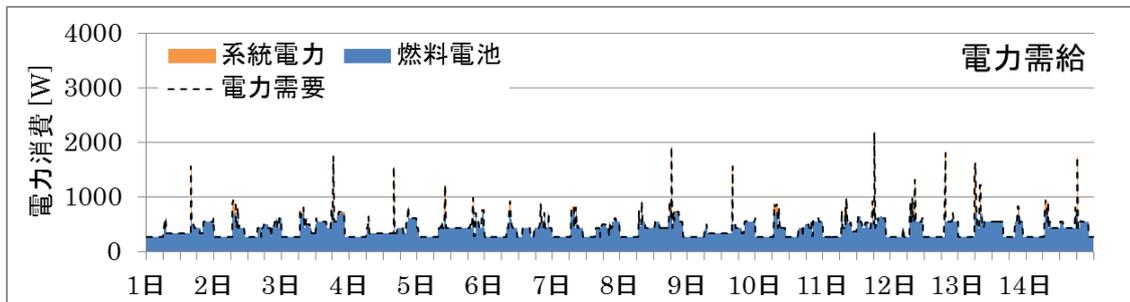


図 A-101 SOFC の運転シミュレーション結果 (子未就学1・中間期(夏寄り))

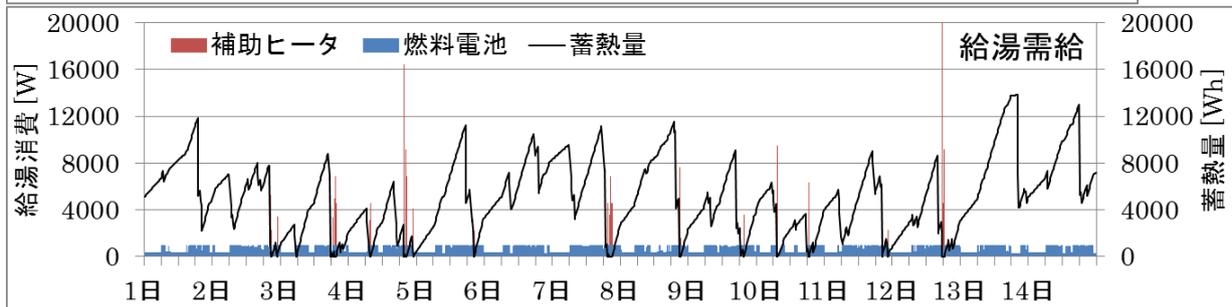
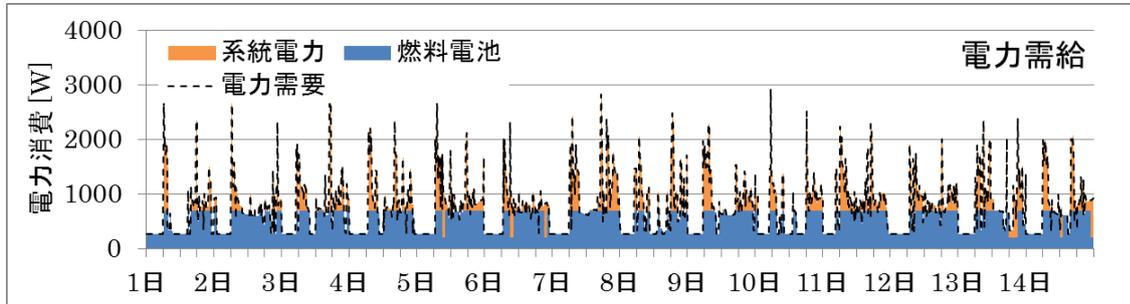


図 A-102 PEFC の運転シミュレーション結果 (子小中学1・冬)

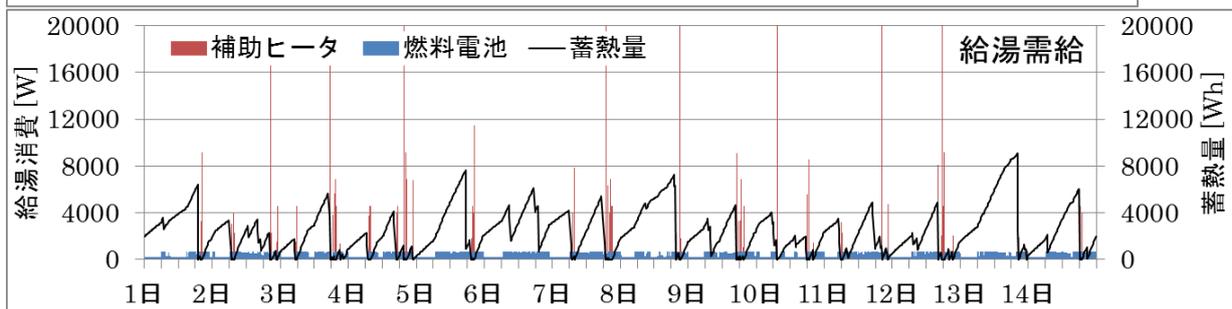
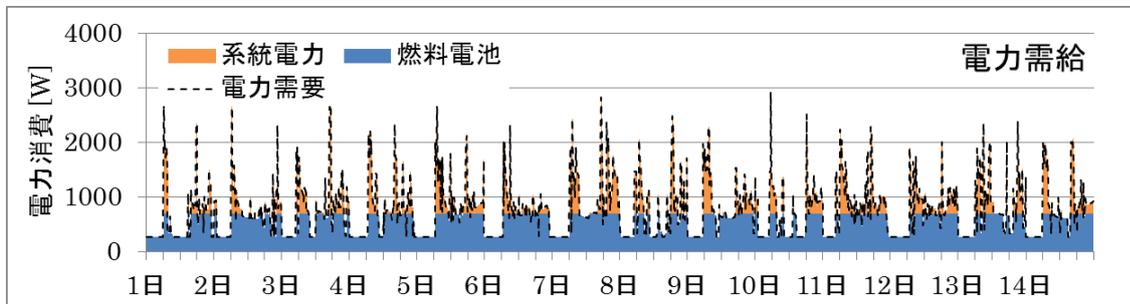


図 A-103 SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学1・冬)

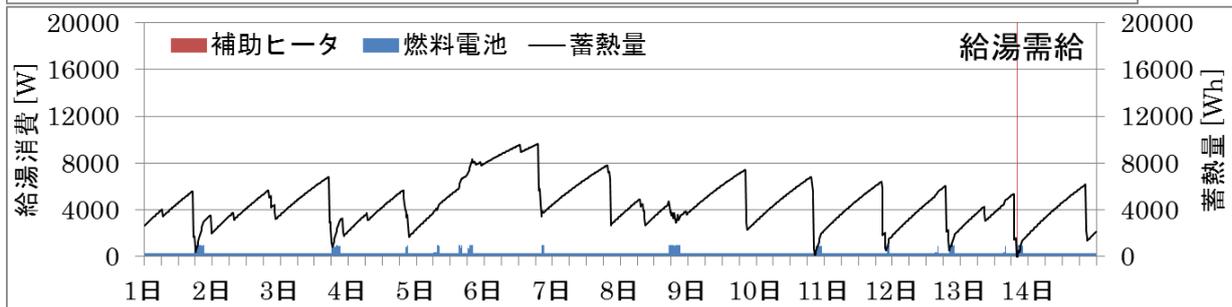
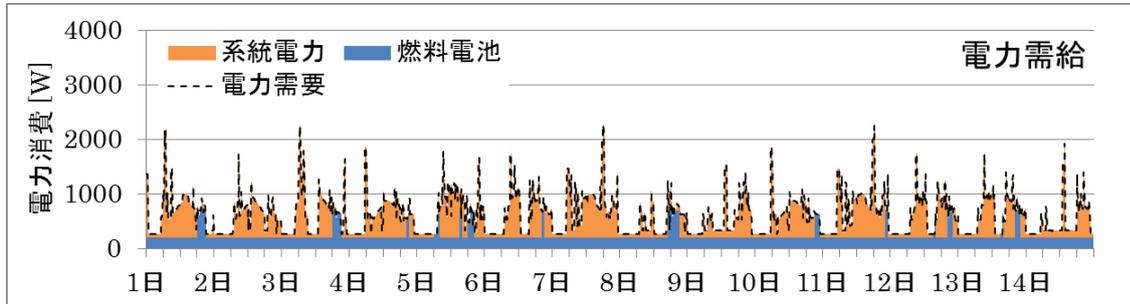


図 A-104 PEFC の運転シミュレーション結果 (子小中学1・夏)

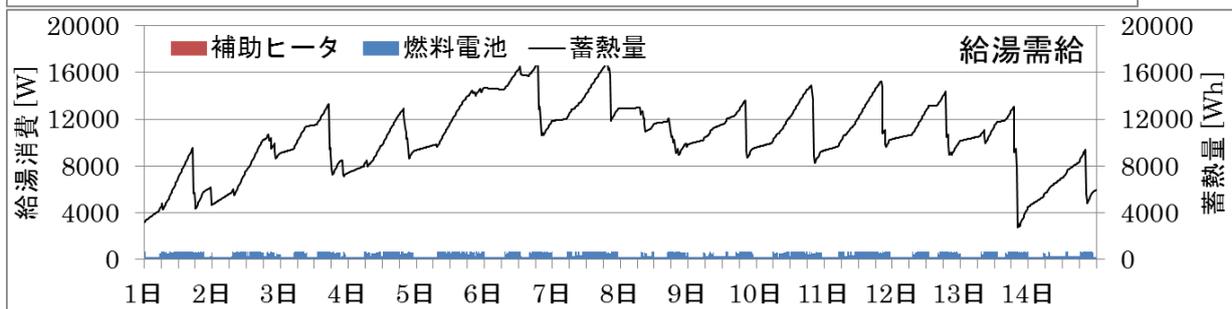
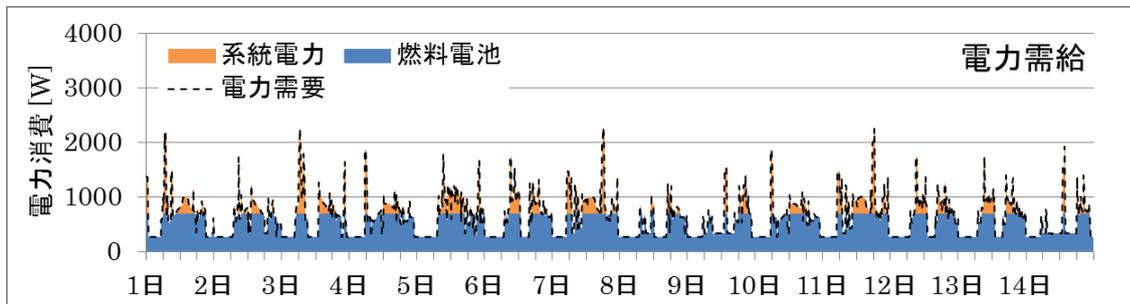


図 A-105 SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学1・夏)

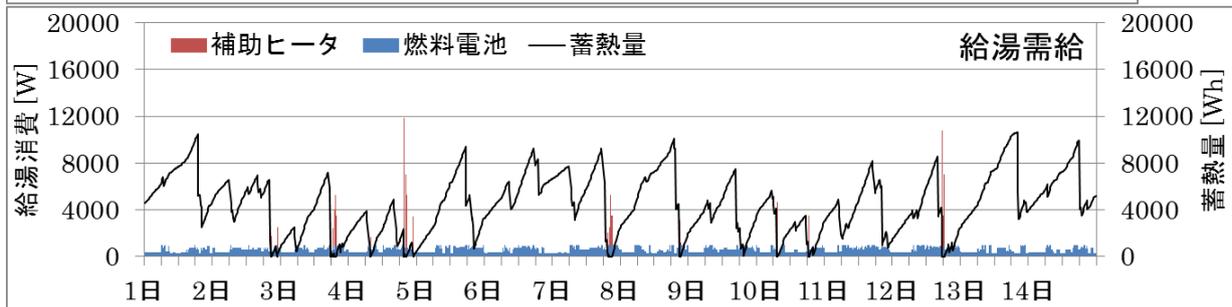
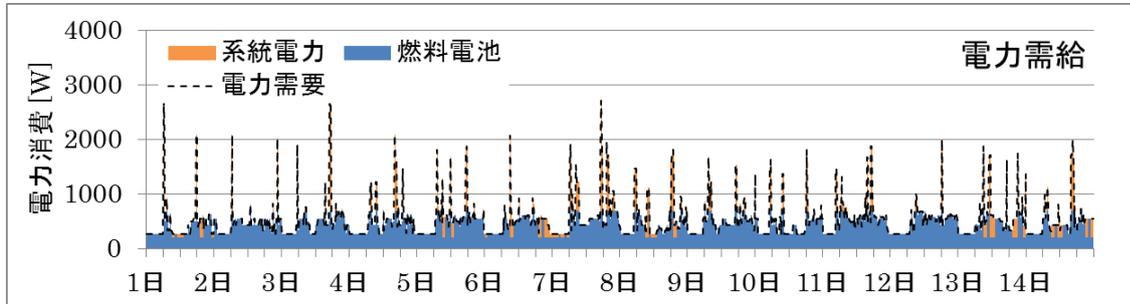


図 A-106 PEMFC の運転シミュレーション結果 (子小中学1・中間期(冬寄り))

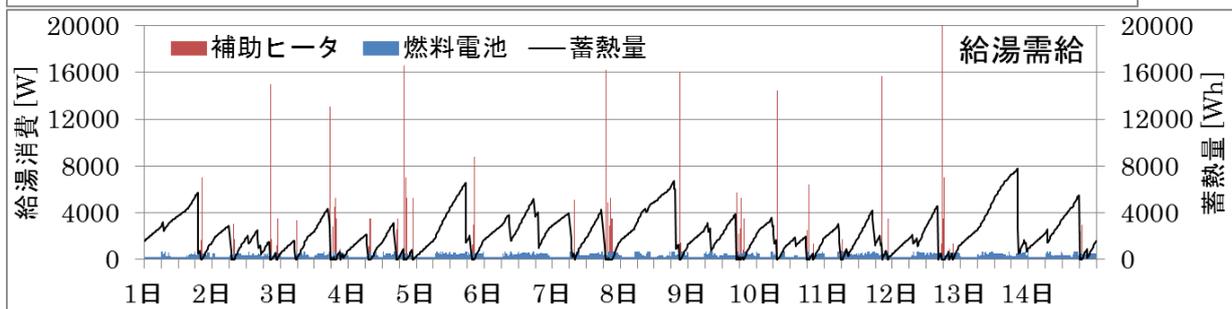
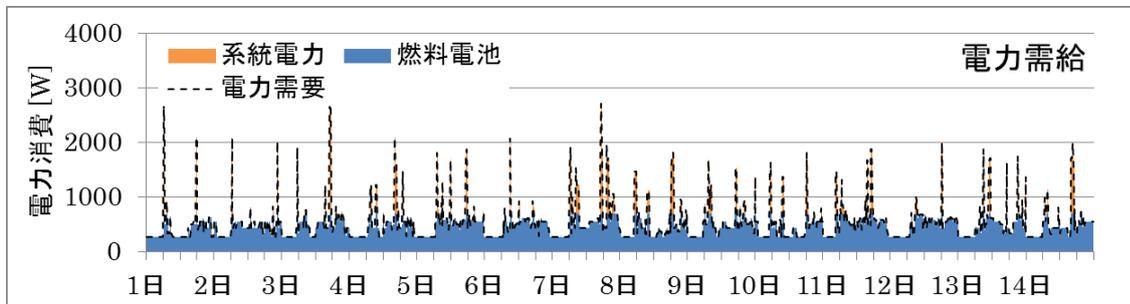


図 A-107 SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学1・中間期(冬寄り))

