

2012 年度 修士論文

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
環境システム学専攻

47-116659 小澤 暁人

指導教員 吉田 好邦 教授

2013 年 2 月 20 日提出

目次

第1章 序論	8
1.1 エネルギーを巡る日本の課題	8
1.1.1 地球温暖化問題	8
1.1.2 東日本大震災	9
1.2 家庭部門における対策	10
1.2.1 家庭用エネルギー機器の活用	11
1.2.2 家庭と電力会社の協力による再生可能エネルギーの出力変動抑制	12
第2章 目的	16
2.1 既往研究とその課題	16
2.2 本研究の目的	16
第3章 太陽電池出力の推定	18
3.1 太陽電池出力の推定手法	18
3.2 水平全天日射量データ	19
3.3 斜面／水平日射比率の設定	20
3.4 太陽電池出力の推定	20
3.4.1 季節ごとの発電量と出力	20
3.4.2 時間帯ごとの出力変動	23
3.5 実発電量との比較	25
第4章 家庭エネルギー需要の推定	26
4.1 生活者行動スケジュールの再現	27
4.1.1 再現手法	27
4.1.2 行動スケジュールの定義	28
4.1.3 行為推移確率の算出	29
4.1.4 マルコフ連鎖による行動スケジュールの再現	31
4.1.5 再現結果と統計の比較	32
4.2 消費電力・湯量の設定	35
4.2.1 「身の回りの用事」・「家事」の細分化	35
4.2.2 家電機器の消費電力の設定	35
4.2.3 照明の消費電力の設定	36
4.2.4 消費湯量の設定	37
4.3 空調による消費電力の推定	38
4.3.1 熱負荷シミュレーションによる空調負荷の算出	38
4.3.2 エアコン COP の算出	41

4.3.3	空調消費電力の推定	42
4.4	エネルギー需要スケジュールの推定	42
4.4.1	春・秋のエネルギー需要	43
4.4.2	冬のエネルギー需要	44
4.4.3	夏のエネルギー需要	45
4.5	河野モデルとの比較	46
第5章	家庭エネルギー需給シミュレーション	48
5.1	シミュレーションにおける諸設定	49
5.1.1	エネルギー機器仕様	49
5.1.2	コスト	51
5.1.3	CO ₂ 排出量の算出方法	52
5.2	設定の定式化	54
5.2.1	コスト・利益に関する制約	54
5.2.2	ガスに関する制約	55
5.2.3	系統電力に関する制約	55
5.2.4	家庭用燃料電池システムに関する制約	56
5.2.5	蓄電池に関する制約	59
5.2.6	太陽電池に関する制約	60
5.2.7	電力需要に関する制約	60
5.2.8	熱需要に関する制約	61
5.2.9	CO ₂ に関する制約	61
第6章	シミュレーション結果	63
6.1	運転スケジュール	63
6.1.1	「FC」ケース	64
6.1.2	「FC+BT」ケース	65
6.1.3	「PV」ケース	66
6.1.4	「W発電」ケース	67
6.1.5	「三電池」ケース	68
6.2	電力に関する評価	69
6.2.1	電力供給源の比較	69
6.2.2	熱変換・蓄電ロスと比較	70
6.2.3	売電量の比較	70
6.2.4	電力の系統依存度の比較	71
6.2.5	売電電力変動の比較	72
6.3	経済性の評価	73

6.3.1	家庭用燃料電池の導入による効果.....	73
6.3.2	家庭用燃料電池と蓄電池の併設による効果.....	73
6.3.3	太陽電池の導入による効果.....	73
6.4	環境性の評価.....	75
6.4.1	家庭用燃料電池の導入による効果.....	75
6.4.2	太陽電池の導入による効果.....	75
6.4.3	W発電の導入による効果.....	76
6.5	まとめ.....	77
第7章	変動抑制を考慮した需給シミュレーション.....	78
7.1	変動抑制制度の定式化.....	78
7.2	シミュレーション結果.....	79
7.2.1	出力変動時の運転スケジュール.....	79
7.2.2	変動抑制効果の評価.....	81
7.2.3	電力供給源の比較.....	82
7.2.4	経済性の評価.....	83
7.2.5	環境性の評価.....	84
7.3	まとめ.....	85
第8章	結論.....	86
8.1	本研究の結論.....	86
8.2	今後の展開.....	86
	参考文献.....	87
A	付録.....	90
	謝辞.....	96

図表 目次

図 1-1	太陽光発電導入量	11
図 1-2	運転予備力の種類 ^[11]	13
図 1-3	変動抑制の手法（イメージ）	15
図 3-1	モデルによる太陽電池出力の推定フロー	18
図 3-2	太陽電池の1日の発電量	20
図 3-3	太陽電池出力スケジュール（夏）	21
図 3-4	太陽電池出力スケジュール（春・秋）	21
図 3-5	太陽電池出力スケジュール（冬）	22
図 3-6	太陽電池出力スケジュール（7月19日）	24
図 3-7	太陽電池出力スケジュール（7月19日 11時00分～15時00分）	24
図 4-1	モデルによる家庭用エネルギー需要の推定フロー	26
図 4-2	行為者割合と推移確率の関係（イメージ）	30
図 4-3	再現した行動スケジュールの例	32
図 4-4	行為者割合（主婦・平日）	33
図 4-5	行為者割合（主婦・休日）	34
図 4-6	「身の回りの用事」「家事」の細分化（イメージ）	35
図 4-7	省エネ法判断基準「レベル0」の照明設備	36
図 4-8	SMASHの構成 ^[32]	38
図 4-9	住宅用標準問題の間取り	39
図 4-10	算出された空調負荷の例	40
図 4-11	空調による消費電力	42
図 4-12	電力・給湯需要スケジュール（春・秋 平日）	43
図 4-13	電力・給湯需要スケジュール（春・秋 休日）	43
図 4-14	電力・給湯需要スケジュール（冬 平日）	44
図 4-15	電力・給湯需要スケジュール（冬 休日）	44
図 4-16	電力・給湯需要スケジュール（夏 平日）	45
図 4-17	電力・給湯需要スケジュール（夏 休日）	45
図 4-18	電力需要推定結果の比較	46
図 4-19	給湯需要推定結果の比較	47
図 5-1	電力・ガス・熱の流れ図	48
図 5-2	回避電力によるCO ₂ 削減効果	53
図 5-3	売電によるCO ₂ 削減効果	53
図 6-1	運転スケジュール（FC）	64
図 6-2	運転スケジュール（FC+BT）	65
図 6-3	運転スケジュール（PV）	66

図 6-4	運転スケジュール (W 発電)	67
図 6-5	運転スケジュール (三電池)	68
図 6-6	電力供給源の比較	69
図 6-7	熱変換・蓄電ロスの比較	70
図 6-8	売電量の比較	70
図 6-9	電力の系統依存度の比較	71
図 6-10	1 日における売電電力の最大変動	72
図 6-11	年間コストの比較	74
図 6-12	年間 CO ₂ 排出量の比較	76
図 7-1	運転スケジュール (W 発電)	80
図 7-2	運転スケジュール (三電池)	80
図 7-3	売電電力の夏季最大変動の比較	81
図 7-4	月間電力供給源の比較 (夏)	82
図 7-5	月間ランニングコストの比較 (夏)	83
図 7-6	月間 CO ₂ 排出量の比較 (夏)	84
図 A-1	行為者割合 (男勤め人・平日)	90
図 A-2	行為者割合 (男勤め人・休日)	91
図 A-3	行為者割合 (中学生・平日)	92
図 A-4	行為者割合 (中学生・休日)	93
図 A-5	行為者割合 (小学生・平日)	94
図 A-6	行為者割合 (小学生・休日)	95
表 1-1	震災前後の実排出係数の比較	10
表 1-2	予備力コストの試算結果	13
表 3-1	最大変動 (上位 10%) の発生した時間帯	23
表 4-1	行為の分類	28
表 4-2	家電機器の消費電力	35
表 4-3	照明の消費電力	37
表 4-4	消費湯量	37
表 4-5	想定した条件	42
表 5-1	料金体系	51
表 5-2	CO ₂ の排出源単位	52
表 5-3	コスト・利益に関する制約で用いる定数	55
表 5-4	系統電力に関する制約で用いる定数	56
表 5-5	燃料電池ユニットに関する制約で用いる定数	58
表 5-6	補助熱源機に関する制約で用いる定数	58

表 5-7	電気ヒータに関する制約で用いる定数	58
表 5-8	貯湯槽に関する制約で用いる定数	59
表 5-9	蓄電池に関する制約で用いる定数	60
表 5-10	給湯需要に関する制約で用いる定数	61
表 5-11	CO ₂ に関する制約で用いる定数	62
表 6-1	想定したケース	63
表 6-2	評価のまとめ	77
表 7-1	変動抑制制度の導入による影響（報酬単価 40 円/kW）	85

第1章 序論

1.1 エネルギーを巡る日本の課題

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といえる。地球温暖化は、人間の生活活動に伴う温室効果ガスの排出によって世界平均で気温が上昇する気候変動が発生し、熱波・洪水・暴風雨・干ばつ・高潮などの自然災害の増加、温度上昇・降水量減少・海洋酸性化に脆弱な生態系の破壊、水資源・食料の不足、マラリアなど温帯地域特有の風土病の蔓延、などの様々な被害・影響が懸念されている。温室効果ガスの排出が人間の経済活動と密接に関係している点などが、地球温暖化の解決を容易ならざるものになっている。

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変動に関する政府間パネル) が 2007 年に発表した第 4 次評価報告書^[1]の内容を以下に簡潔にまとめる。

- 世界平均気温の上昇・雪氷の融解・世界平均海面水位の上昇から気候システムの温暖化には疑う予知はない。また多くの自然システムが地域的な気候変動、特に気温上昇の影響を受けつつあることが観測によって示される。
- 工業化以降、世界の温室効果ガスの排出量は人間活動により増加している。観測された世界平均気温の上昇は、人為起源の温室効果ガス濃度の増加によってもたらされた可能性が非常に高い。
- 温室効果ガスの排出量が現在以上の速度で増加し続けると、21 世紀の温暖化の影響は 20 世紀よりも大規模になる可能性が非常に高い。たとえ温室効果ガス濃度が安定化してもフィードバックなどによって気温上昇・海面水位上昇は続き、気候変動の速さと程度によっては温暖化によって急激または不可逆な影響が引き起こされる可能性がある。
- 将来の気候変動への脆弱性を軽減するためには、現在よりも一層幅広い適応が求められる。緩和行動を促すインセンティブを持たせるために各国政府が取りうる政策・手法は多様であり、また国際レベルでの協力によっても温室効果ガスの排出量を削減する多数のオプションが存在する。

以上のように国際的な協力を必要とする地球温暖化の解決のために、国連では気候変動枠組み条約を設け、締約国会議 (Conference of the Parties, COP) を毎年開催している。1997 年の COP3 で採択された「京都議定書」第 1 約束期間 (2008～2012 年) の削減義務は終了し、今年から第 2 約束期間 (2013～2020 年) に突入する。日本は第 2 約束期間の削減義務には参加しないが、2020 年以降の全ての国が参加する新枠組みを見据え、また GDP 世界第 3 位の経済大国として、自主的に温暖化対策を進めていくことが求められる。

1.1.2 東日本大震災

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を東日本大震災と総称する。東日本大震災による被害の概要は2011年度の防災白書^[2]・エネルギー白書^[3]や福島第一原発の事故調査報告書^[4]などにまとめられている。死者は岩手・宮城・福島の東北3県を中心に全国で15,000人超にも及び、その多くは太平洋沿岸域を襲った津波によるものである。住宅は約10万棟が全壊、約6万棟が半壊し、被災地域ストックへの直接的被害は約16～25兆円と分析されている。