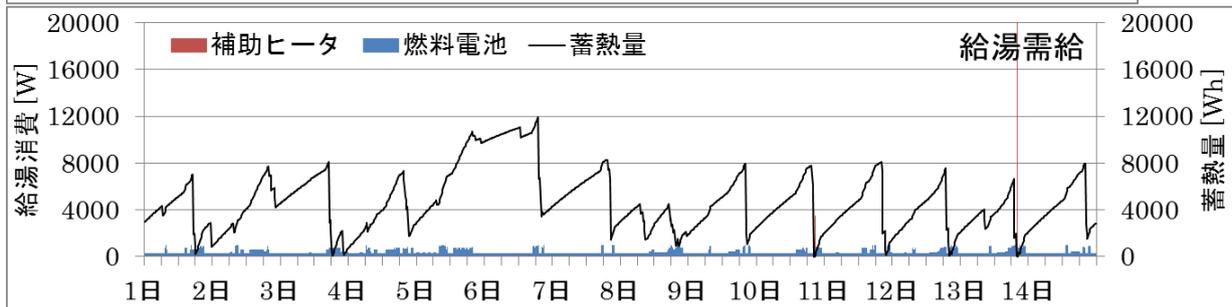
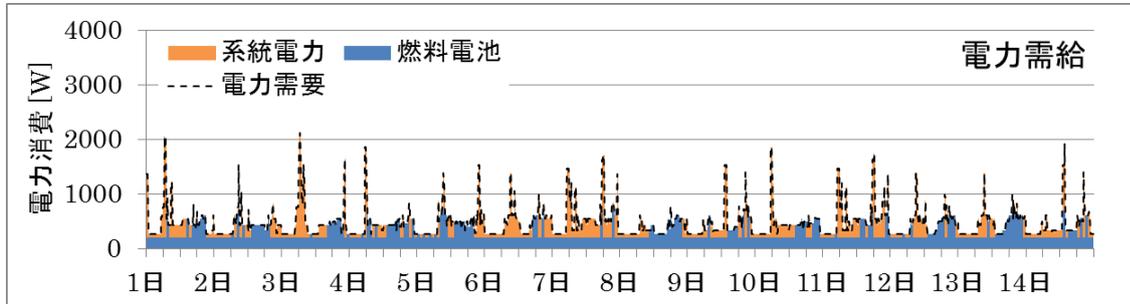


図 A-108 PEFC の運転シミュレーション結果 (子小中学1・中間期(夏寄り))

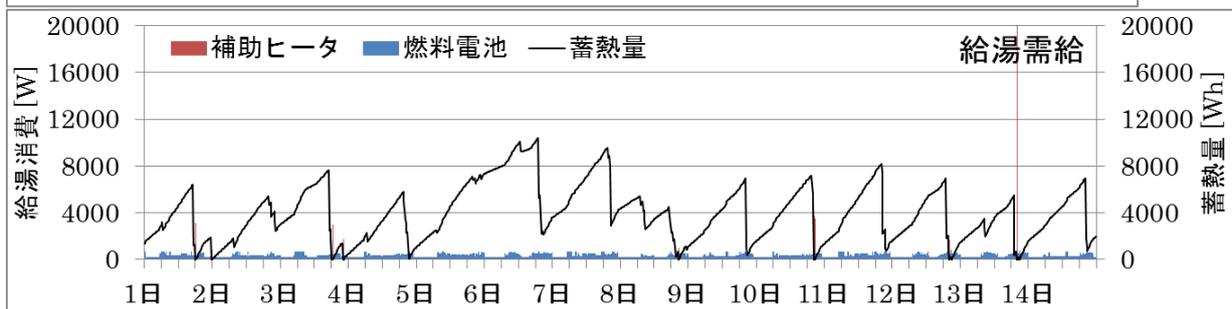
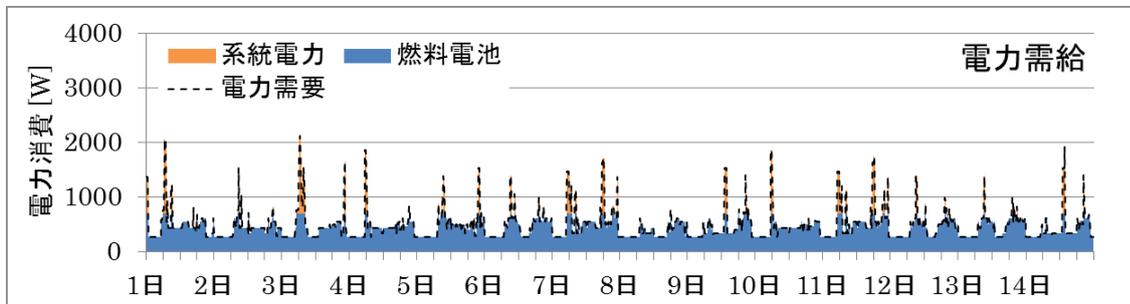


図 A-109 SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学1・中間期(夏寄り))

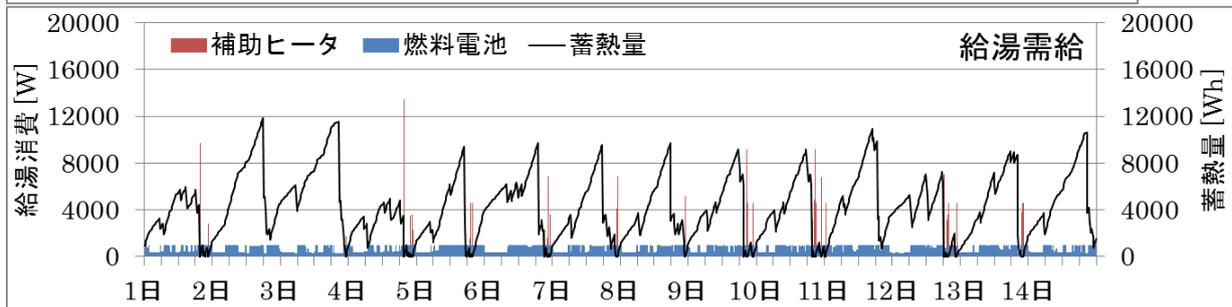
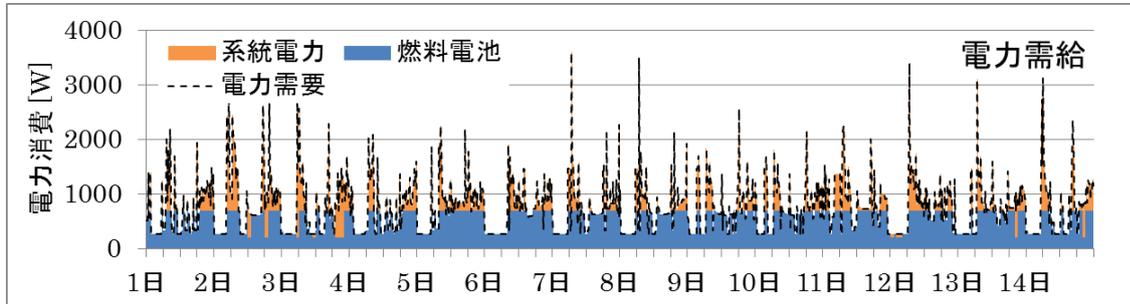


図 A-110 PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学1・冬)

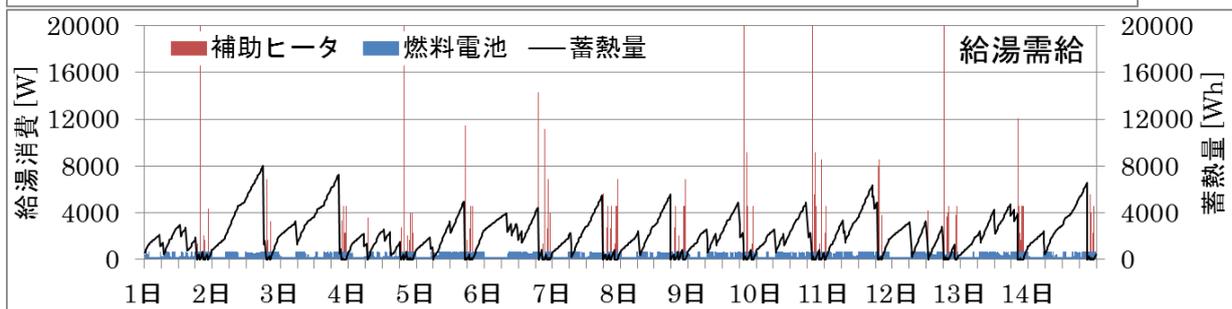
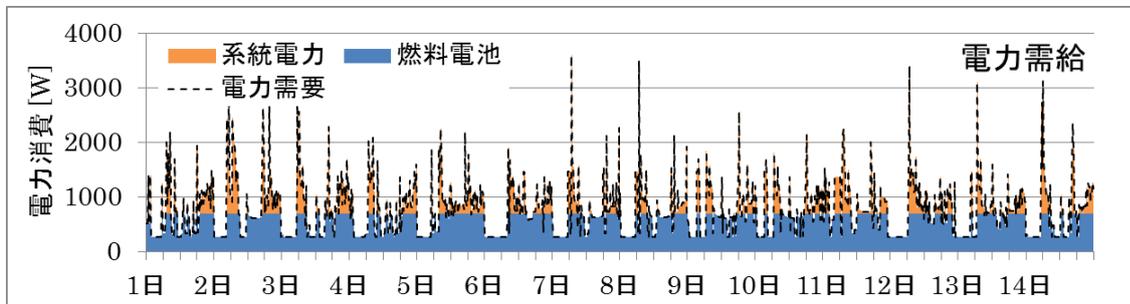


図 A-111 SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学1・冬)

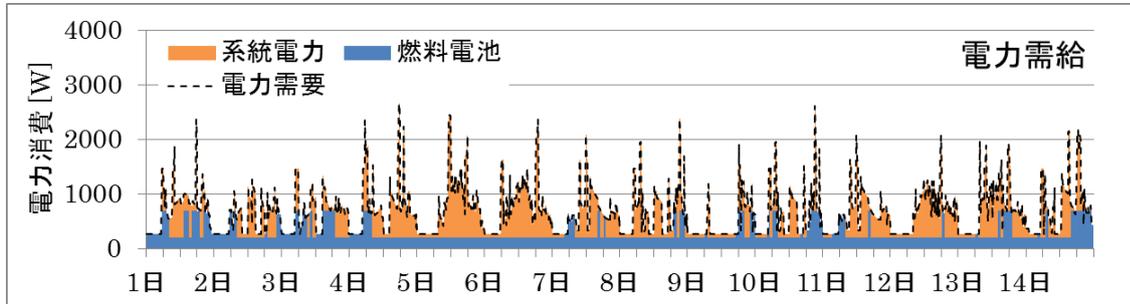


図 A-112 PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学1・夏)

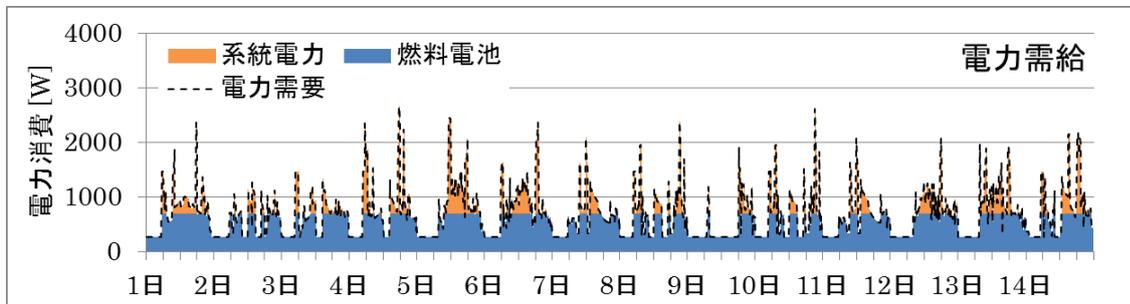


図 A-113 SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学1・夏)

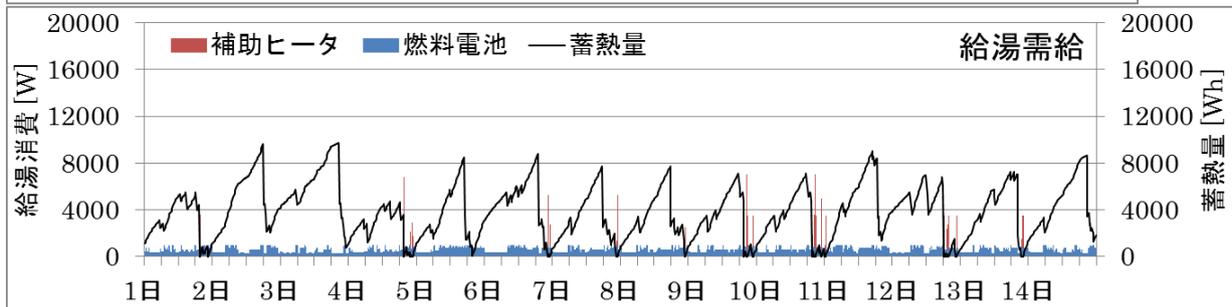
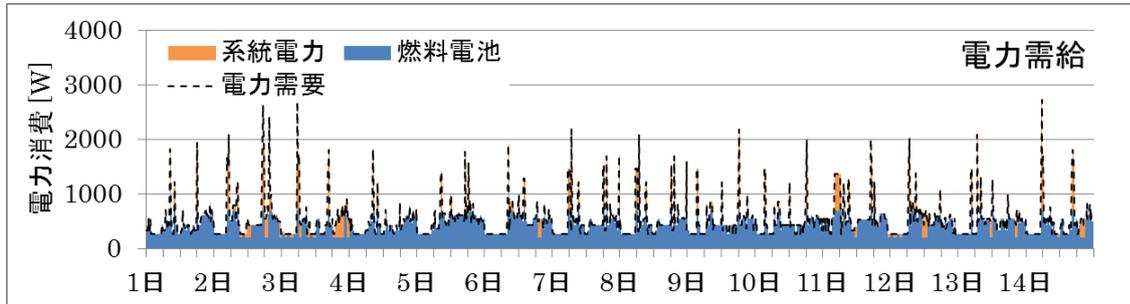


図 A-114 PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学1・中間期(冬寄り))

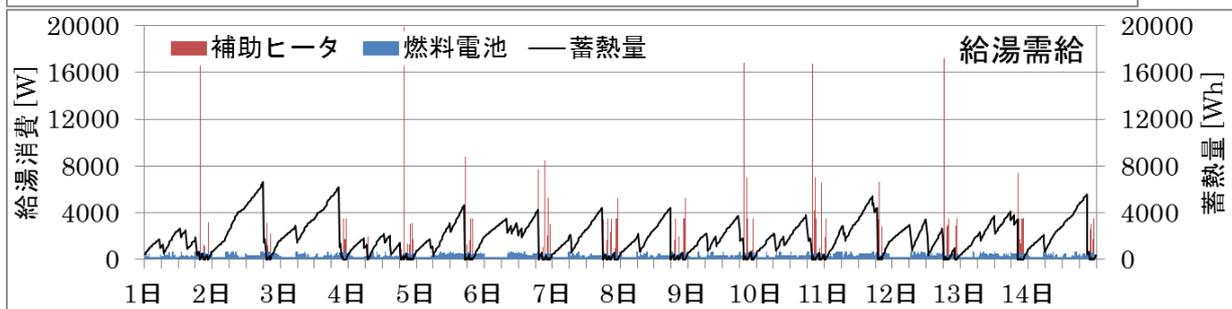
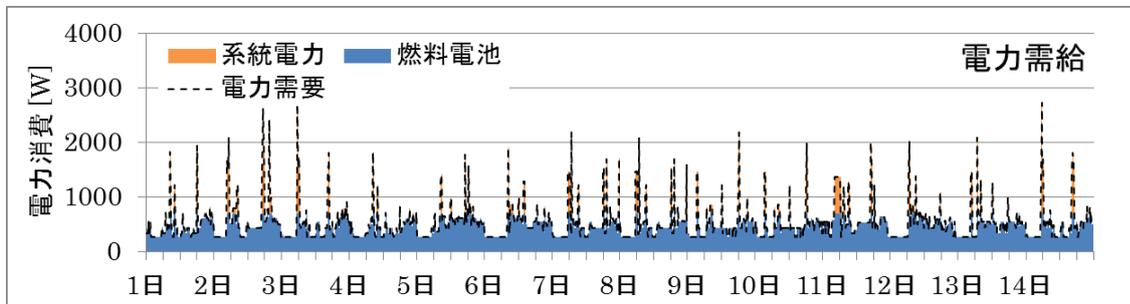


図 A-115 SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学1・中間期(冬寄り))