以上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。エネルギーと関連する被害・影響として以下の3点を指摘する。

(1) 東京電力福島第一原子力発電所事故

福島県・双葉郡の東京電力福島第一原子力発電所では地震発生当時、1～3号機が運転中、4～6号機が定期検査中であった。地震発生により運転中の原子炉は自動的に緊急停止したが、その後発生した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全電源喪失（1・2・4号機）あるいは全交流電源喪失（3号機）の状態となった。電源喪失によって冷却機能を失ったことで原子炉内の温度が上昇して炉心露出・損傷が生じ、大量の水素と放射能が原子炉建屋に漏出した。建屋内に水素が充満したことによって、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、爆発にともなって大量の放射能が外部環境に放出されることとなった。これら一連の事故は国際原子力機関（IAEA）の定める国際原子力事象評価尺度（INES）で「レベル7（深刻な事故）」の最高評価となり、チェルノブイリ原子力発電所事故（1986年）以来の甚大なる事故として記録にも記憶にも残るものとなった。

(2) 震災直後の停電とその後の電力需給の逼迫

事故の発生した福島第一原子力発電所に加え、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、震災以降の東日本の電力供給力が大きく低下した。周波数の異なる西日本からの供給は周波数変換所の容量の関係で限界があり、結果的に3月14～28日にかけて計10日間計画停電が実施された。

その後、停止した火力発電所は順次復旧したが、原発事故を不安視する国民感情の高まりによって定期点検に入った原子力発電所の運転再開が困難となり、慢性的に電力需給が逼迫することとなった。特に電力使用量のピークとなる夏・冬には、原子力発電所を所有しない沖縄電力以外の9電力会社管内において節電要請が行われ、工場が土日操業・平日休暇を導入したり、鉄道会社が運行本数を削減する「間引き運転」を実施したりするなど、経済・インフラ面に多大な影響を与えた。

(3) 火力発電の供給増による CO₂ 排出量の増加・電力料金の値上げ

電力供給力を少しでも高めるために、長期停止中の火力発電所（横須賀（神奈川県）など、主に石油火力発電）の運転再開や緊急設置電源（ディーゼル・ガスタービン・ガスエンジン）の導入を実施したことによって、電力部門における化石燃料消費量・CO₂ 排出量が増加した。震災前後における各電力会社の実排出係数（発電量 1kWh あたりの CO₂ 排出量）の変化を表 1-1 に示す。四国電力・沖縄電力以外の 8 電力会社において震災前の 2010 年度と震災後の 2011 年度の間で実排出係数が増加しており、火力発電の焼き増しによって CO₂ 排出量が増加したことが確認できる。

また火力発電の供給力増加によって発電にかかる燃料費が増加し、各電力会社が電気料金の値上げを進めている。東京電力は 2012 年 9 月 1 日から家庭向け電気料金を平均 8.46% 値上げし、関西電力は平均 11.88%，九州電力は平均 8.51% の値上げ認可申請を経済産業省に提出している。

表 1-1 震災前後の実排出係数の比較

電力会社	実排出係数[kg-CO ₂ /kWh]		
	2010年度 (震災前)	2011年度 (震災前)	震災前後 の増減
北海道電力	0.353	0.485	0.132
東北電力	0.429	0.547	0.118
東京電力	0.375	0.464	0.089
中部電力	0.473	0.518	0.045
北陸電力	0.423	0.641	0.218
関西電力	0.311	0.450	0.139
中国電力	0.728	0.657	△ 0.071
四国電力	0.326	0.552	0.226
九州電力	0.385	0.525	0.140
沖縄電力	0.935	0.932	△ 0.003

(環境省データ^{[5][6]}を加工)

1.2 家庭部門における対策

民生家庭部門は最終エネルギー消費の 14.4% を占め、オイルショック以降もエネルギー消費が増加し続けていることが特徴である。エネルギー消費が日常生活の快適性や利便性と直結している点などが、家庭部門の省エネルギー化が進みにくい理由と考えられている。しかしながら 1.1 の課題解決に向けて家庭でも積極的な取り組みが求められており、例として次のような対策が考えられる。

1.2.1 家庭用エネルギー機器の活用

太陽電池・家庭用燃料電池・蓄電池といった再生可能エネルギーや分散型電源を活用することで、省エネルギー化と同時に停電リスクを回避する動きが一般家庭でも進展しつつある。

CO₂ 排出量の削減やエネルギー自給率の向上のために再生可能エネルギーの普及・拡大が進められている。再生可能エネルギーは、太陽光発電・風力発電・小水力発電・バイオマス発電・地熱発電や海洋発電（海流発電・波力発電・海洋温度差発電など）といった多様な種類がある。なかでも太陽光発電の大量導入が想定されており、現在約 3GW である設備容量を 2020 年に 28GW、2030 年に 53GW まで増やすことが目標とされている（図 1-1）⁷⁾。特に住宅用太陽光発電に関しては、新築戸建 30 万戸/年の 7 割、既築 5 万戸/年への導入が検討されている（2011 年～2020 年）。これを受けて 2012 年 7 月 1 日から「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」が開始され、住宅に設置された太陽光発電（容量 10kW 未満）の余剰電力は 42 円/kWh での買取が電力会社に義務付けられることとなった。

東日本大震災を契機に停電・節電に対する認識が改まったことで、家庭での分散型電源活用も進められている。家庭用燃料電池システム（エネファーム）は元来コジェネレーションによって家庭の電力需要・給湯需要を効率的に賄うことができる点が売りであったが、震災を受けて家庭用自家発電機の筆頭として注目され 2011 年度の導入量は前年度の 3.6 倍に達している⁸⁾。2011 年 10 月には固体酸化物型燃料電池（SOFC）、2012 年 6 月には LP ガス対応の固体高分子形燃料電池（PEFC）が新たに発売されており、さらなる普及が期待される。また災害時に最小限必要な電力の供給源として、蓄電池を導入する家庭も増えつつある。蓄電池は容量あたりの単価が高額であるのが難点だが、一部の自治体は住宅用蓄電システムの補助事業を始めており⁹⁾、今後は市場拡大によるコスト低下が期待される。

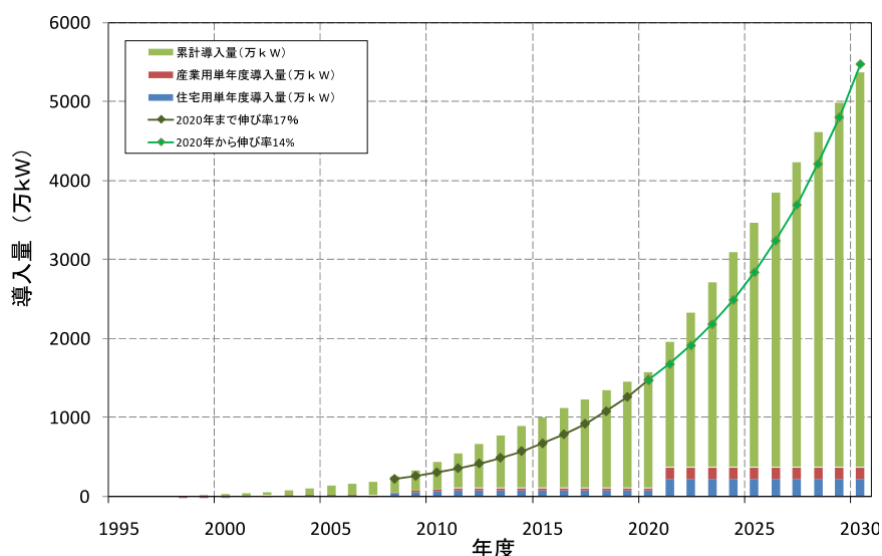


図 1-1 太陽光発電導入量

1.2.2 家庭と電力会社の協力による再生可能エネルギーの出力変動抑制

1.2.2.1 運転予備力の問題

電力システムは、時々刻々の電力需要量と供給量が常に一致しなければならないという「需給一致の原則」のもとで運用される。電力需給の一致は次の方法で行われている。日本国内での商用交流電源の周波数は、東日本が 50Hz、西日本が 60Hz と定まっている。電力供給量に対して需要量が減少すると、系統全体の電流上昇に伴って周波数も上昇する。逆に需要量が増加すると軽東電対の電流下降に伴って周波数も減少する。発電所はこの周波数の変化を感知することで、タービンの调速機や発電所出力を調整して需給を一致させる。

電力需要は天候・気温などの気象データと過去数年の実需要データを照らし合わせることによって、翌日の最大需要量（需要ピーク）や需要カーブの予測が行われる。電力会社はこの予測に応じて必要な供給量を決定するが、天候の急変によって電力需要量が予測値を急激に超過したり発電所事故によって供給力が減少したりする場合に備え「運転予備力」を保有することが義務付けられている。図 1-2 に示すように、水力発電所や火力発電所が運転予備力として充てがわれる。

東日本大震災前は最大需要量に対して 7~10%の運転予備力を保有するのが一般的であったが、震災による原子力発電所の停止を停止待機中・部分負荷運転中の発電所で代替したことで震災後の運転予備力は大幅に減少した。例えば 2011 年 7 月末の需給見通しでは、東京電力の保有する運転予備力は最大需要量に対して 3.3%しかなく、これは下限 3%に迫るもので計画停電が実施される瀬戸際であったことが分かる。現在でも、老朽化による長期停止中であった火力発電所を運転再開したり緊急設置電源を仮設置して導入したりするなど、運転予備力の確保に向けた努力が続けられている。

再生可能エネルギーは天候変化などによって急激な出力変動が生じるため、大量導入すると必要な運転予備力が増加する。仮に再生可能エネルギーの発電によって現在利用されている発電所の稼働率が下がったとしても、まずは長期停止中だった発電所や緊急設置電源を運転停止することが優先されるため、既存の発電所を運転予備力に回すことは難しい。そのため、再生可能エネルギーを大量に導入する際には、発電所の新設によって運転予備力を確保する必要があると考えられる。

再生可能エネルギーのために運転予備力用の発電所を新設するとしたら、どの発電方式が採用されるであろうか。先に述べたように運転予備力には水力発電か火力発電のいずれかが用いられる。しかしながら地理的制約から日本国内では水力発電所のこれ以上の設置が困難であるため、火力発電が採用されるであろう。この際、発電所の建設・運転によるコスト増加に加え、再生可能エネルギーの利点である CO₂ 排出量の削減効果が薄れることが懸念される。

分類	対象要因	定義と具体的設備
待機予備力 (コールド)	相当の時間的余裕を持って予測しうるもの ・ 需要想定値に対する持続的増加 ・ 渇水 ・ 停止までに相当の時間余裕のある電源、または電源送電システムの不具合	起動から前負荷をとるまでに数時間を要する供給力 (停止待機中の火力で、起動後は長時間継続発電可能なもの など)
運転予備力 (ホット)	・ 天候急変などによる需要の急増 ・ 電源を即時、または短時間内に停止、出力抑制しなければならない場合	即時発電可能なもの、および短時間内(10分程度以内)で起動して負荷をとり、待機予備力が起動して負荷を取るまで継続して発電しうる供給力 (部分負荷運転中の火力発電機余力、および停止待機中の水力発電機(揚水発電機を含む))
瞬動予備力 (上記運転予備力の一部)	・ 電源脱落事故	電源脱落時の周波数低下に対して即時に応動を開始し、急速に出力を上昇(10秒程度以内)、少なくとも瞬動予備力以外の運転予備力が発電されるまでの時間、継続して自動発電可能な供給力 (ガバナフリー運転中の発電機のカバナーフリー余力)