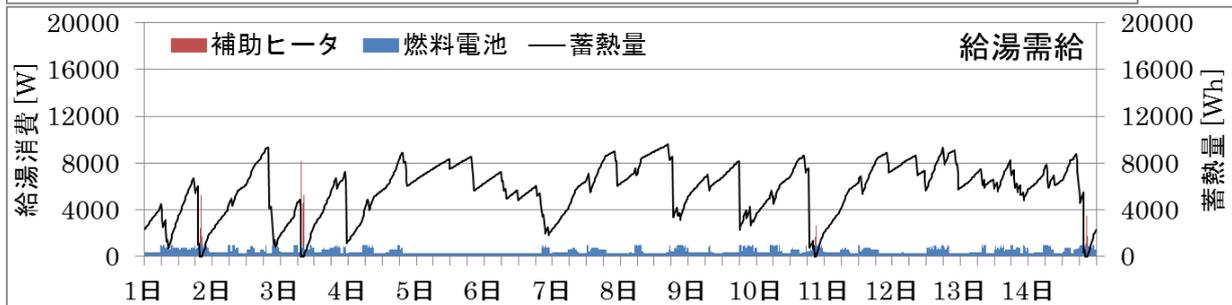
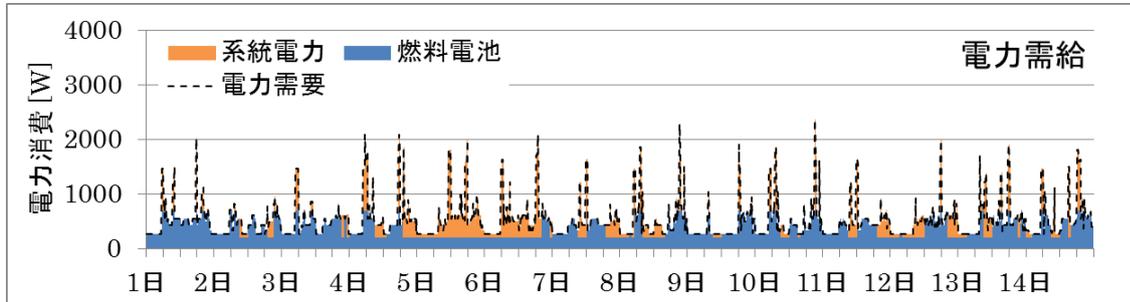


図 A-116 PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学1・中間期(夏寄り))

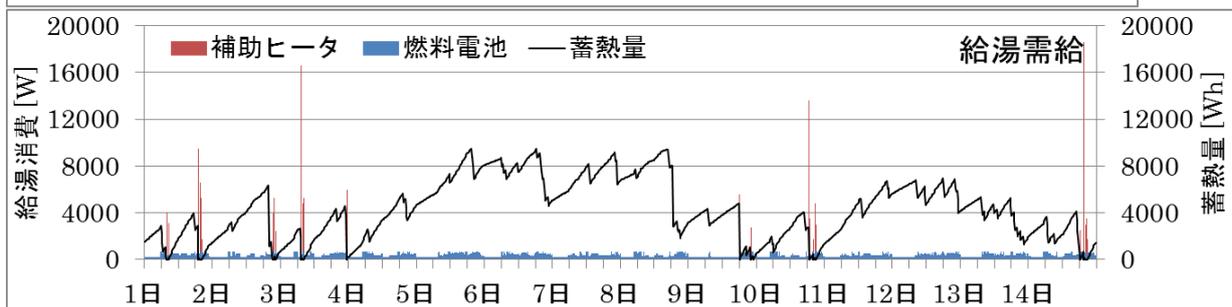
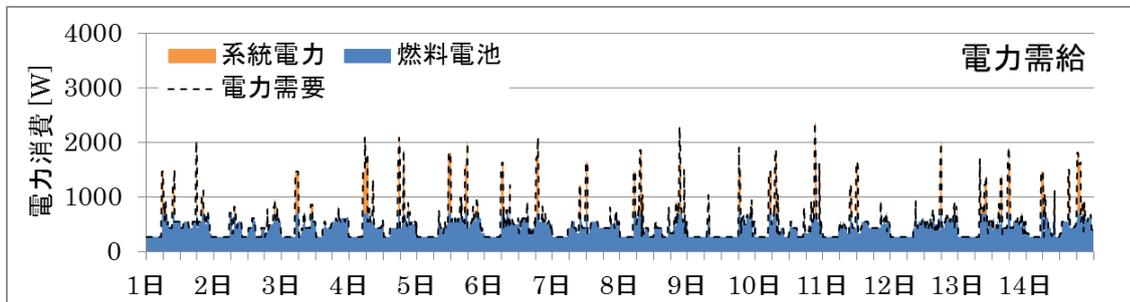


図 A-117 SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学1・中間期(夏寄り))

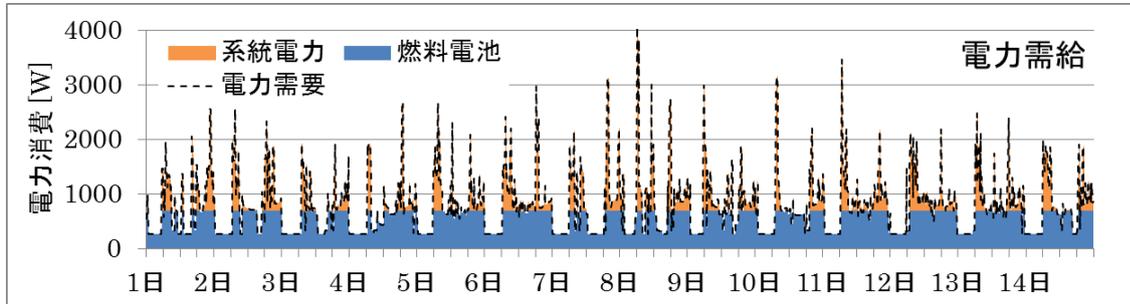


図 A-118 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人1・冬)

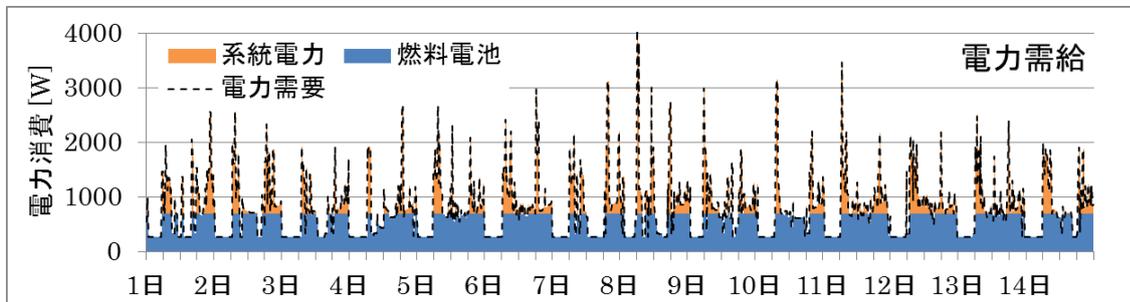


図 A-119 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人1・冬)

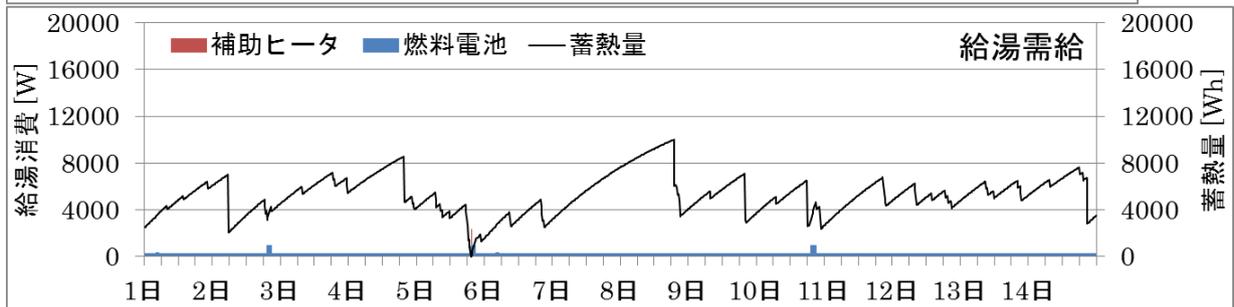
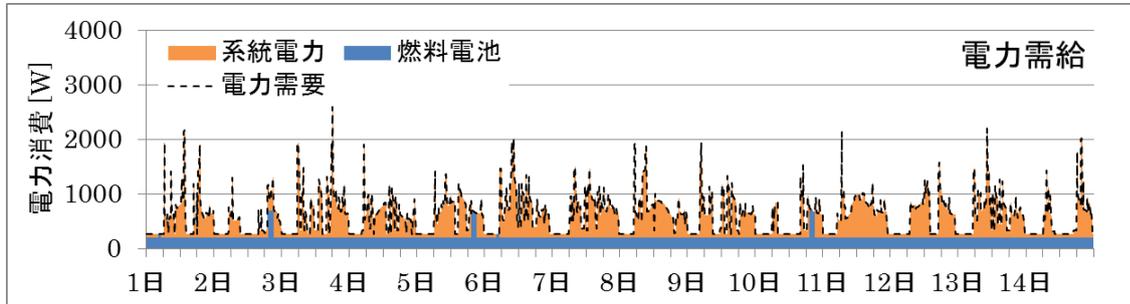


図 A-120 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人1・夏)

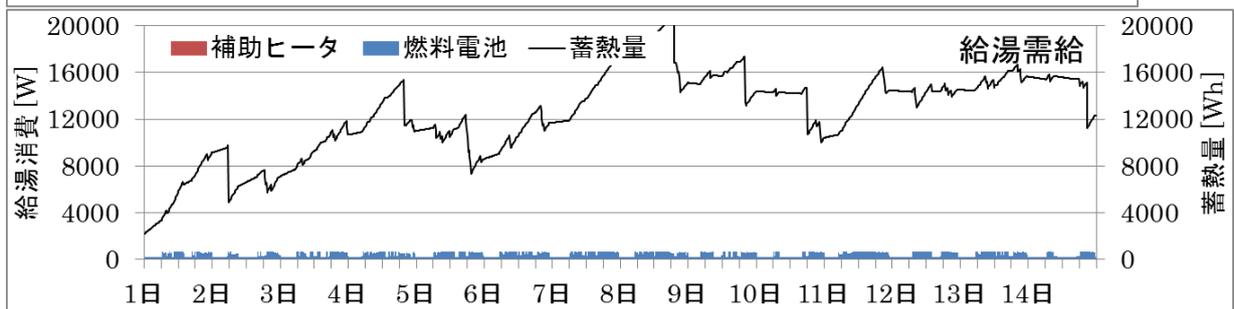
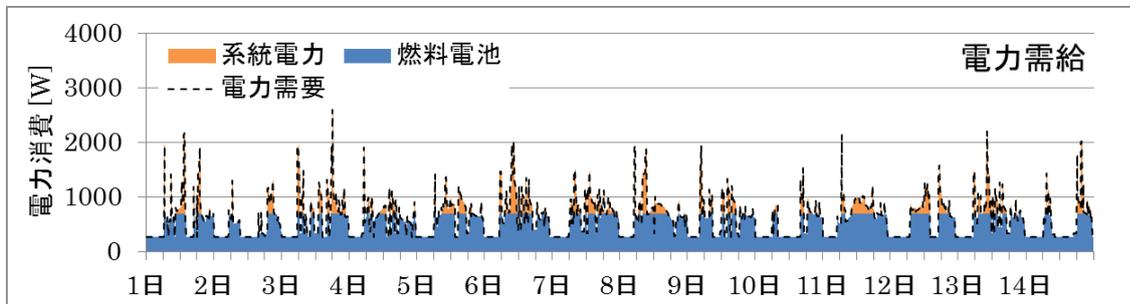


図 A-121 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人1・夏)

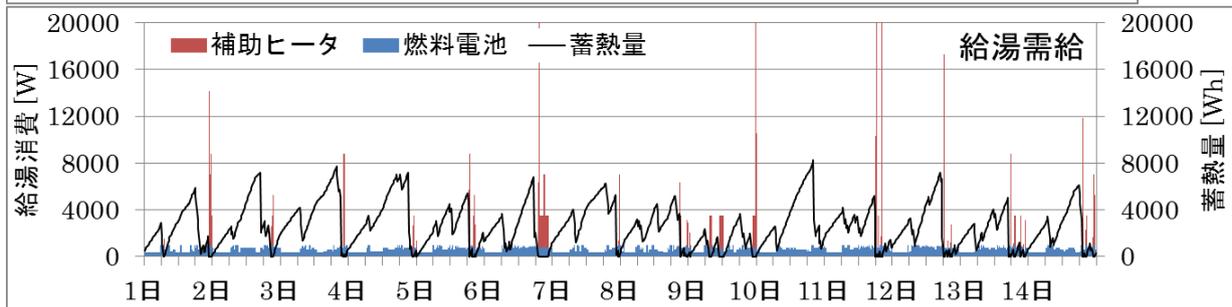
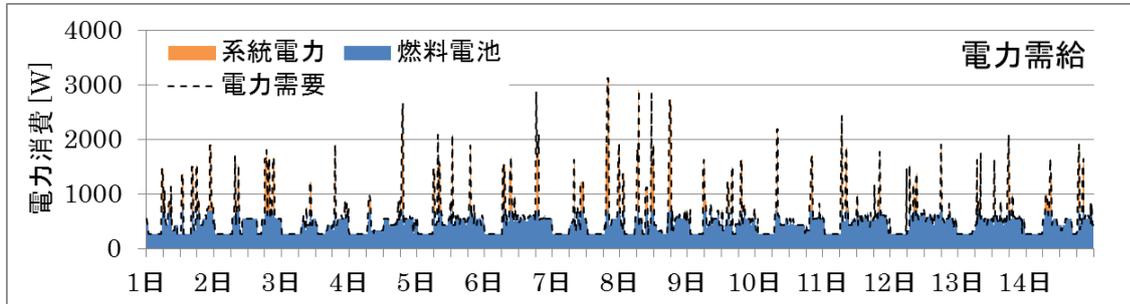


図 A-122 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人1・中間期(冬寄り))

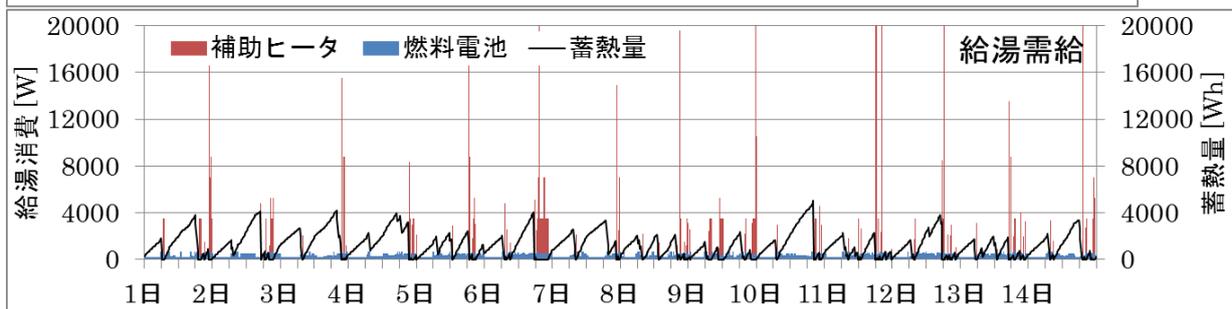
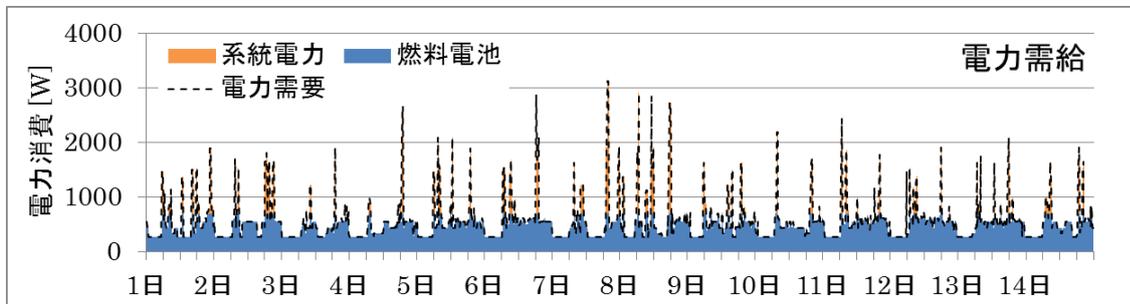


図 A-123 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人1・中間期(冬寄り))

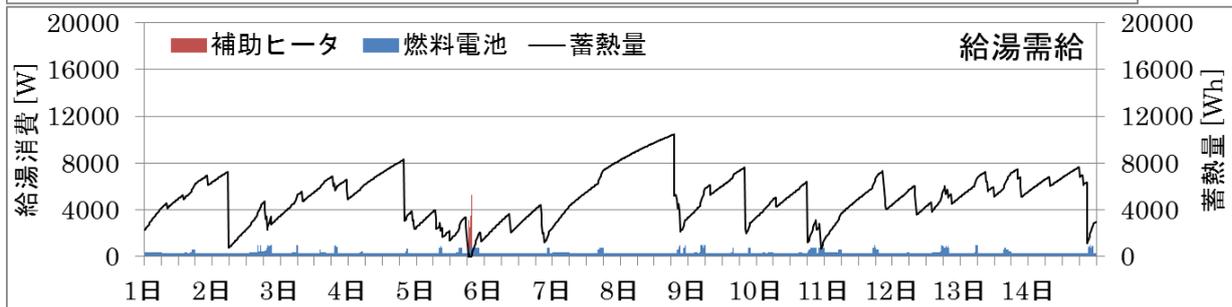
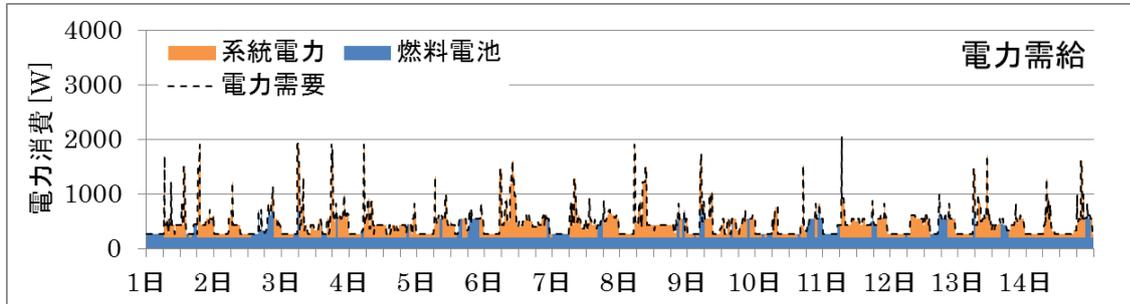


図 A-124 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人1・中間期(夏寄り))

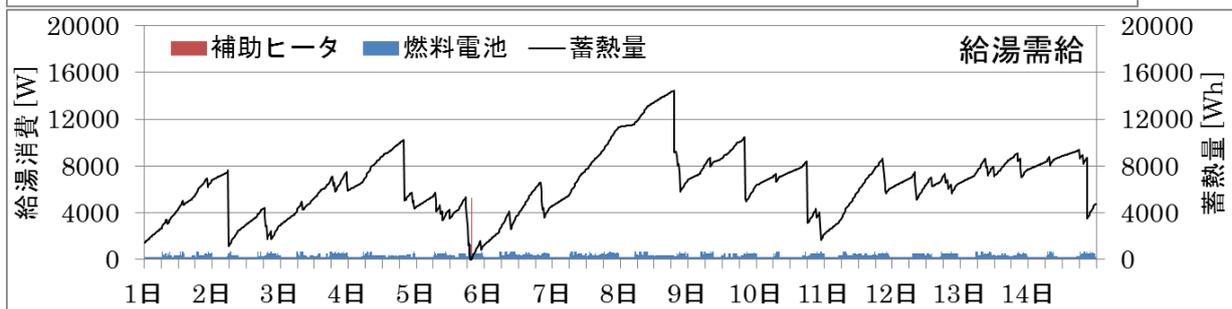
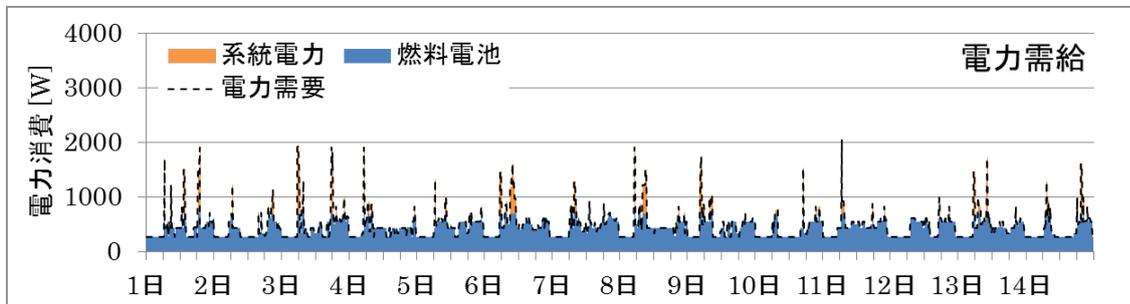


図 A-125 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人1・中間期(夏寄り))

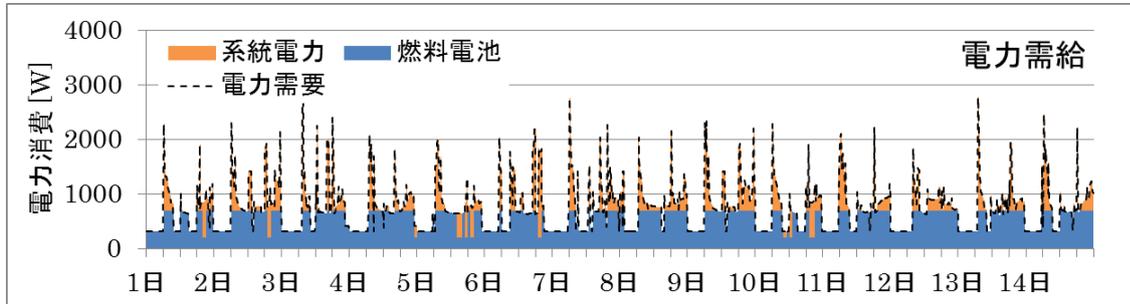


図 A-126 PEFC の運転シミュレーション結果 (子未就学2・冬)

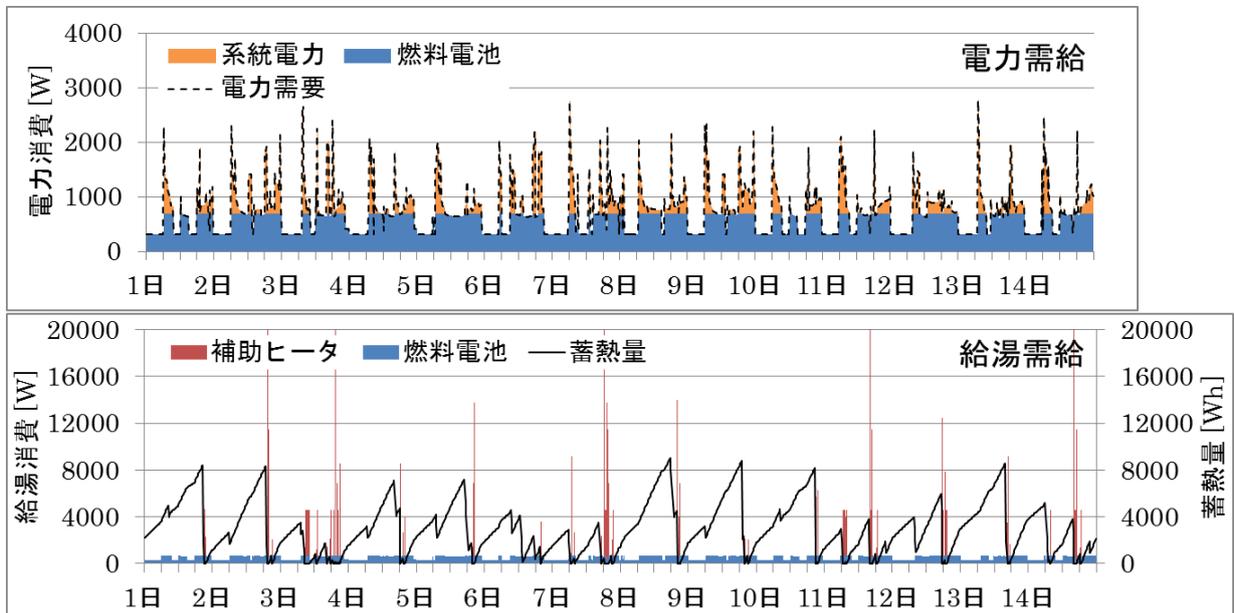


図 A-127 SOFC の運転シミュレーション結果 (子未就学2・冬)

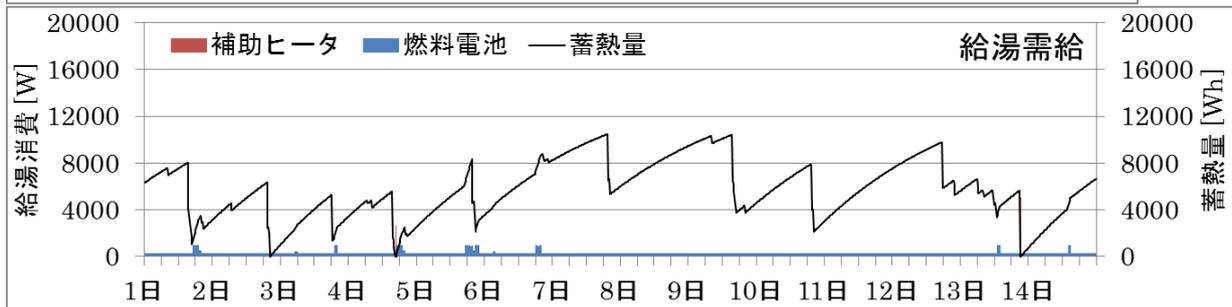
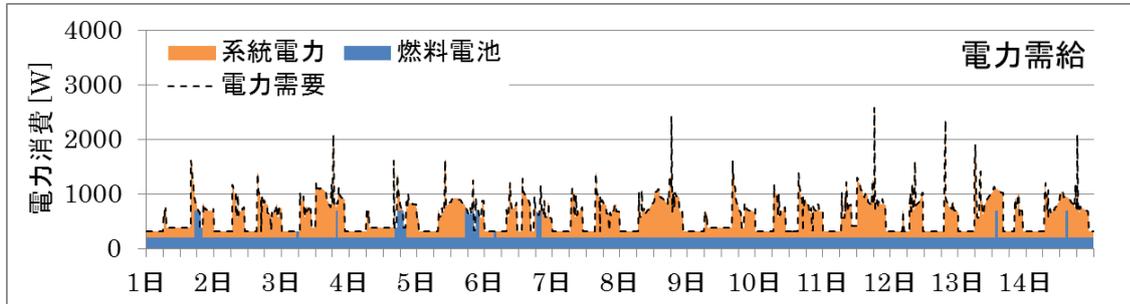


図 A-128 PEFC の運転シミュレーション結果 (子未就学2・夏)

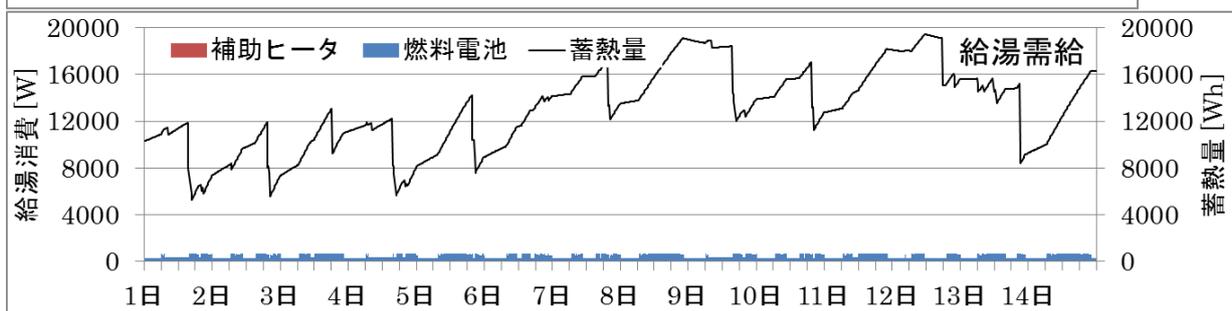
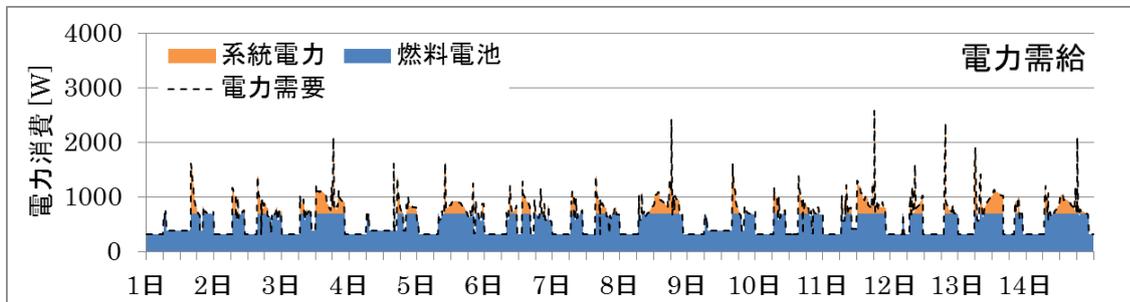


図 A-129 SOFC の運転シミュレーション結果 (子未就学2・夏)

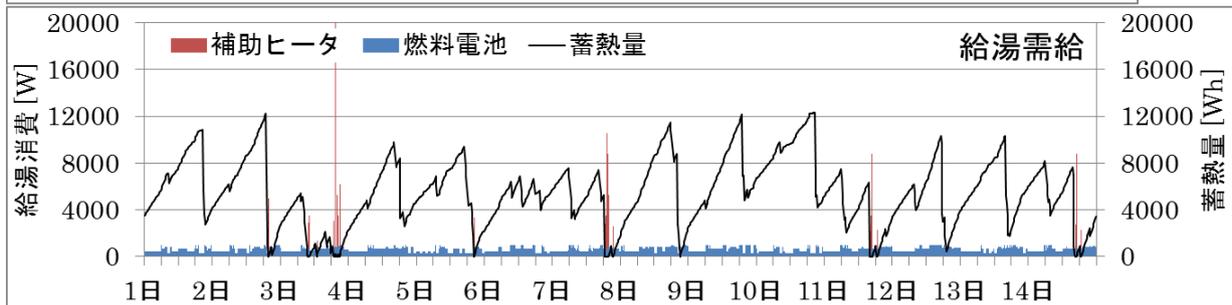
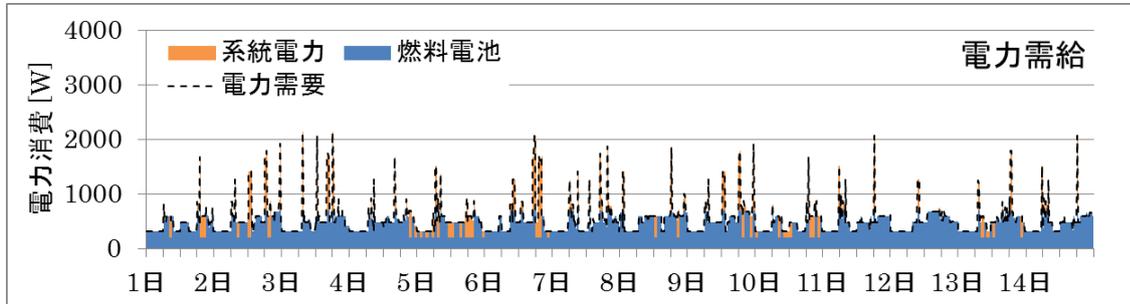


図 A-130 PEFC の運転シミュレーション結果 (子未就学2・中間期(冬寄り))