【出典】日本電力調査委員会:電力需要想定および電力需給計画算定方式の解説、平成14年11月

図 1-2 運転予備力の種類^[11]

1.2.2.2 再生可能エネルギー導入による予備力コストの試算

再生可能エネルギーを導入した際に電力会社が運転予備力を増強するのに要する年間コストを試算する。運転予備力として火力発電所を 1kW 増設する事を考える。発電方式を LNG 火力か石油火力とし設備利用率を 10%と仮定すると試算結果は表 1-2 のようになる。ただし費用はコスト等検証委員会^[12]のモデルプラントを参考とし、発電所の稼働年数 40 年、割引率 3%とした。発電方式と化石燃料の価格に応じて、運転予備力を 1kW 増強するために年間 17,000~31,000 円程度のコストが必要であるという結果となった。電力会社は利用率の低い設備を抱えることになり、予備力コストによって電気料金が上増しされ需要家側も負担を強いられることになる。

表 1-2 予備力コストの試算結果

発電方式	資本費 [円/kWh]	運転維持費 [円/kWh]	燃料費 [円/kWh]	総計 [円/kWh]	設備利用率	年間発電量 [kWh/年]	年間コスト [円/年]
LNG火力	5.8	5.4	8.2~8.6	19.4~19.8	10%	876	16994~17345
石油火力	9.4	8.0	16.6~18.2	34.0~35.6			29784~31186

1.2.2.3 家庭用エネルギー機器の制御による出力変動抑制

今までは電力需給の一致のために電力会社が供給量を調整することで、電力システムの安定的運用が果たされてきた。しかし今後の電力システムにおいては需要量をコントロールすることの重要性も指摘されている。電力会社が需要量を制御することで電力の需給一致をさせることを「デマンドサイドマネジメント (Demand side management, DSM)」と呼ぶ。DSMは「需要家(人間)の電力消費行動をコントロールする手法」と「需要家の持つ機器を自動制御する手法」の2通りが考えられるが、再生可能エネルギーの出力変動によって生じる短時間での需給調整を果たすためには後者の手法が適している。

そこで、再生可能エネルギーの導入に伴って電力会社が予備力を増やす代わりに、家庭用燃料電池や蓄電池といった家庭にあるエネルギー機器の出力を制御して再生可能エネルギーの出力変動を吸収させる手法を提案する。具体的には、太陽電池と家庭用燃料電池を併用する「W発電」住宅と太陽電池・家庭用燃料電池・蓄電池を導入した「三電池」住宅を想定して、自分の所有する太陽電池の出力変動を打ち消すように燃料電池・蓄電池を出力制御することで、電力需要そのものを変化させずに変動抑制を達成する。なお、ここで想定したW発電や三電池の住宅は未だ普及しているものではないが、手法を一家庭で完結させるために必要な前提であり、再生可能エネルギーと家庭用エネルギー機器が離れた場所にある場合でも本手法は適応できる。

図 1-3 に変動抑制手法のイメージを示す。簡単のために家庭の電力需要は一定として、太陽電池の出力が瞬間的に上昇したとする。通常であれば増えた出力は余剰電力としてそのまま電力会社へ売電され、売電電力にパルス状の変動が生じる。それに対して、

- (1) 太陽電池の出力が増えると同時に家庭用燃料電池の出力を減らす
- (2) 太陽電池の増えた出力の一部を蓄電池へ充電する

のいずれかを行なうことによって売電電力の変動を抑制することができる。太陽電池出力が変動した場合を考えたが、電力需要が瞬間的に減少した場合も同様の運転制御によって変動を抑制できる。逆に、太陽電池出力が瞬間的に下降した場合や電力需要が瞬間的に増加した場合は、家庭用燃料電池の出力を増やすが蓄電池を放電すれば良い。家庭がこのようなエネルギー機器の制御を行なうことによって、電力会社は住宅用太陽光発電が導入された際に予備力の増強を回避することができる。

しかしながら、この変動抑制によって余剰電力が減少し売電利益が減ることで、家庭の経済的メリットが損なわれることが予想される。そこで電力会社が家庭に「変動抑制報酬」を支払うことで損失を相殺する料金制度を提案する。具体的には、売電電力の変動が小さくなるに応じて報酬がもらえる制度を料金体系に組み込むことで、家庭がコスト最小で家庭用エネルギー機器を運転させたときに、同時に太陽電池の変動抑制が行われる仕組みである。

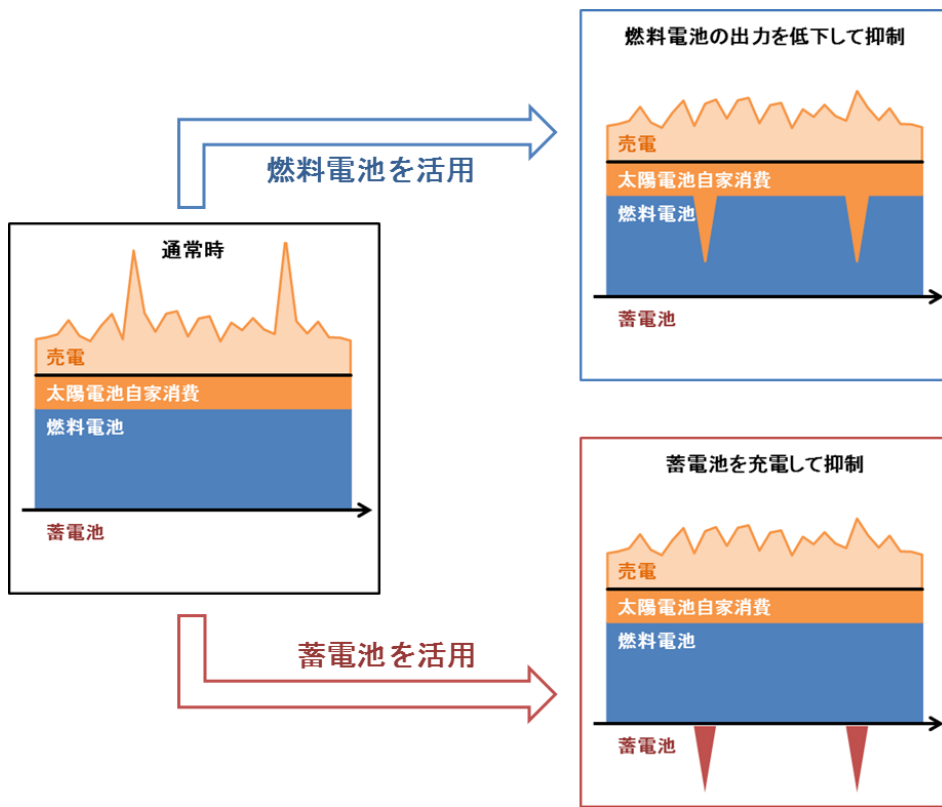


図 1-3 変動抑制の手法 (イメージ)

第2章 目的

2.1 既往研究とその課題

家庭用エネルギー機器の制御による再生可能エネルギーの出力変動抑制に関しては、いくつかのエネルギーシミュレーションモデルによって効果の評価が行われている^{[13][14]}。しかし、これらの研究は変動抑制そのものを目的とした制御を行っており、制御に伴うガス料金の上昇・売電利益の減少による家庭の経済損失は考慮されていない。特に「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」における住宅太陽光発電の価格設定は余剰電力をできるだけ多く売電することに強いインセンティブをもたらしており、それでもなお家庭に変動抑制を促すかに関心がある。

家庭部門におけるエネルギー需給を研究対象とする際に必要な「時々刻々の家庭エネルギー需要」は実データを得ることが非常に困難なので、モデルによる推定結果を用いるのが一般的である。本研究室でも家庭エネルギー需要を推定するモデルの開発が行われてきた。河野^[15]は生活者の行動スケジュールを再現することで、家庭エネルギー需要を15分刻みで推定するモデルを開発した。しかし再生可能エネルギーの出力変動は非常に短時間で発生する現象であり、家庭エネルギー需要もより細かい時間刻みで推定する必要がある。

2.2 本研究の目的

本研究は、家庭用エネルギー機器システムの普及や DSM の実用を想定し、家庭と電力会社が協調した経済的・環境的な電力システムの構築を目指す。そのために、以下の3点に研究の主眼を置く。

- (1) 家庭エネルギー需要の推定
- (2) 家庭用エネルギー機器の導入による経済性・環境性評価
- (3) 家庭用エネルギー機器の制御による太陽電池出力変動抑制効果の評価

これら3点はそれぞれ独立した研究ではなく、(1)で推定された家庭エネルギー需要をインプットとして家庭エネルギー需給シミュレーションを行ない、(2)の機器の導入効果と(3)の変動抑制効果を評価する、というように互いにデータや手法を共有している。

本研究の構成は次の通り。第3章で太陽電池出力の推定を行なう。気象データを用いたモデルから太陽電池の出力を3分刻みで推定し、結果を示した上で実発電量と比較してモデルの妥当性を評価する。第4章で家庭エネルギー需要の推定を行なう。生活行動の統計からマルコフ連鎖を用いたモデルによって生活者の行動スケジュールを3分刻みで再現する。行動に対してエネルギー消費を当てはめることで家庭エネルギー需要を推定する。結果を示した上で先行研究のモデルによる推定結果と比較してモデルの妥当性を評価する。第5章で家庭エネルギー需給シミュレーションを行なう。混合整数計画法によってコスト最小化を目的として、家庭用燃料電池・太陽電池・蓄電池を利用したエネルギー需給を再

現する。第 6 章で現状制度，すなわち変動抑制を考慮しない場合のシミュレーション結果を示す。家庭用エネルギー機器それぞれの導入効果に加え W 発電・三電池などのシステムについても「電力」「経済性」「環境性」の 3 項目を基準に評価を行なう。第 7 章で変動抑制を考慮した需給シミュレーションを行なう。変動抑制を料金体系に組み込んでシミュレーションし，電力会社の追加コストと抑制効果を評価する。

第3章 太陽電池出力の推定

第3章では太陽電池出力を3分刻みで推定する。太陽電池の出力は太陽の動きや天候によって大きく左右され、太陽の動きが1日周期で緩やかに生じるのに対し、雲の移動といった天候影響は太陽電池に対して急峻な出力変動をもたらす。天候による太陽電池の出力変動を考慮するためには、太陽電池出力を細かい時間刻みで再現することが求められる。そこで、日射データから3分刻みで太陽電池出力を推定するモデルを作成した。

モデルの全体フローを図3-1に示す。以降3.1でモデルの理論的側面である太陽電池出力の推定手法を説明し、3.2~3.4で手順を追ってモデルを概説した後に、3.5でモデルでの結果に基づく推定発電量と実発電量を比較しモデルの妥当性を評価する。