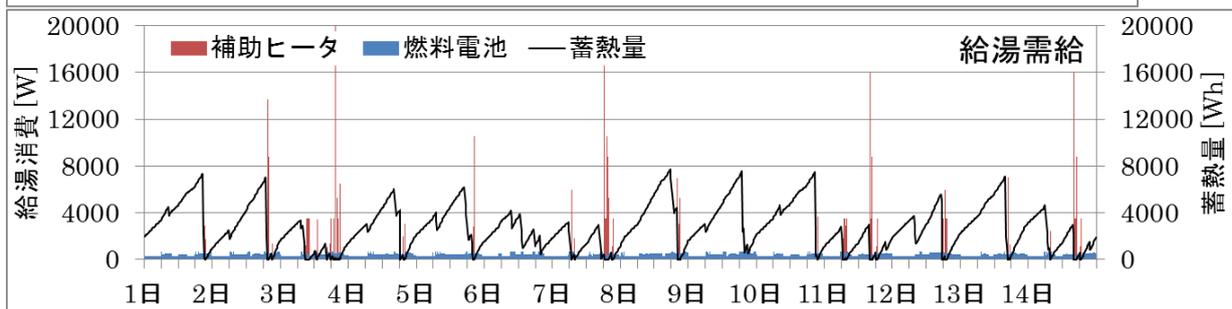
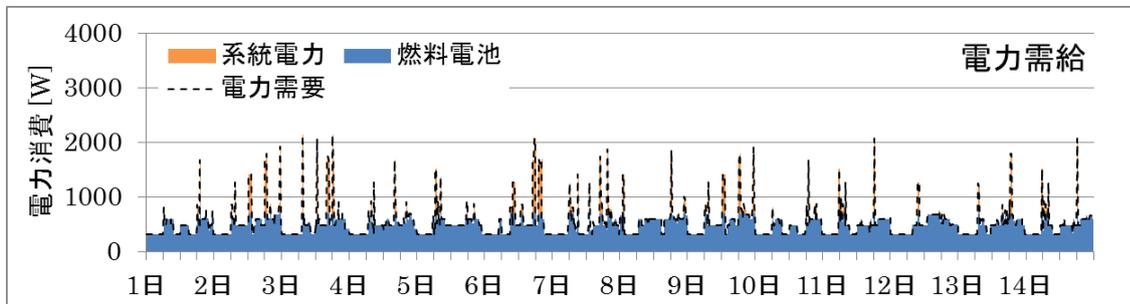


図 A-131 SOFC の運転シミュレーション結果 (子未就学2・中間期(冬寄り))

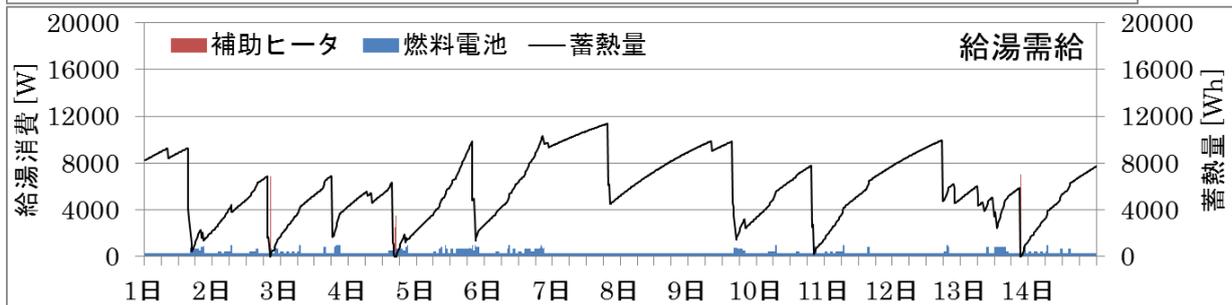
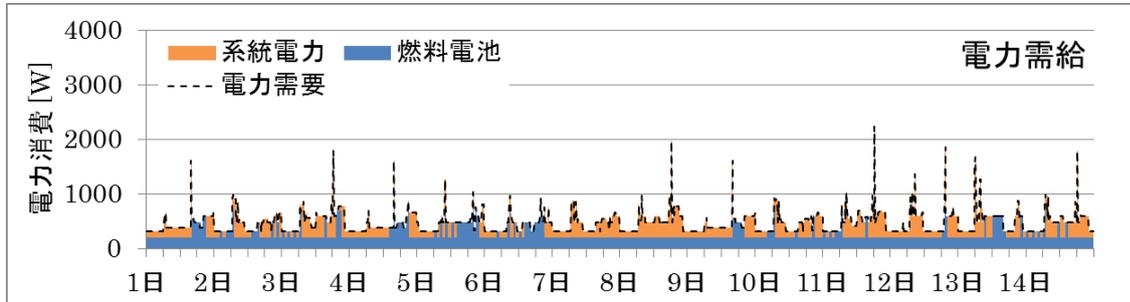


図 A-132 PEFC の運転シミュレーション結果 (子未就学2・中間期(夏寄り))

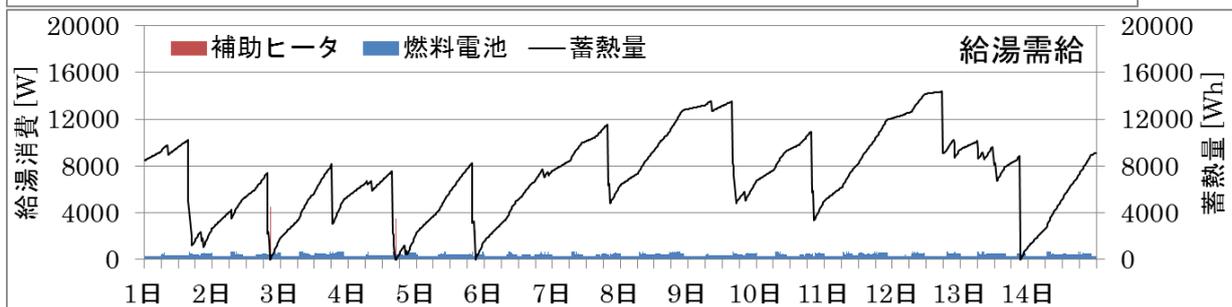
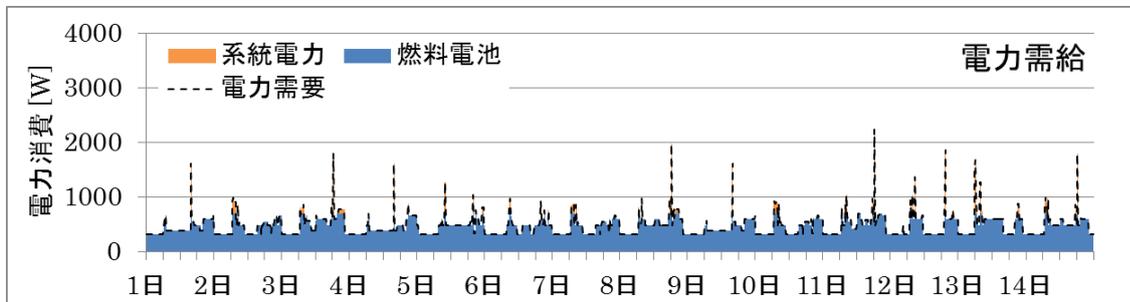


図 A-133 SOFC の運転シミュレーション結果 (子未就学2・中間期(夏寄り))

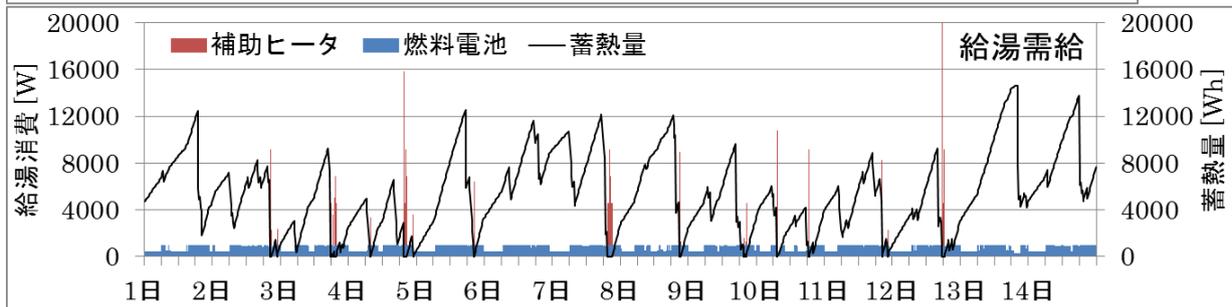
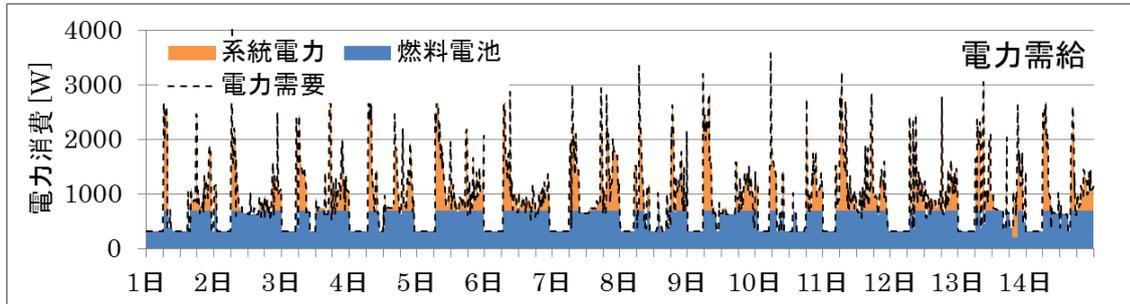


図 A-134 PEFC の運転シミュレーション結果 (子小中学2・冬)

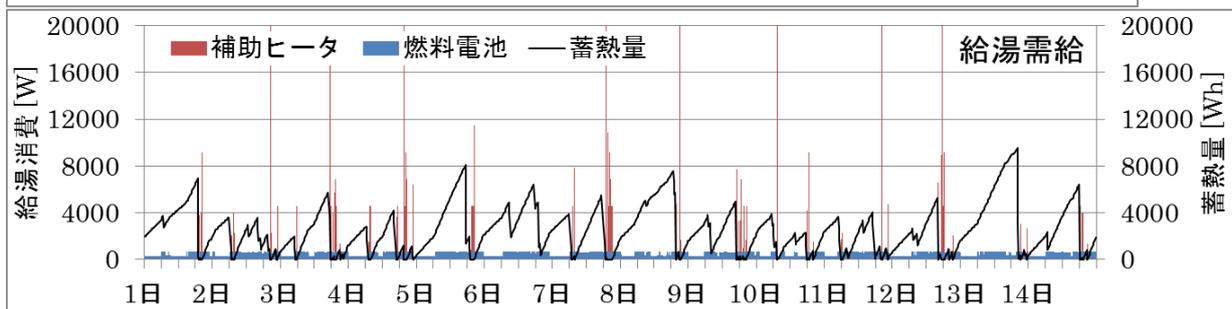
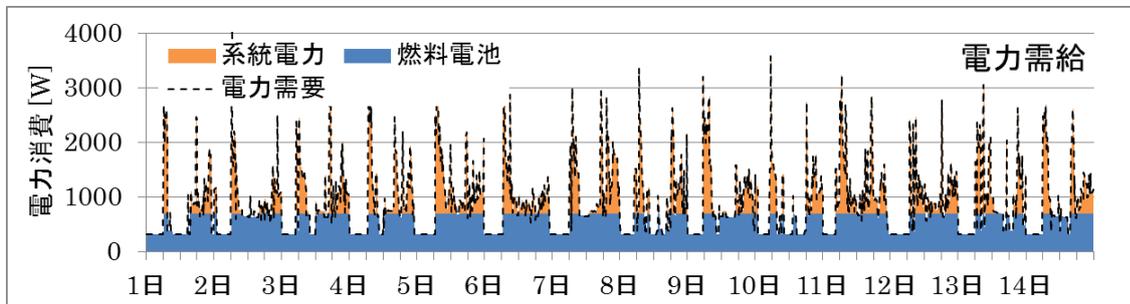


図 A-135 SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学2・冬)

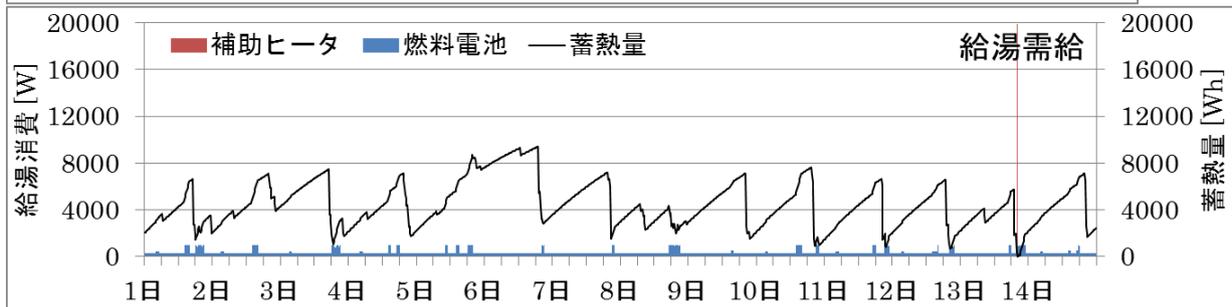
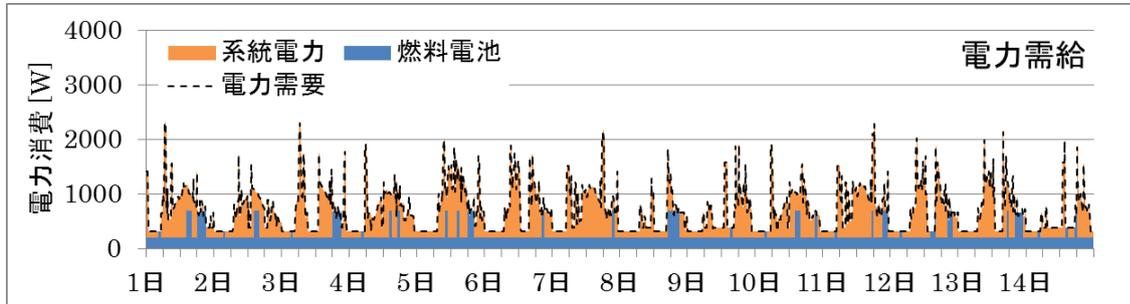


図 A-136 PEFC の運転シミュレーション結果 (子小中学2・夏)

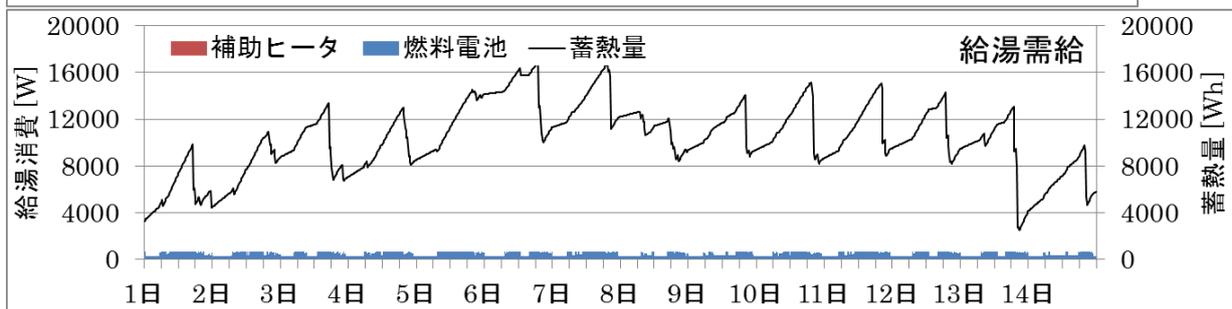
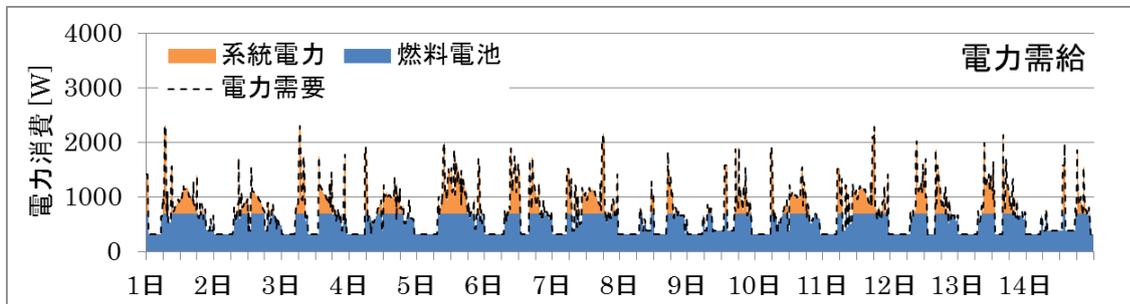


図 A-137 SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学2・夏)

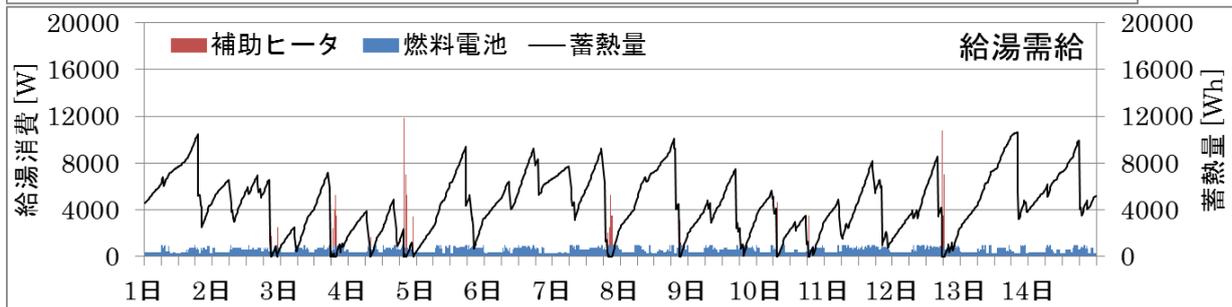
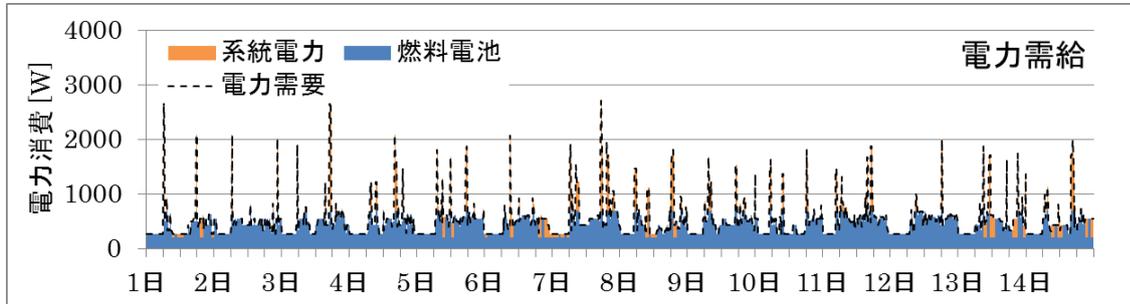


図 A-138 PEMFC の運転シミュレーション結果 (子小中学2・中間期(冬寄り))

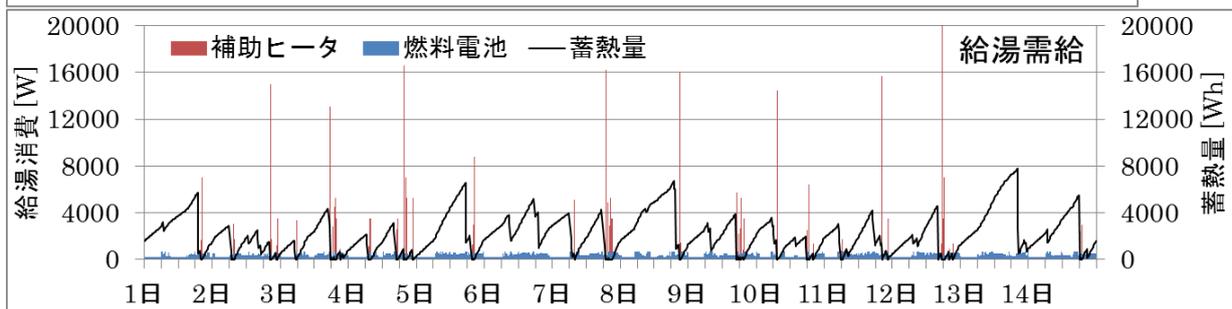
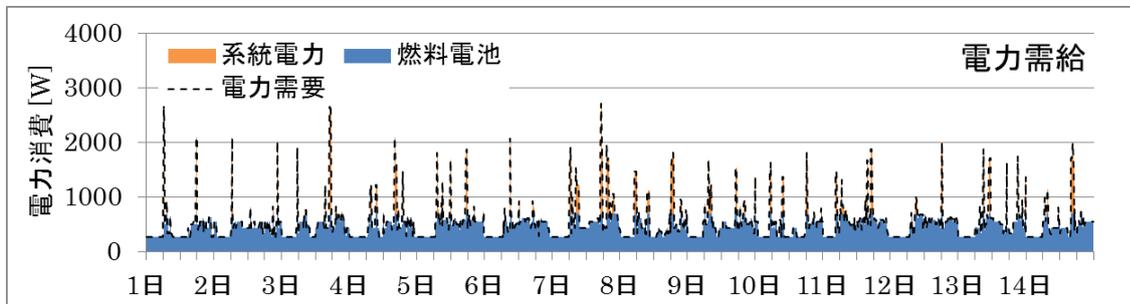


図 A-139 SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学2・中間期(冬寄り))

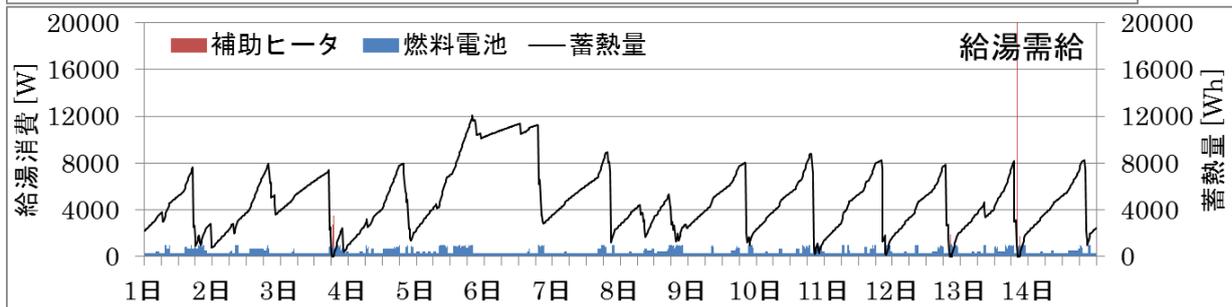
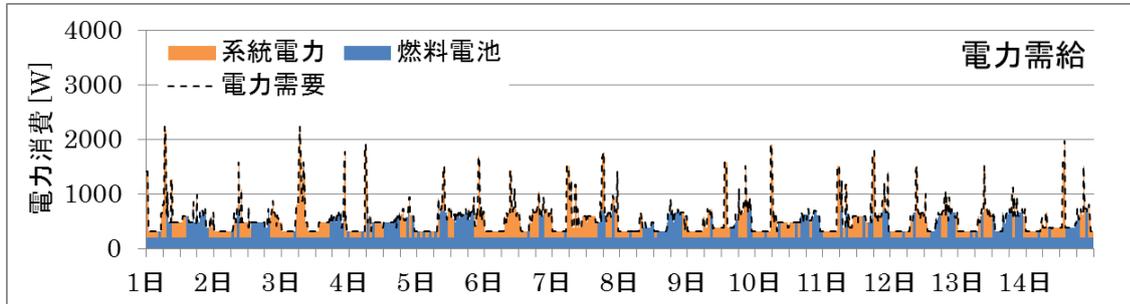


図 A-140 PEFC の運転シミュレーション結果 (子小中学2・中間期(夏寄り))

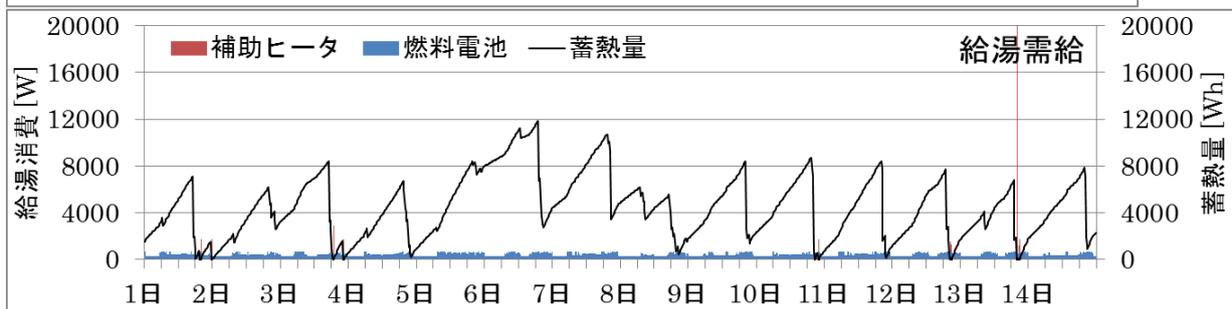
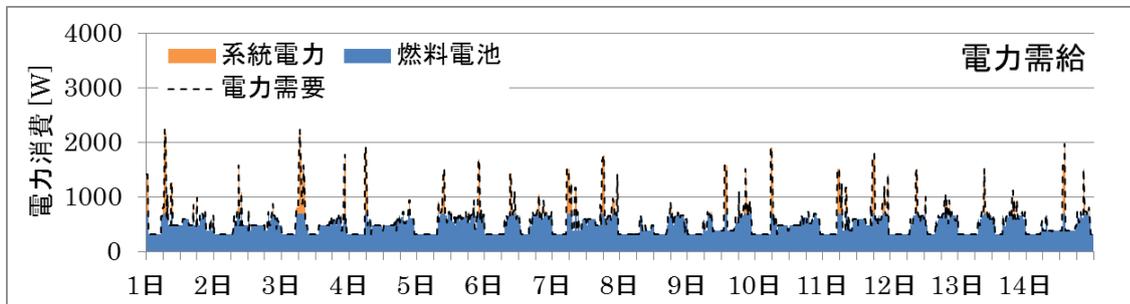


図 A-141 SOFC の運転シミュレーション結果 (子小中学2・中間期(夏寄り))

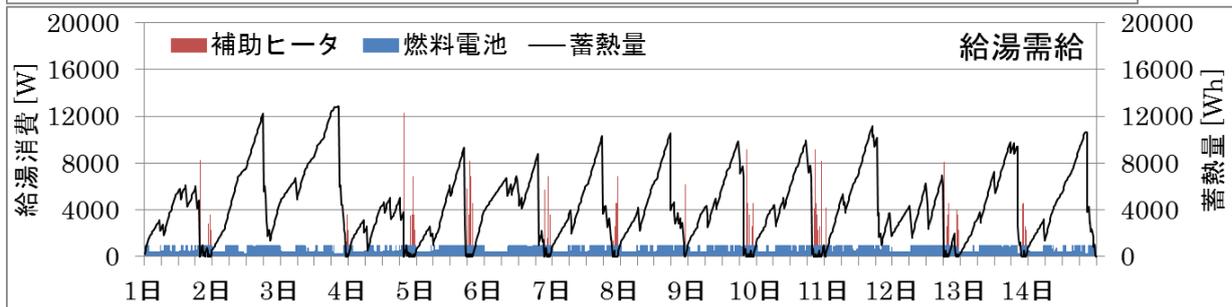
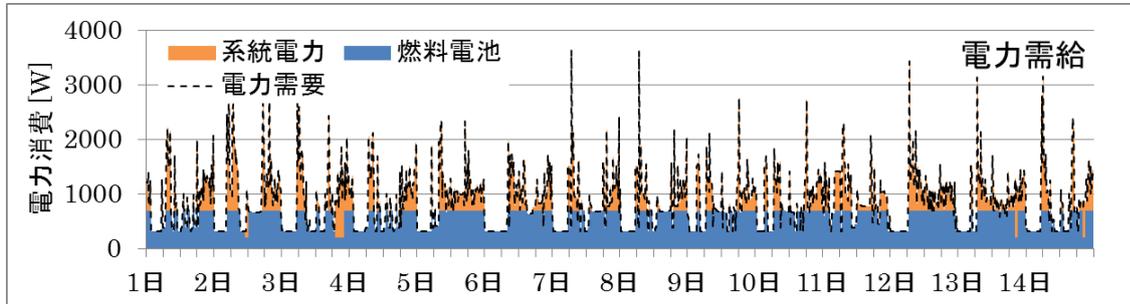


図 A-142 PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学2・冬)

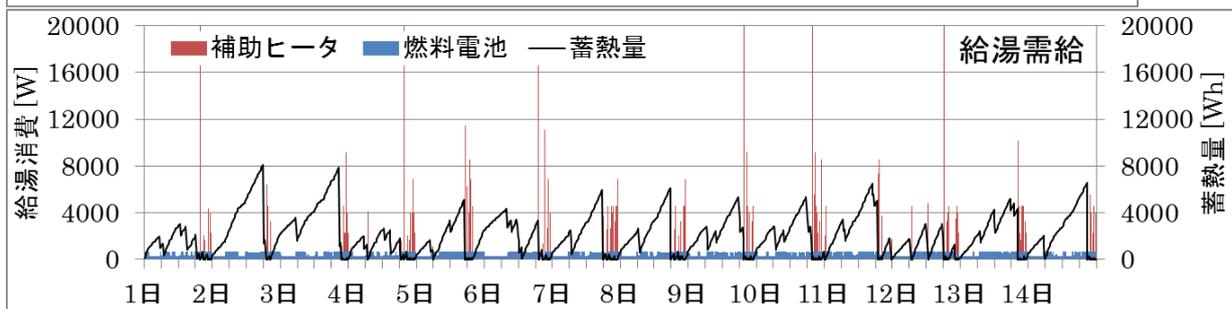
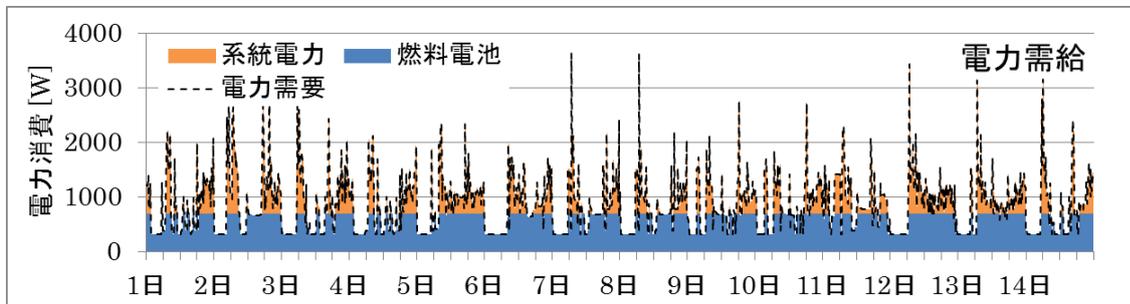


図 A-143 SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学2・冬)

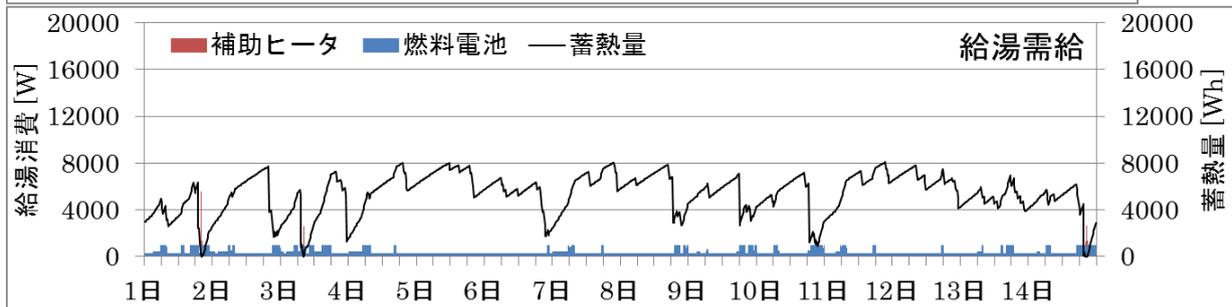
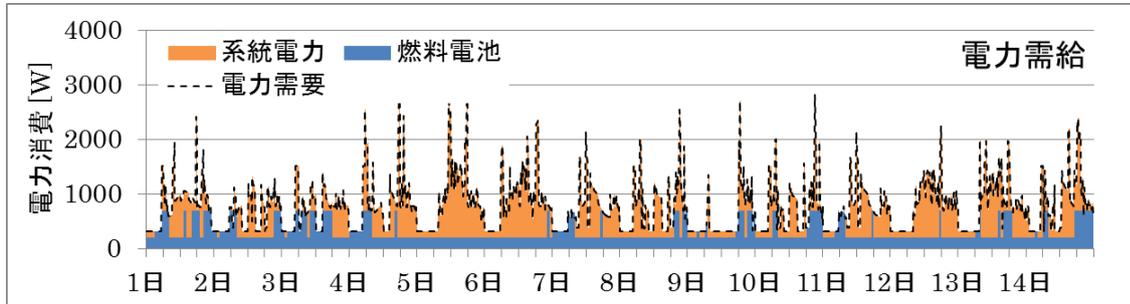