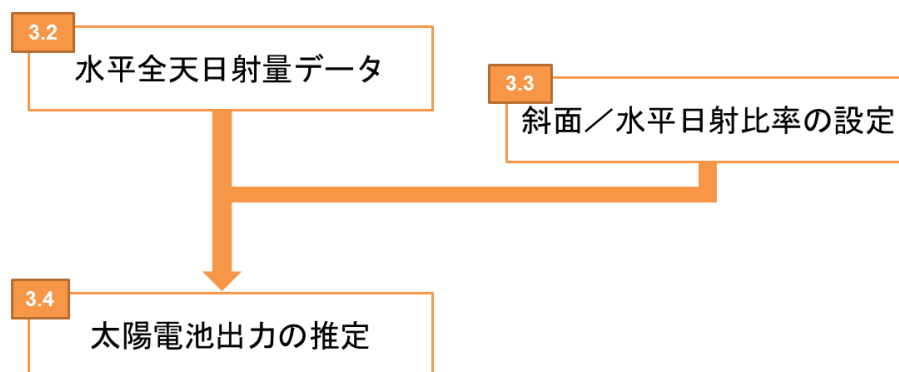


図 3-1 モデルによる太陽電池出力の推定フロー

3.1 太陽電池出力の推定手法

住宅用太陽光発電の太陽電池モジュールは屋根の上に傾斜させて設置するのが一般的で、時々刻々の太陽電池出力 $pvE(t)$ [kW]は斜面日射量 $I_{\theta}(t)$ [kW/m²]を用いて式3-1で表すことができる。

$$pvE(t) = \frac{I_{\theta}(t) \cdot C \cdot O}{S} \quad \text{式 3-1}$$

C [kW] : 太陽電池のパネル容量

O [-] : 太陽電池の出力係数

(パネル温度上昇やパワーコンディショナ変換効率などを考慮したシステム効率)

S [kW/m²] : 太陽の日射強度 (=1.0)

斜面日射量 (斜面全天日射量とも呼ぶ) は太陽から直接入射する成分 (直達日射量) ・ 天空の散乱光による成分 (天空日射量) ・ 地面の反射による成分 (反射日射量) の合計値であり、任意の傾斜角 θ 、方位角 ε の面に対する斜面日射量 I_{θ} は式3-2で近似される^[6]。

$$I_{\theta} = I_{D\theta} + \frac{1 + \cos \theta}{2} \cdot I_{S\theta} + \frac{1 - \cos \theta}{2} \cdot \rho_g \cdot I_{TH} \quad \text{式 3-2}$$

$I_{D\theta} = I_{DN} \{ \sin h \cdot \cos \theta + \cos h \cdot \sin \theta \cdot \cos(\alpha - \varepsilon) \}$: 斜面直達日射量

$I_{S\theta} = I_{SH} \frac{1 + \cos \theta}{2}$: 斜面天空日射量

ρ_g : 水平地表面の日射反射率 (アルベド)

$I_{TH} = I_{DN} \cdot \sin h + I_{SH}$: 水平面全天日射量

I_{DN} : 法線直達日射量

$I_{SH} = \frac{I_{DN}}{2P^{1/\sin h}} \cdot \sin h \cdot \frac{1 - P}{1 - 1.4 \ln P}$: 水平天空日射量

h : 太陽高度

α : 太陽方位角

P : 太陽透過率

ここから、水平全天日射量に対する斜面日射量の比率 I_{θ}/I_{TH} (以降、斜面/水平日射比率と呼ぶ) は式 3-3 で表せる。このままでは複雑な式だが、 I_{SH} を代入することで斜面/水平日射比率は関数 $c_{\theta/H}(\theta, \varepsilon, \rho_g, h, \alpha, P)$ として整理することができる。 θ と ε は住宅設計に応じて一定で ρ_g は積雪などの特殊な条件でしか変化しないので、残る変数は時間と季節に応じて変化する h と α と P である。時間変化よりも季節変化のほうが日射量の総量に与える影響が大きいと判断し、本研究では簡単のために $c_{\theta/H}$ の季節変化のみを考慮することとした。

$$I_{\theta}/I_{TH} = \frac{I_{DN} \{ \sin h \cdot \cos \theta + \cos h \cdot \sin \theta \cdot \cos(\alpha - \varepsilon) \} + I_{SH} \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right)^2}{I_{DN} \cdot \sin h + I_{SH}} \quad \text{式 3-3}$$

$$+ \frac{1 - \cos \theta}{2} \rho_g \equiv c_{\theta/H}(\theta, \varepsilon, \rho_g, h, \alpha, P)$$

以上から、次の手順によって太陽電池の出力を推定することができる。

- (1) 気象データから水平全天日射量を得る
- (2) 季節ごとに $c_{\theta/H}$ を設定し、斜面日射量を推定する
- (3) 斜面日射量と太陽電池仕様から、出力を推定する

3.2 水平全天日射量データ

東京管区気象台で観測された水平全天日射量 1 分値データ^[17]を用いた。2009 年 7 月 14 日～12 月 31 日の期間に観測されたデータのうち、異常値・欠損値を含まない日を選択して「夏」「春・秋」「冬」の各 30 日、計 90 日分のデータを採用した。なお 2009 年における東京の日照時間は 1783.3 時間であり、平均値 (1881.3 時間) と大きな齟齬はない。

3.3 斜面／水平日射比率の設定

年間月別日射量データベース (MONSOLA-11) [18]で算出される月ごとの斜面日射量・水平全天日射量を用いて、斜面／水平日射比率を季節に応じて設定した (夏 1.022, 春・秋 1.146, 冬 1.389)。なお斜面日射量の算出にあたっては傾斜角 30° 方位角 0° (真南) とした。

3.4 太陽電池出力の推定

3.2 の水平全天日射量に 3.3 の斜面／水平日射比率を掛けて斜面日射量を算出し、式 3-1 から太陽電池出力を推定した。なお太陽電池の仕様はパネル容量 3.0kW, 出力係数 0.7 と設定した。以降、推定結果を示す。

3.4.1 季節ごとの発電量と出力

太陽電池による 1 日の発電量の平均と標準偏差を図 3-2 に示す。夏 (9.544kWh/日) > 春・秋 (6.997 kWh/日) > 冬 (6.652 kWh/日) の順番で平均発電量が大きく、日照時間が長い季節ほど発電量が大きくなる傾向が見られる。しかし同じ季節でも日によってばらつきが大きく、季節による影響よりも天候による影響のほうが発電量を大きく左右していることが分かる。

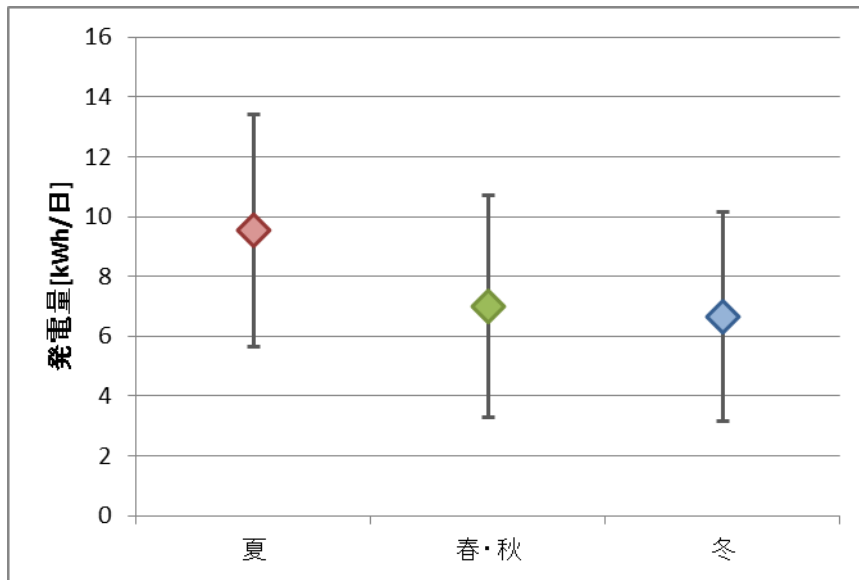


図 3-2 太陽電池の 1 日の発電量

時々刻々の太陽電池出力を見ると、天候による短時間での出力変動を確認することができる。推定された季節ごとの太陽電池出力スケジュールを図 3-3～図 3-5 に示す。太線は季節ごとの平均出力を表している。平均的には、太陽電池の出力は 12 時をピークとしてなだらかに推移することが分かる。細線は 1 日の発電量が平均とほぼ等しくなった日の出力を表している。図から明らかかなように、1 日の発電量が平均的であったとしても時々刻々の出力は大きく昇降しており、天候影響が急峻な出力変動をもたらしていることが推測される。

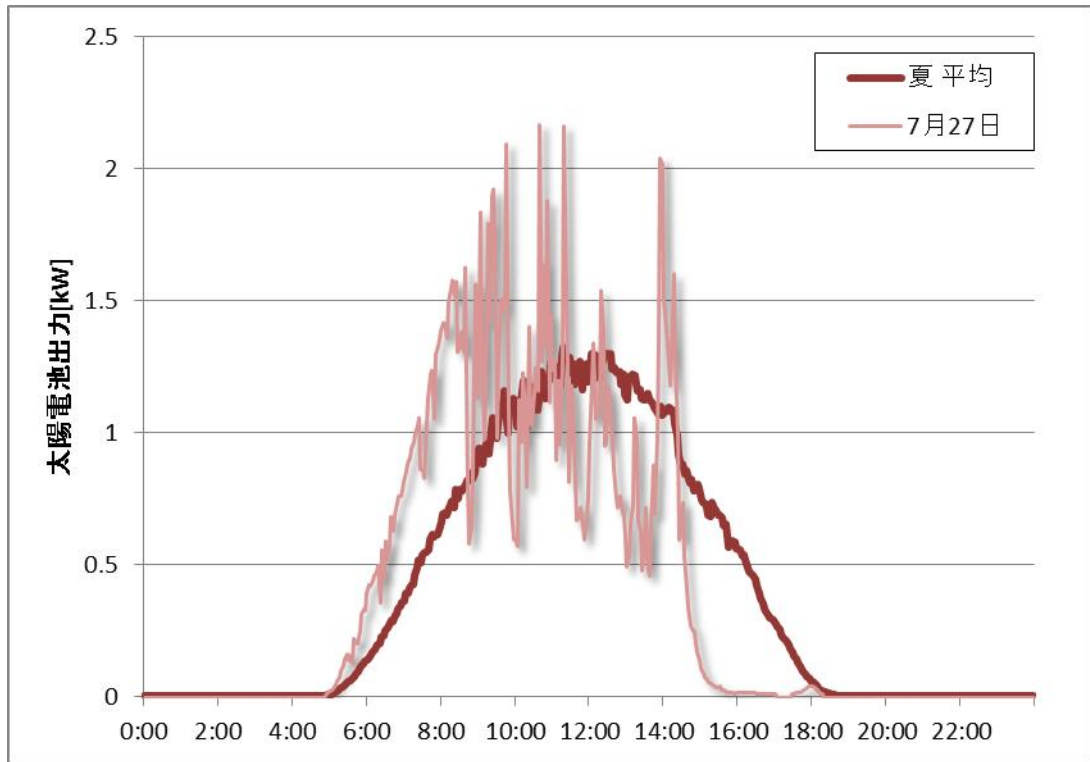


図 3-3 太陽電池出力スケジュール (夏)

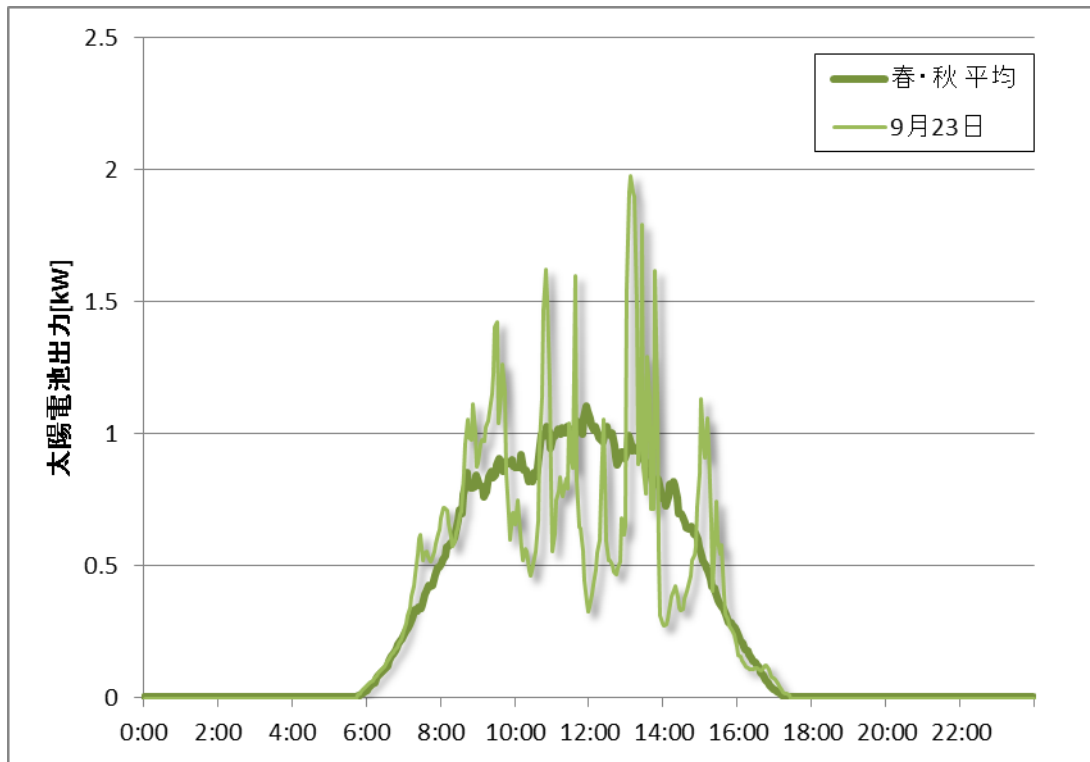


図 3-4 太陽電池出力スケジュール (春・秋)

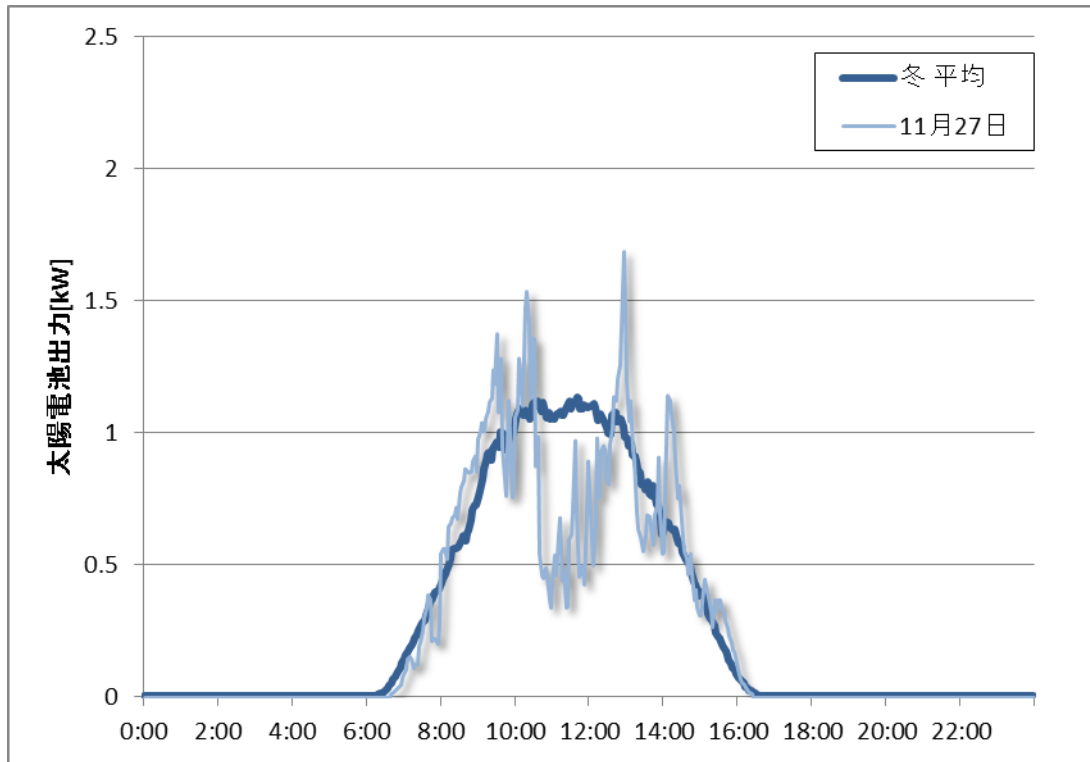


図 3-5 太陽電池出力スケジュール (冬)

3.4.2 時間帯ごとの出力変動

太陽電池の出力変動 $\Delta pvE(t)$ [kW] は時々刻々の出力 $pvE(t)$ [kW] を用いて式 3-4 で表すことができる。

$$\Delta pvE(t) = |pvE(t) - pvE(t - 1)| \quad \text{式 3-4}$$

太陽電池の出力変動によって運転予備力用発電所の運転状況は変化し、なかでも出力変動の最大値（以降、最大変動と呼ぶ）は運転予備力の容量を左右する重要な指標である。一般に、太陽の動きによる出力変動と比べて天候による太陽電池の出力変動はより急峻な動きをするため、最大変動は天候による変動の影響が大きい昼間に発生すると言われている。この通説を確認するために最大変動が発生する時間帯を調べた。

推定結果 90 日分について 1 日における最大変動とその発生時刻を確認した。最大変動の上位 10% にあたる 9 日分について変動の大きさと発生時刻を表 3-1 に示す。1 日の最大変動が発生した時間帯は 10 時～13 時に集中しており、仮説のとおり最大変動は昼間に発生し主に天候影響によるものであることが確認できた。

また季節差に関しては、最大変動が上位 10% となった 9 日のうち 5 日が夏であり、夏に最大変動が大きくなる傾向が見て取れる。最大変動が 1.444kW と一番大きかった 7 月 19 日について、太陽電池の出力スケジュールを図 3-6・図 3-7 に示す。

夏の昼間は電力需要量が最大となって電力会社の運転予備力が最も逼迫するタイミングでもある。そのため、本研究で提案する太陽電池出力変動の抑制手法は、夏に実施されるのが最も効果的といえる。

表 3-1 最大変動（上位 10%）の発生した時間帯

季節	日	最大変動 [kW]	発生時刻
夏	7月19日	1.444	12時52分
夏	8月27日	1.409	11時42分
夏	8月26日	1.307	10時42分
夏	8月3日	1.296	12時03分
秋	9月24日	1.203	11時24分
夏	7月29日	1.155	10時03分
秋	9月22日	1.152	11時42分
秋	10月8日	1.136	11時39分
冬	10月30日	1.133	12時27分

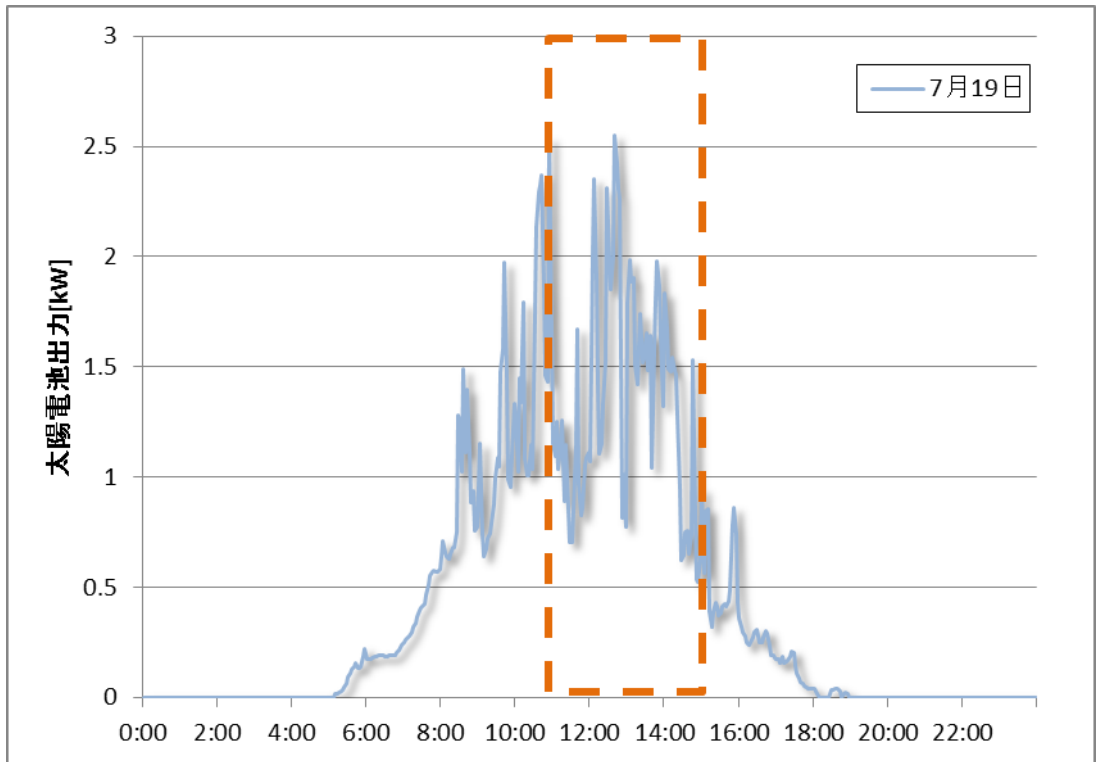


図 3-6 太陽電池出力スケジュール (7月19日)

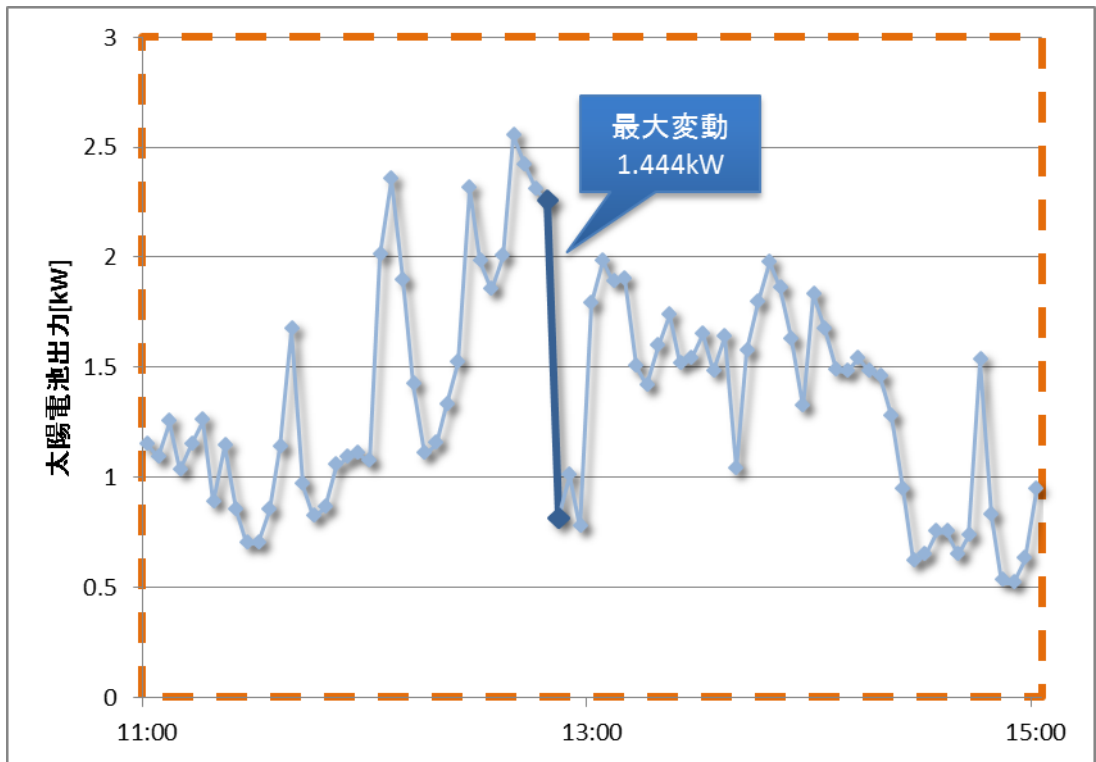


図 3-7 太陽電池出力スケジュール (7月19日 11時00分～15時00分)