図 A-144 PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学2・夏)

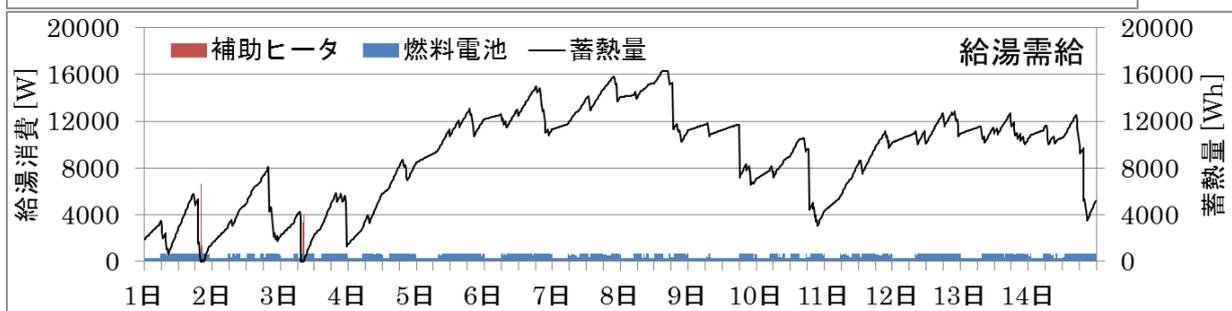
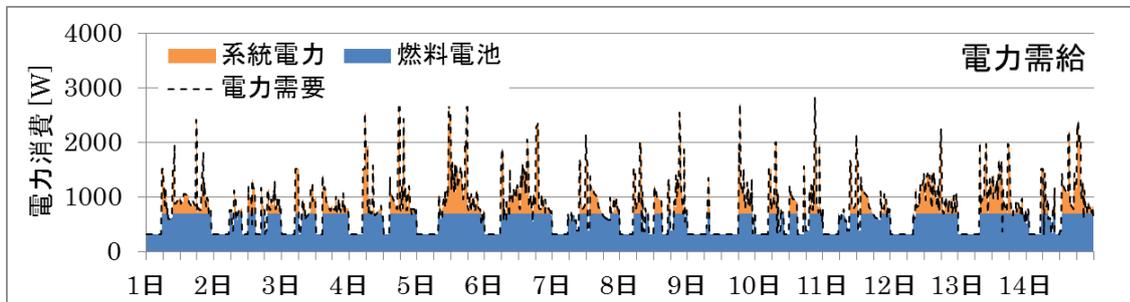


図 A-145 SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学2・夏)

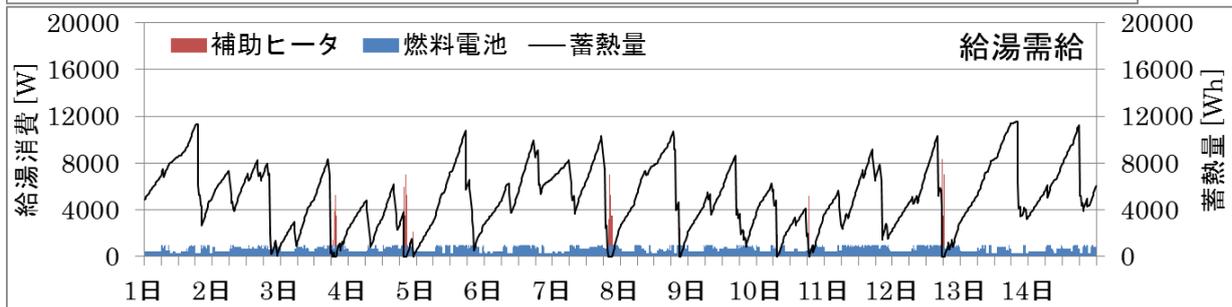
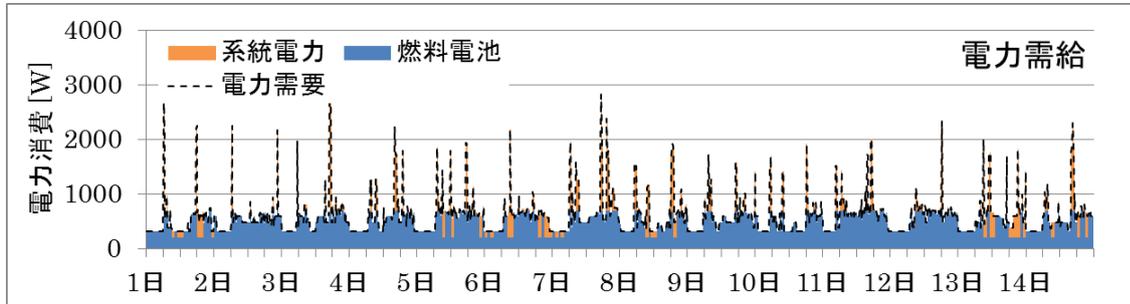


図 A-146 PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学2・中間期(冬寄り))

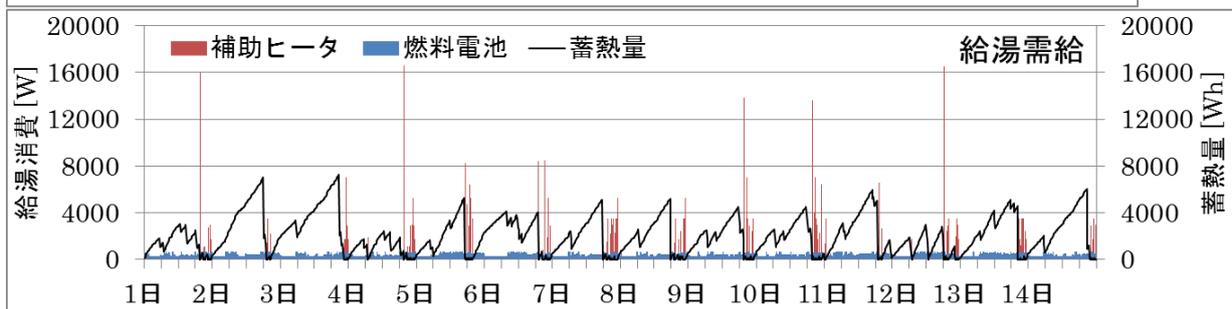
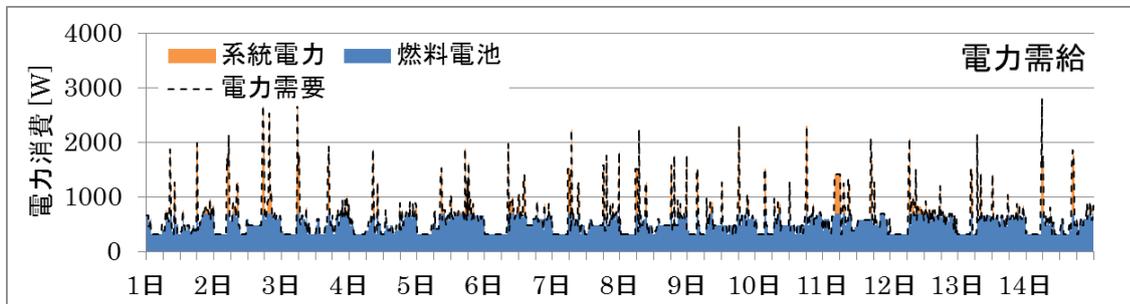


図 A-147 SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学2・中間期(冬寄り))

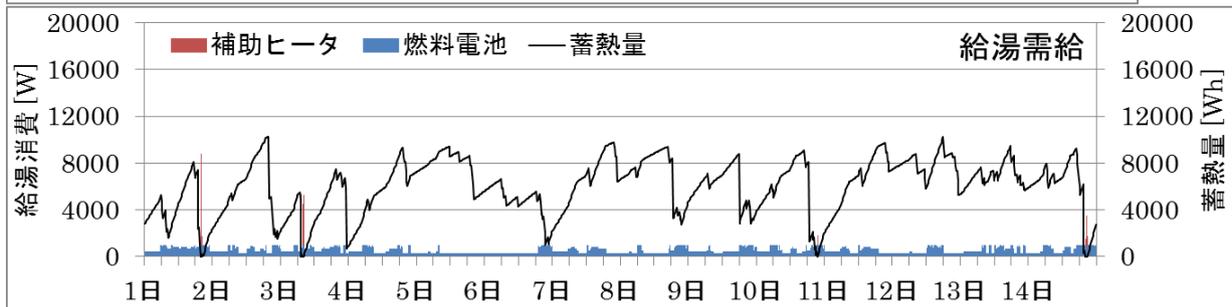
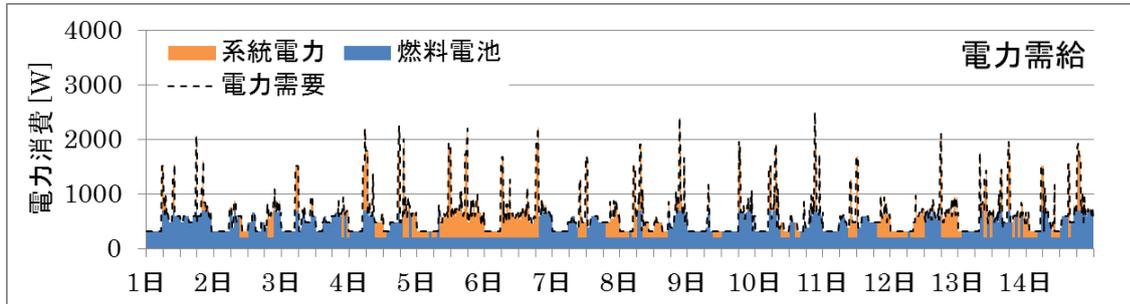


図 A-148 PEFC の運転シミュレーション結果 (子高大学2・中間期(夏寄り))

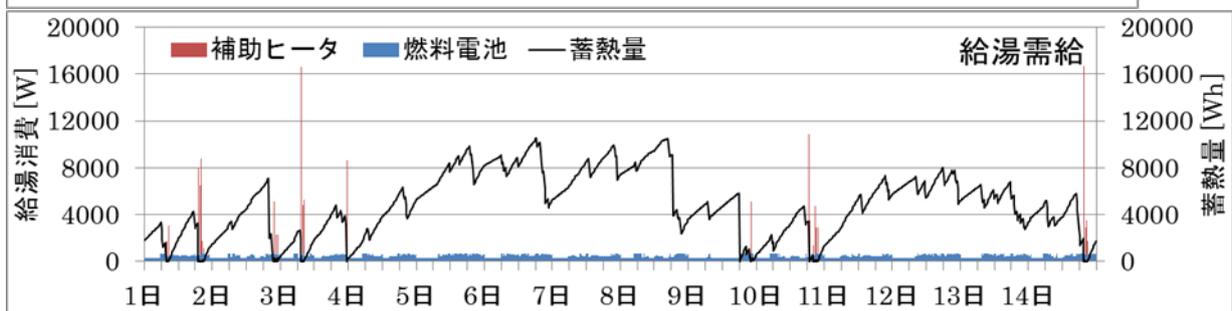
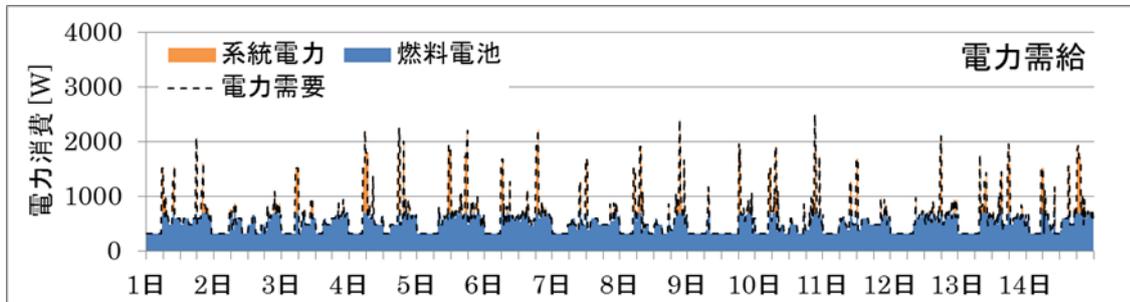


図 A-149 SOFC の運転シミュレーション結果 (子高大学2・中間期(夏寄り))

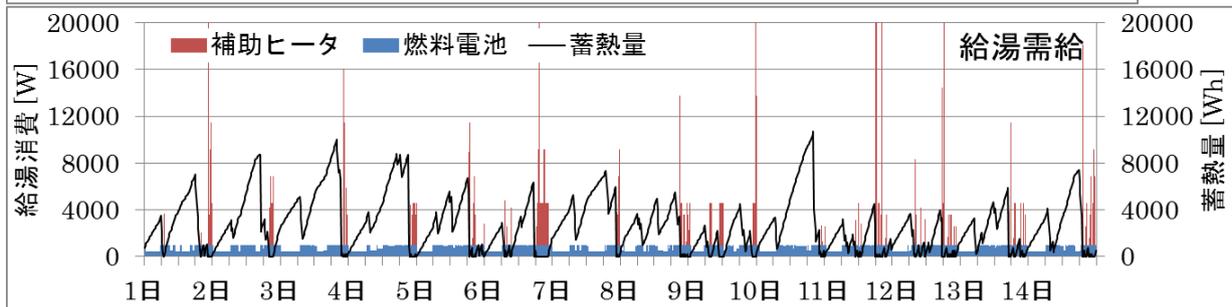
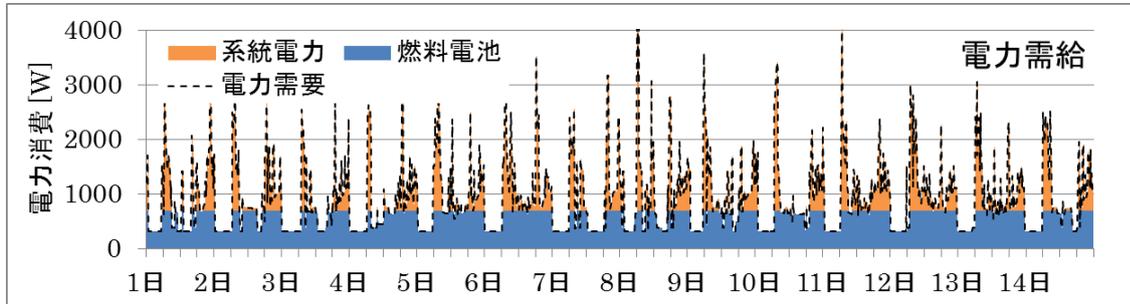


図 A-150 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人2・冬)