3.5 実発電量との比較

モデルによる太陽電池の推定発電量を実発電量と比較することで、モデルの妥当性を評価する。

統計^[19]によると、東京都におけるパネル容量当たりの年間発生電力量は 10 年間（1995 年 4 月～2005 年 3 月）平均で 935.61kWh/kW・年であった。ここからパネル容量 3kW の太陽電池の年間発電量は 2806.83kWh/年と算出される。一方で、モデルの推定結果から算出される年間発電量 2821.76kWh/年となった。

両者は非常に良い一致を示していることから、本モデルは十分妥当性があるものと判断し、以降モデルから得られた太陽電池出力の推定結果を用いて議論を進める。

第4章 家庭エネルギー需要の推定

第4章では家庭エネルギー需要を3分刻みで推定する。家庭内における電力・給湯といったエネルギー需要の大半は、料理・洗濯・テレビ視聴といった生活者の行動にともなって消費されるものである。そこで、マルコフ連鎖を用いて生活者の行動スケジュールを再現し、そこから時々刻々の家庭エネルギー（電力・給湯）需要を推定するモデルを作成した。本モデルと先行研究である河野^[5]による家庭エネルギー需要モデル（以降、河野モデルと呼ぶ）では次のような手法の違いがある。

- (1) 時間刻みを15分から3分に短縮した
- (2) 生活者行動スケジュールの再現にマルコフ連鎖を用いた
- (3) 空調需要の推定に熱負荷シミュレーションソフトを用いた

本モデルの一番の特徴は(1)の時間刻みを3分と細かく設定した点であり、これによって消費電力の大きな家電製品（電子レンジ・ドライヤーなど）を短時間使用した時に発生する急峻な電力需要の変動を再現することができる。またマルコフ連鎖の手法を採用することで、細かい時間刻みの生活行動スケジュールを逐次的に効率よく再現できる。

本モデルの全体フローを図4-1に示す。以降4.1~4.4で手順を追ってモデルを概説した後に、4.5で本モデルでの推定結果と河野モデルでの推定結果を比較し本モデルの妥当性を評価する。本研究では東京で戸建住宅に住む4人世帯（男勤め人・主婦・中学生・小学生）のエネルギー需要推定を行なった。「戸建4人世帯」という設定は共同住宅の増加・平均世帯人員の減少が進む日本の状況を反映したものではないが、この設定は燃料電池などの導入効果を評価するにあたって一般的に用いられるものであり、研究目的を考慮してこの設定を採用した。

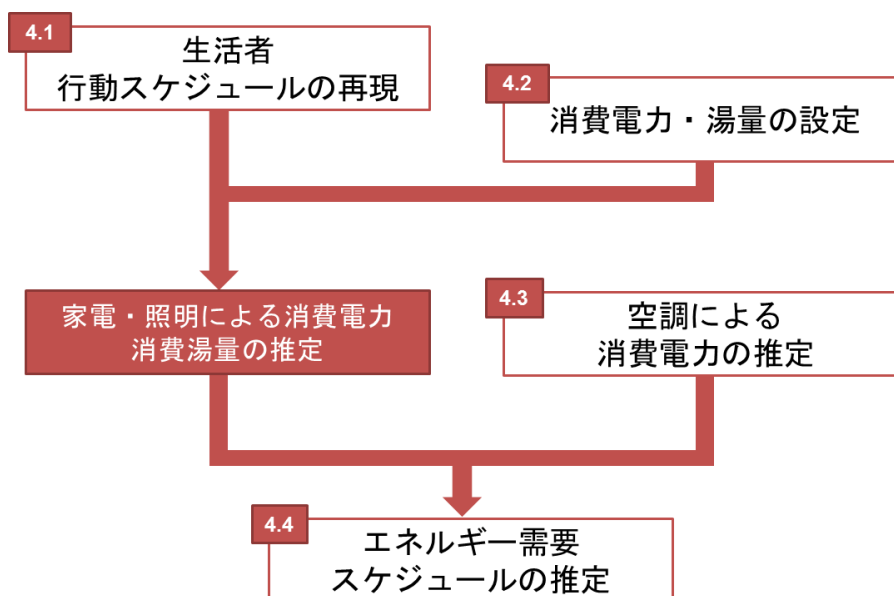


図 4-1 モデルによる家庭用エネルギー需要の推定フロー

4.1 生活者行動スケジュールの再現

4.1.1 再現手法

生活者の行動スケジュールを再現するモデルは、民生家庭部門における需要推定などを目的としてエネルギー分野で広く開発が進められており、各国に様々な先行研究の事例が存在する。再現手法（アルゴリズム）を大別すると、「マルコフ連鎖による手法」と「穴埋め問題による手法」の2種類にまとめることができる^[20]。

マルコフ連鎖による手法は生活行動を時系列に再現するのが特徴であり、海外諸国で先行研究^{[21][22]}がなされている。この手法では各時間における行為の推移確率が必要であり、先行研究ではアンケートによって個人ごとの生活行動記録を収集しそこから推移確率を算出している。

一方で日本では、NHK 放送文化研究所^[23]が各時間における行為者割合という形で生活行動データが整備されているため、行為者割合データをそのまま利用することができる穴埋め問題による手法によって生活行動を再現するのが一般的である。穴埋め問題による手法は時間軸上にランダムに行為を当てはめるため、生活行動の再現が時系列で行われないのが特徴である。そのため先行研究^[24]では深夜の睡眠中に TV 視聴などの活動が挟まるといった、現実感のない生活行動が再現されてしまうという欠点があった。

本研究では生活行動が時系列に再現されるマルコフ連鎖による手法を採用した。国内では行為の推移確率のデータが整備されていないため、すでにデータ整備されている行為者割合から行為の推移確率を算出した。算出方法については **4.1.3** に詳述する。

4.1.2 行動スケジュールの定義

モデルでは生活者のとる「行為」を 3 分間隔で設定し、時系列に行為が連なることによって日々の「行動スケジュール」が決まるものとした。すなわち 1 日の行動スケジュールは $24 \times 60 \div 3 = 480$ 個の行為の連続によって定義される。

また、生活者の行為は統計^[23]を参考に表 4-1 のように「主行為」28 種類と「ながら行為」2 種類に分類した。ながら行為とは、主行為をしながらテレビを見るかどうかを表すもので、主行為が「食事」「療養・静養」「炊事・掃除・洗濯」「子どもの世話」「家庭雑事」「趣味娯楽(ネット)」「趣味娯楽(以外)」「新聞」「雑誌・マンガ・本」「CD・テープ」「その他・不明」の場合のみ「テレビ(ながら)あり」になる可能性がある。すなわち、例えば主行為が「睡眠」でながら行為が「テレビ(ながら)あり」になる確率はゼロである。よって主行為とながら行為を組み合わせると、「テレビ(ながら)なし」の場合が 28 種類で「テレビ(ながら)あり」の場合が 11 種類なので、全 39 種類となる。

表 4-1 行為の分類

主行為		
#	項目	詳細
1	睡眠	30分以上連続した睡眠, 仮眠, 昼寝
2	食事	朝食, 昼食, 夕食, 夜食, 給食
3	身のまわりの用事	洗顔, トイレ, 入浴, 着替え, 化粧, 散髪
4	療養・静養	医者に行く, 治療を受ける, 入院, 療養中
5	仕事	何らかの収入を得る行動, 準備・片付け・移動なども含む
6	仕事のつきあい	上司・同僚・部下との仕事上のつきあい, 送別会
7	授業・学内の活動	授業, 朝礼, 掃除, 学校行事, 部活動, クラブ活動
8	学校外の学習	自宅や学習塾での学習, 宿題
9	炊事・掃除・洗濯	食事の支度・後片付け, 掃除, 洗濯・アイロンがけ
10	買い物	食料品・衣料品・生活用品などの買い物
11	子どもの世話	子どもの相手, 勉強をみる, 送り迎え
12	家庭雑事	整理・片付け, 銀行・役所に行く, 子ども以外の家族の世話・介護・看病
13	通勤	自宅と職場(田畑などを含む)の往復
14	通学	自宅と学校の往復
15	社会参加	PTA, 地域の行事・会合への参加, 冠婚葬祭, ボランティア活動
16	会話・交際	家族・友人・知人・親戚とのつきあい, おしゃべり, 電話, 電子メール
17	スポーツ	体操, 運動, 各種スポーツ, ボール遊び
18	行楽・散策	行楽地・繁華街へ行く, 街をぶらぶら歩く, 散歩, 釣り
19	趣味娯楽(ネット)	趣味・娯楽・遊びとしてインターネットを使う(電子メールは除く)
20	趣味娯楽(以外)	趣味・けいこごと・習いごと, 観賞, 観戦, 遊び, ゲーム
21	テレビ(専念)	テレビ視聴のみをしている BS, CS, CATV, ワンセグの視聴も含む
22	ラジオ	
23	新聞	朝刊・夕刊・業界紙・広報紙を読む
24	雑誌・マンガ・本	週刊誌・月刊誌・マンガ・本・カタログなどを読む
25	CD・テープ	CD・デジタルオーディオプレイヤー・テープ・パソコンなどラジオ以外で音楽を聞く
26	ビデオ	ビデオ・HDD・DVDを見る(録画しておいた番組も含む)
27	休息	休憩, おやつ, お茶, 特に何もしていない状態
28	その他・不明	上記のどれにもあてはまらない行動, または無記入
ながら行為		
#	項目	詳細
0	テレビ(ながら)なし	主行為に専念していて, テレビのながら見をしない
1	テレビ(ながら)あり	主行為をしながらテレビを見る ※主行為が「食事」「療養・静養」「炊事・掃除・洗濯」「子どもの世話」「家庭雑事」「趣味娯楽(ネット)」「趣味娯楽(以外)」「新聞」「雑誌・マンガ・本」「CD・テープ」「その他・不明」の場合のみ

以上から理論的には、1 日の行動スケジュールは 480×39 で最大 18720 通りの組み合わせ

せが考えられる。しかし、行為には時間帯の偏り（深夜には殆どの人が睡眠している）や連続性（1種類の行為は一度にまとめて行なうことが多い）が存在するため、実際に再現される行動スケジュールの組み合わせはこれより小さい。

4.1.3 行為推移確率の算出

モデルでは、時々刻々の行為を決定するためにマルコフ連鎖による手法を採用した。一般的に、マルコフ連鎖とは離散的な時間（ $t=0,1,2,\dots$ ）における状態の集合（ $X(0),X(1),X(2),\dots$ ）が式 4-1 を満たすことを表す^[25]。

$$\Pr(X_t = a_t | X_{t-1} = a_{t-1}, X_{t-2} = a_{t-2}, \dots, X_0 = a_0) = \Pr(X_t = a_t | X_{t-1} = a_{t-1}) \quad \text{式 4-1}$$

$$\equiv P_{a_{t-1}, a_t}$$

これは、状態 X_t は直前の状態 X_{t-1} のみに依存して、どのような過程を踏んで X_{t-1} に到達したかとは独立であることを意味する。推移確率 P_{ij} は過程が状態 i から状態 j へ移る確率である。マルコフ連鎖の例として最も単純なのは P_{ij} が時間に依存しない時で、推移確率の行列 $\mathbf{P}=(P_{ij})$ とすると時刻 t に状態 i である確率を表すベクトル $\bar{p}(t)$ は式 4-2 となり、初期状態の確率ベクトルと推移確率の行列の積で表すことができる。

$$\bar{p}(t) = \bar{p}(t-1)\mathbf{P} = \bar{p}(t-2)\mathbf{P} \cdot \mathbf{P} = \dots = \bar{p}(0) \cdot \mathbf{P}^t \quad \text{式 4-2}$$

このモデルでは、主行為 a （1~28）とながら行為 v （0/1）の組み合わせ（ a,v ）を状態と定義し、この状態が3分おきに確率的に推移して行動スケジュールが生成されると捉えることでマルコフ連鎖を応用できる。ただし推移確率は時間によって変化するので、各時間の行為の推移確率を求めることが必要となる。同様にマルコフ連鎖を用いて行動スケジュールを再現する海外の研究^[21]では、個人から実際の行動スケジュール記録を収集し推移確率を計算している。しかし先行研究での手法では数百~数千の個人から記録収集をする必要があり、非常に手間がかかる。日本の生活行動記録はNHK放送文化研究所の統計調査^[23]によって時々刻々の行為者割合としてデータ整備されているので、本研究では行為者割合から各時間の推移確率を算出する手法を採用した。

まず、主行為とながら行為それぞれについて時刻 t における行為者割合 $R_{act}(t,a)$ と $R_{tv}(t,v)$ を設定した。統計^[23]では15分ごとの行為者割合が記載されているので、途中を直線近似することで3分ごとの行為者割合を割り出した。なお主行為は、行為者割合の総和が必ずしも100%になるとは限らない。これは同じ時間で複数の主行為をおこなっている場合（例えば、「通勤」と「新聞」）は重複して考慮されているためであり、それぞれの行為者割合を単純に足し合わせると100%を超過してしまう。そこでこの超過が最終的なエネルギー需要の推定結果に与える影響が僅かであることを確認した上で、行為者割合同士の比率がそのまま総和が100%になるように補正を行なった。

続いて3分ごとの行為者割合から推移確率を算出した。行為者割合と推移確率の関係は式 4-3・式 4-4 で表すことができる（図 4-2）。誤差 $\delta_{act}(t,a) \cdot \delta_{act}(t,a)$ の二乗和 Δ （式 4-5）が最小になるように二次計画問題を解くことで、時刻 $t-1 \rightarrow t$ における状態の推移確率

$P_{trans}(t;a,v|ap,vp)$ を算出することができる。

$$R_{act}(t,a) + \delta_{act}(t,a) = \sum_{v,ap,vp} \{R_{act}(t-1,ap) \cdot R_{tv}(t-1,vp) \cdot P_{trans}(t;a,v|ap,vp)\} \quad \text{式 4-3}$$

$$R_{tv}(t,v) + \delta_{tv}(t,v) = \sum_{a,ap,vp} \{R_{act}(t-1,ap) \cdot R_{tv}(t-1,vp) \cdot P_{trans}(t;a,v|ap,vp)\} \quad \text{式 4-4}$$

$$\Delta = \sum_{t,a} \delta_{act}(t,a)^2 + \sum_{t,v} \delta_{tv}(t,v)^2 \quad \text{式 4-5}$$

$R_{act}(t,a)$: 時刻 t における主行為 a の行為者割合

$R_{tv}(t,v)$: 時刻 t におけるながら行為 v の行為者割合

$P_{trans}(t;a,v|ap,vp)$: 時刻 $t-1$ の状態 (ap,vp) から時刻 t の状態 (a,v) への推移確率

$\delta_{act}(t,a)$: 主行為 a の行為者割合の誤差

$\delta_{tv}(t,v)$: ながら行為 v の行為者割合の誤差

Δ : 誤差の二乗和 (目的関数)

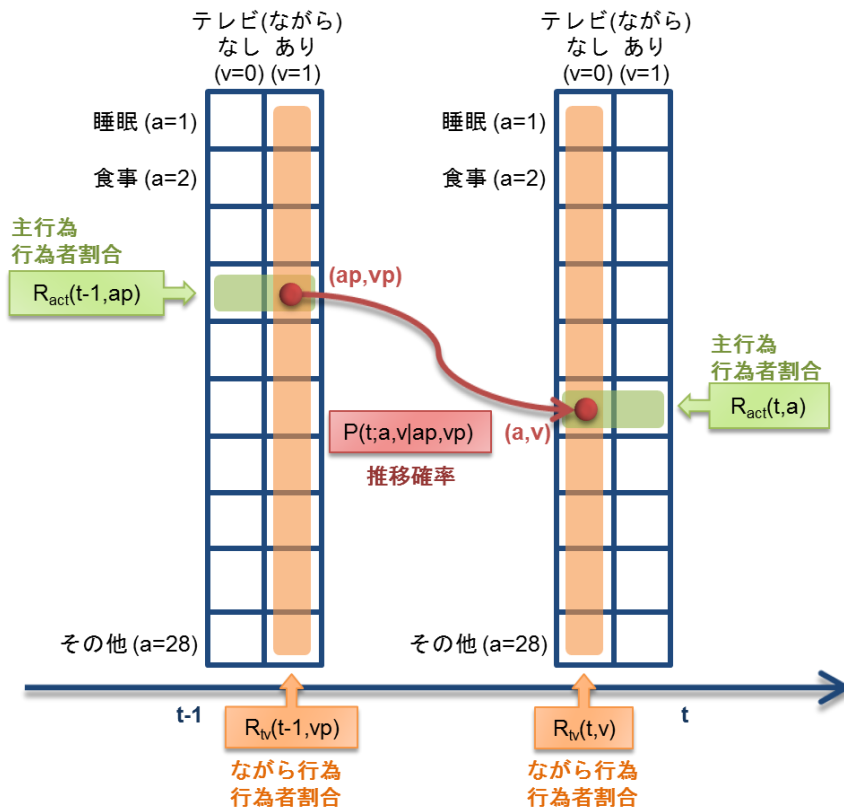


図 4-2 行為者割合と推移確率の関係 (イメージ)

式 4-3・式 4-4 以外にも以下の 3 種類の制約を課したうえで、二次計画法によって推移確率を算出した。

(1) ながら行為に関する制約

4.1.2 で記したように、ながら行為が「テレビ(ながら)あり」になりうるのは、主行為が「食事」「療養・静養」「炊事・掃除・洗濯」「子どもの世話」「家庭雑事」「趣味娯楽(ネット)」「趣味娯楽(以外)」「新聞」「雑誌・マンガ・本」「CD・テープ」「その他・不明」の場合に限る。

そこで、主行為がこれら以外(「睡眠」「身のまわりの用事」「仕事」「仕事のつきあい」「授業・学内の活動」「学校外の学習」「買い物」「通勤」「通学」「社会参加」「会話・交際」「スポーツ」「行楽・散策」「テレビ(専念)」「ラジオ」「ビデオ」「休息」)で、ながら行為が「テレビ(ながら)あり」である状態へと推移する確率をゼロとした。

(2) 行為の順序に関する制約

1日の行動の中で、一定の順序に基づいて行為が行なわれる場合がある。例えば一般的な労働者の平日は、朝に通勤して午前の仕事をし、昼食と昼休みをはきんで、午後の仕事をして夕方～夜にかけて退勤する、という流れとなる。これをモデルで表現すると、「通勤」→「仕事」→「食事」→「休息」→「仕事」→「通勤」という順序で一連の行為が行われることに等しい。学校へ通う学生も同様である。そこで、行為の順序だっで行なわれるように推移確率に適切な制約を加えた。

(3) 行為の連続性に関する制約

実際の生活行動において、作業効率の理由から同じ行為はまとめて行なう傾向がある。例えば、一旦家の中の掃除を始めたら、掃除の目処をある程度付けてから買物など次の行為に移る方が効率良い家事の仕方である。このような、行為がまとめて行われがちである性質のことを「行為の連続性」と呼ぶ。行為の連続性を表現するために、時刻の前後で同じ行為の状態に推移する確率 $P_{trans}(t;a,v/a,v)$ が相対的に大きくなるように制約を加えた。

4.1.4 マルコフ連鎖による行動スケジュールの再現

まず、時刻 0 時 00 分における主行為・ながら行為の行為者割合 $R_{act}(t_0,a) \cdot R_{tv}(t_0,v)$ を用いて、ランダムに 0 時 00 分の行為(初期状態) (a_0,v_0) を決定する。次に、0 時 00 分→0 時 03 分の推移確率 $P_{trans}(t_1;a,v/a_0,v_0)$ を用いて、ランダムに 0 時 03 分の行為 (a_1,v_1) を決定する。続いて、0 時 03 分→0 時 06 分の推移確率 $P_{trans}(t_2;a,v/a_1,v_1)$ を用いて、ランダムに 0 時 06 分の行為 (a_2,v_2) を決定する。以降、推移確率 $P_{trans}(t_3;a,v/a_2,v_2)$ を用いて行為 (a_3,v_3) 、 $P_{trans}(t_4;a,v/a_3,v_3)$ を用いて (a_4,v_4) 、 $P_{trans}(t_5;a,v/a_4,v_4)$ を用いて (a_5,v_5) … というように、順々にランダムに行為を決定していく。以上の手順によって生活者の行動スケジュールの再現を行なった。

行動スケジュールの再現は平日と休日に分けて行ない、再現された平日・休日のスケジュールからそれぞれ一つ選択することで世帯の行動スケジュールとした。再現された平日の行動スケジュールの一例を図 4-3 に示す。マルコフ連鎖の手法を採用したことで深夜にいきなり活動を始めるといった現実感のない行動スケジュールは再現されにくくなっている。一方で、家族同士の行動の関係に注目すると 4 人がそれぞれ食事のタイミングがまちまちであるといった結果となっている。これは行動スケジュールを個人ごとに独立しているためであり、今後は食事や TV 視聴などの行動が家族同時に行われるようにモデルの改良が求められる。