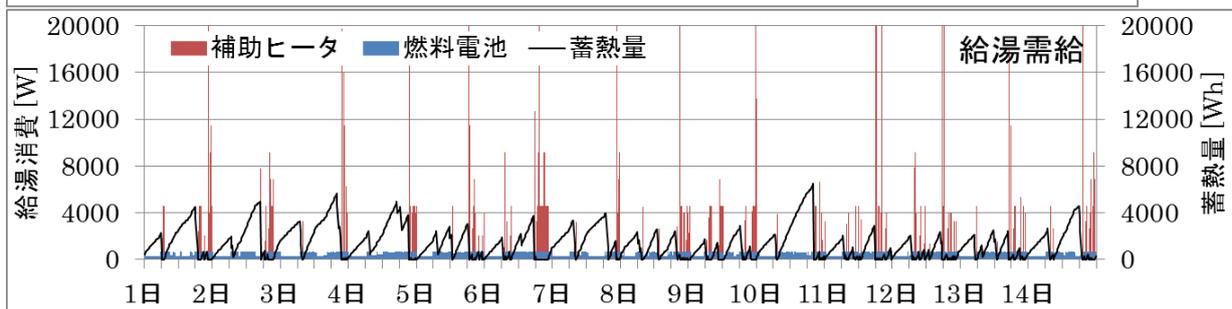
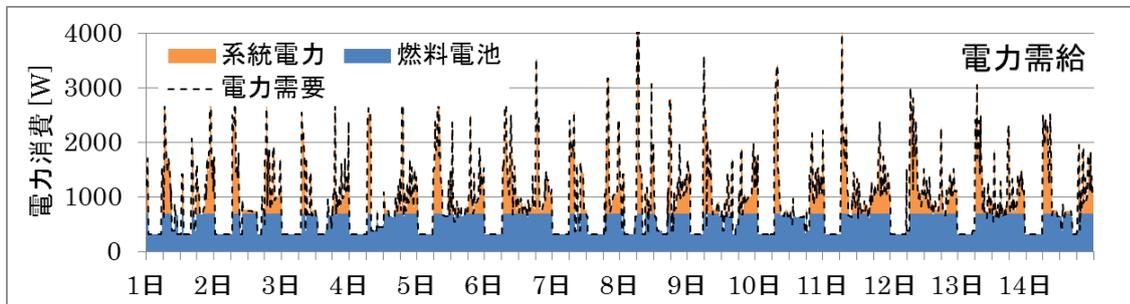


図 A-151 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人2・冬)

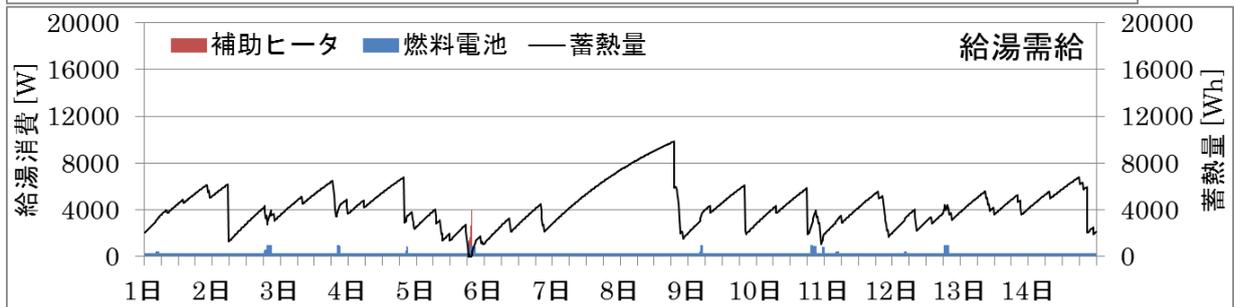
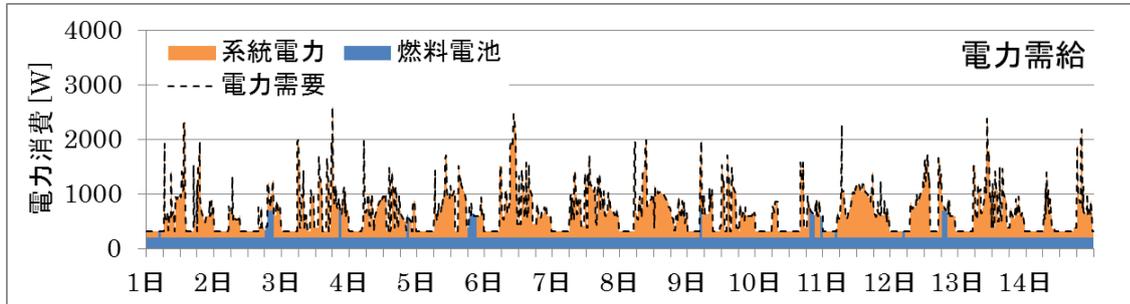


図 A-152 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人2・夏)

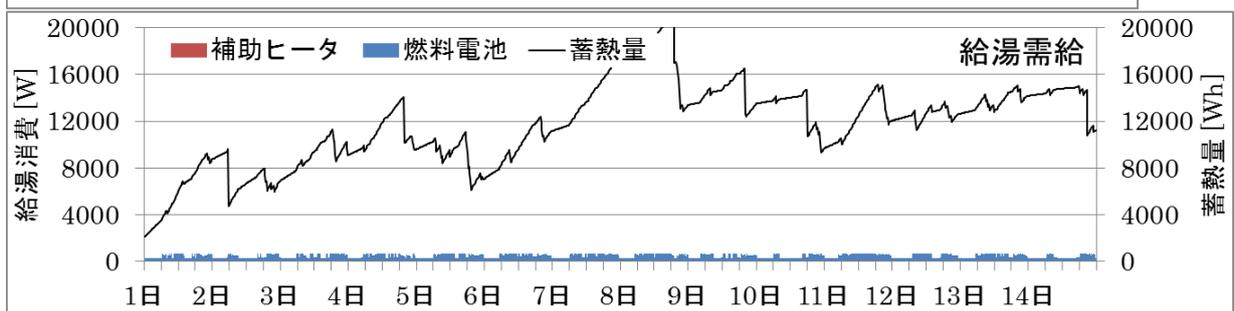
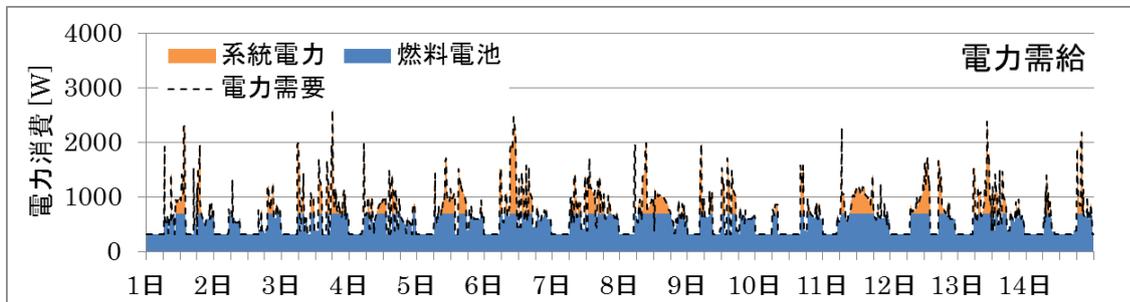


図 A-153 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人2・夏)

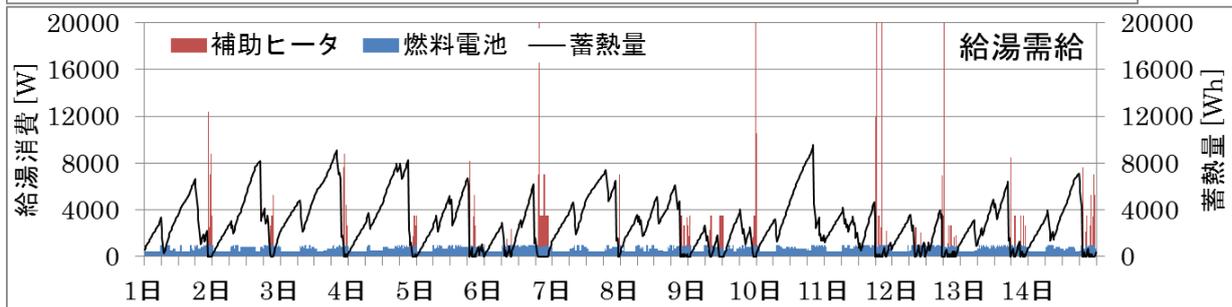
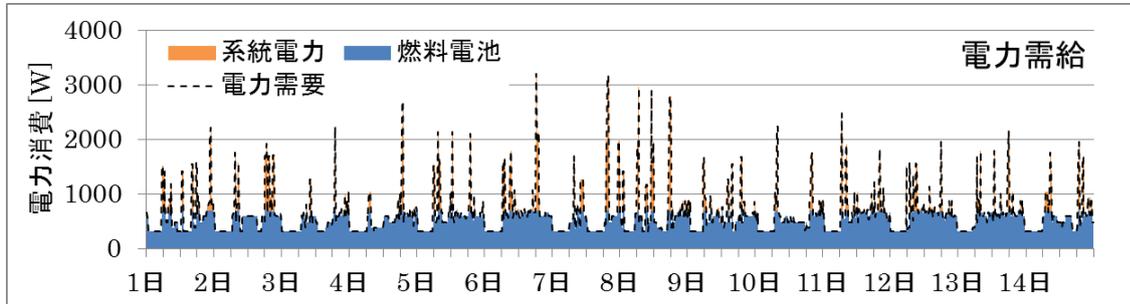


図 A-154 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人2・中間期(冬寄り))

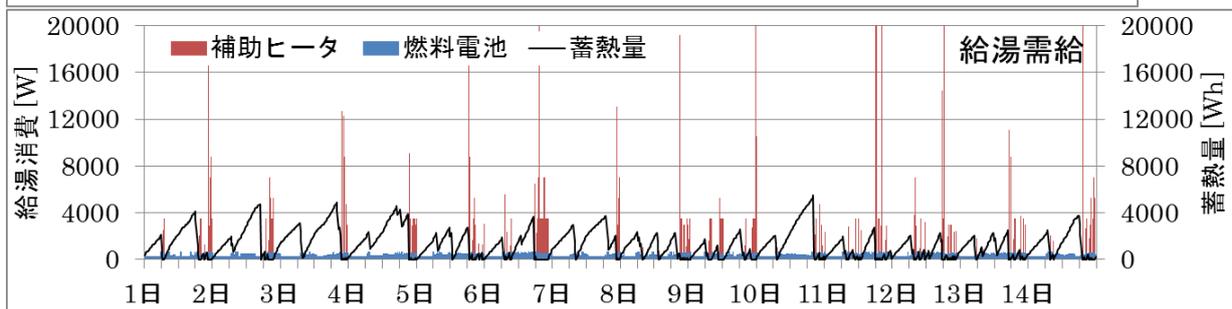
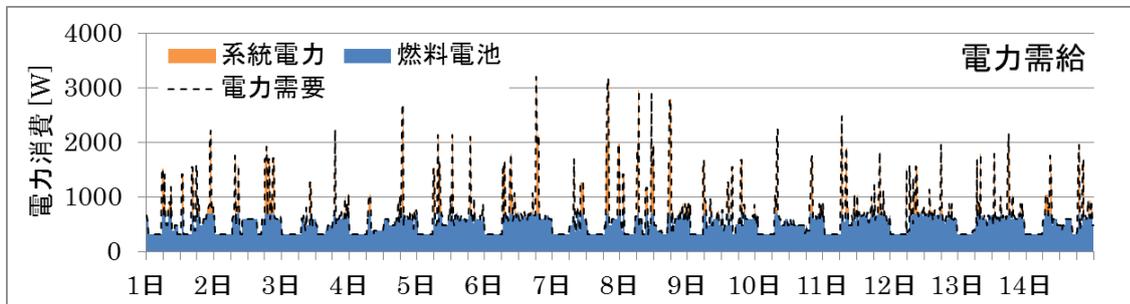


図 A-155 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人2・中間期(冬寄り))

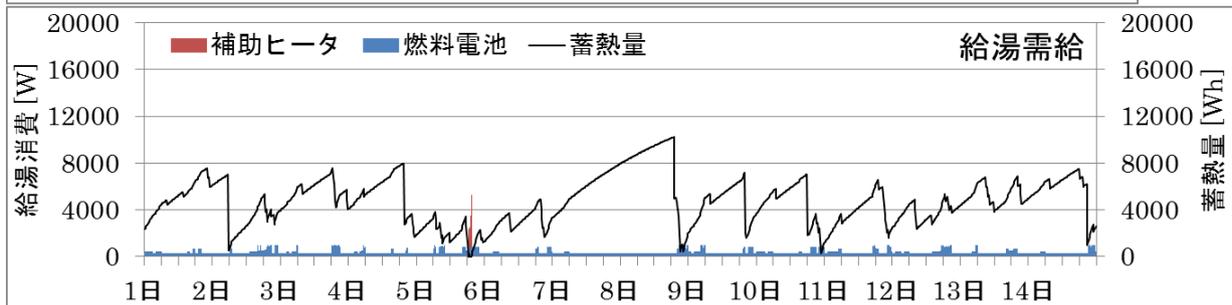
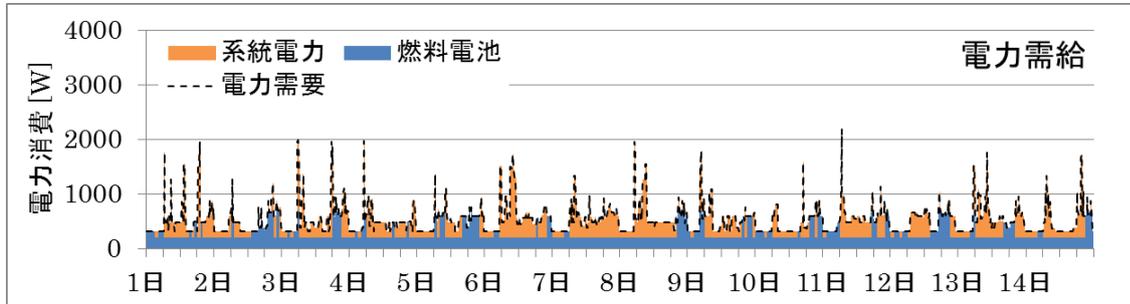


図 A-156 PEFC の運転シミュレーション結果 (子社会人2・中間期(夏寄り))

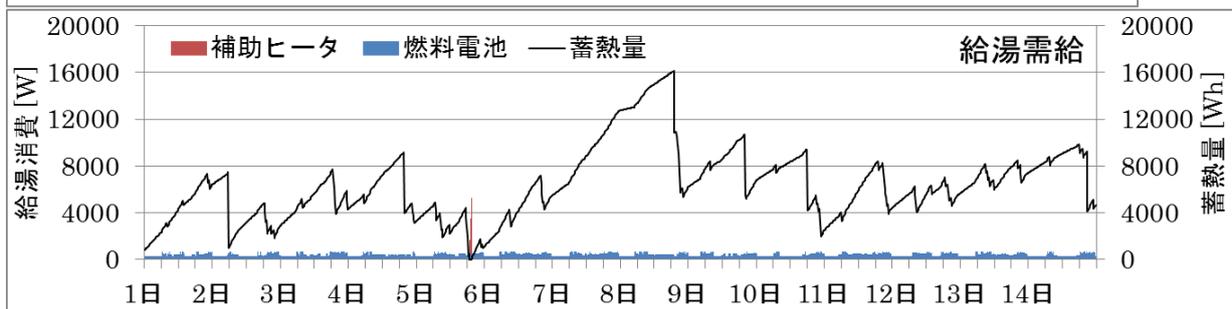
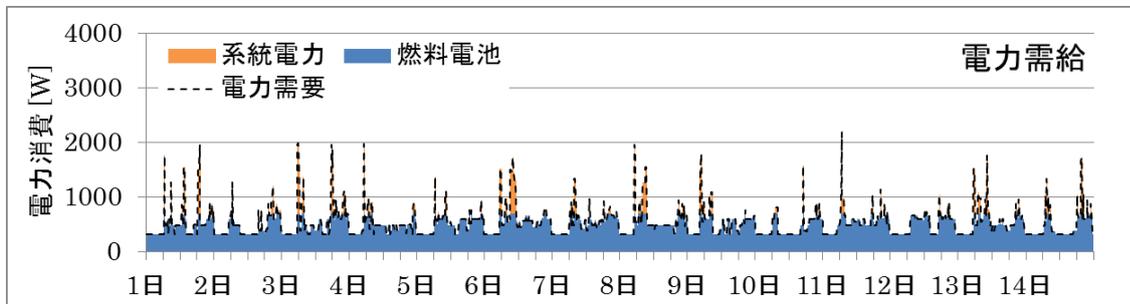


図 A-157 SOFC の運転シミュレーション結果 (子社会人2・中間期(夏寄り))