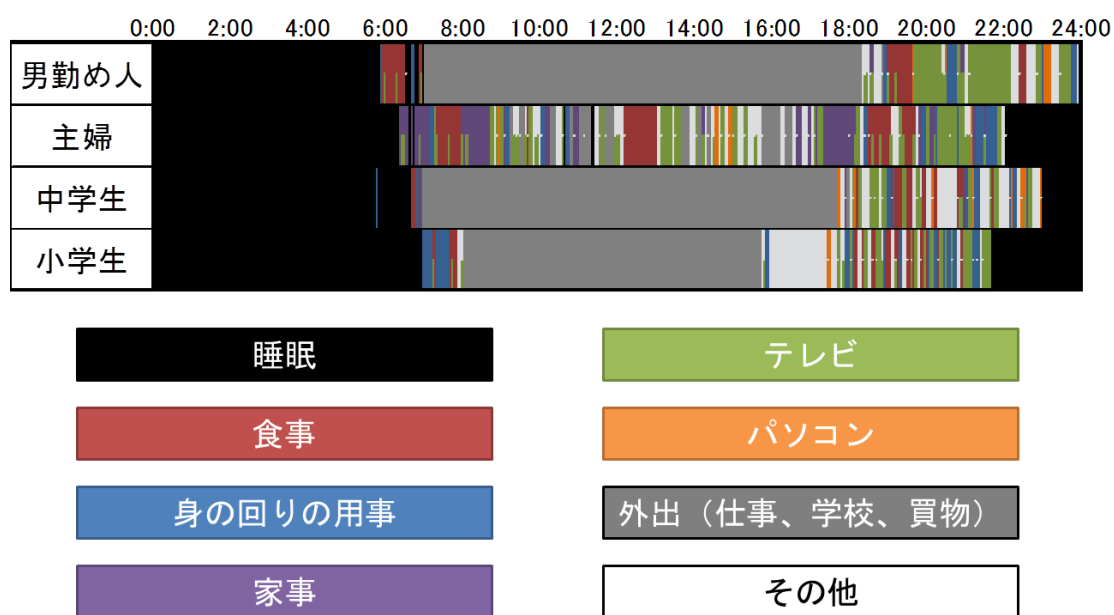


図 4-3 再現した行動スケジュールの例

4.1.5 再現結果と統計の比較

モデルによる行動スケジュールの再現結果に基づいて算出した行為者割合と、統計^[23]の行為者割合を比較する。在宅時間が長く家庭エネルギーの主要消費者である主婦に関して、再現結果と統計による行為者割合の比較を図 4-4・図 4-5 に示す。行為を行なうピークの時間帯や行為同士の割合の比率に関して、再現結果は統計をよく再現できていることが確認できる。再現結果が統計よりも行為者割合の総和を過小評価する傾向があるが、これは 4.1.3 で説明した行為者割合の補正による影響であり、この差異がエネルギー需要の推定結果に与える影響は僅かであることは確認している。

主婦以外の行為者割合の比較は、A 付録に掲載する。

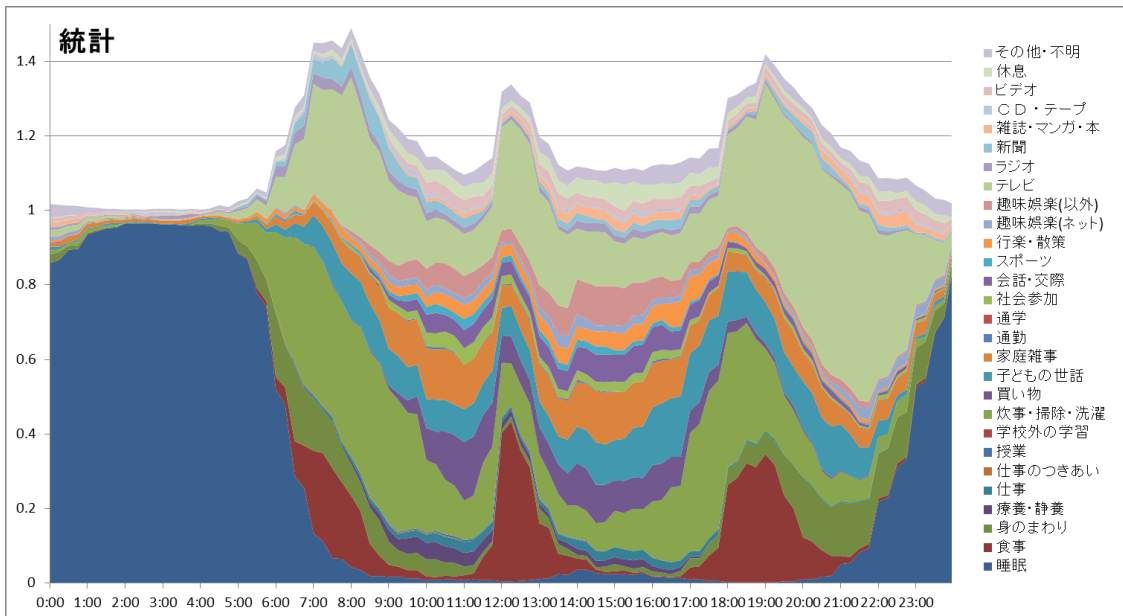
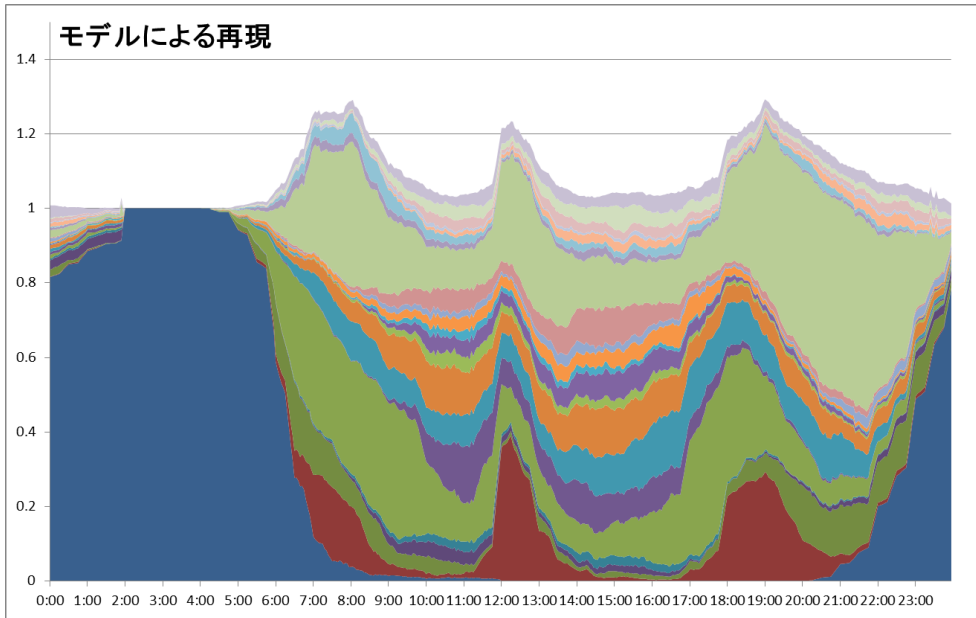


図 4-4 行為者割合 (主婦・平日)

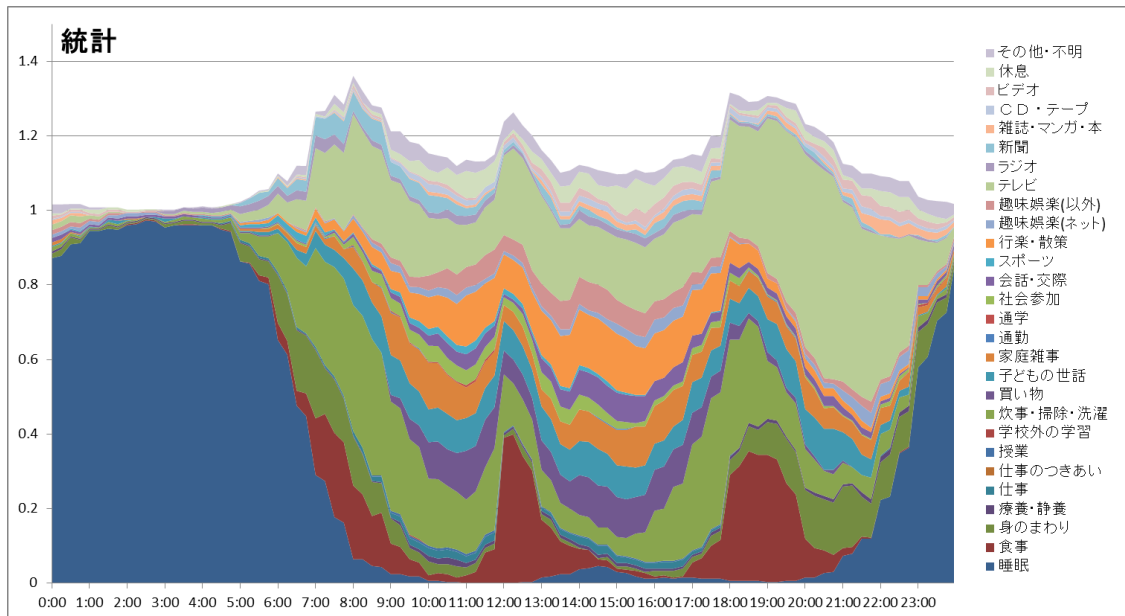
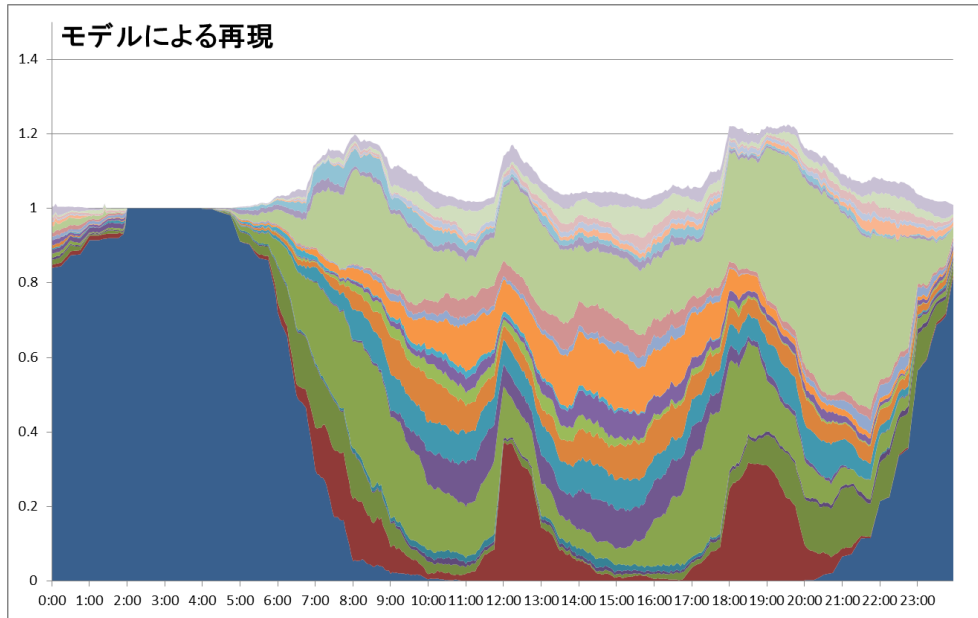


図 4-5 行為者割合 (主婦・休日)

4.2 消費電力・湯量の設定

4.2.1 「身の回りの用事」・「家事」の細分化

主行為のうち「身の回りの用事」と「家事」は多様な行為を含む包括的な分類であり、このままでは行為に必要なエネルギー量を正確に設定することができない。そこで、この2種類の行為をより具体的な行為に細分化した。「身の回りの用事」は行われる時間帯に応じて「トイレ」「洗顔」「入浴」の3種類に分類した。「家事」は時間帯に加え、その後一定時間以内に家族の誰かが「食事」をするかに応じて「炊事」「洗濯」「掃除」「アイロンがけ」の4種類に分類した（図 4-6）。



図 4-6 「身の回りの用事」「家事」の細分化（イメージ）

4.2.2 家電機器の消費電力の設定

家庭で使用される家電機器を 15 種類に分類して消費電力を設定し、機器に対して使用される行為を対応付けることで、家電機器による消費電力を推定した。家電機器の消費電力を表 4-2 に示す。設定した消費電力の多くは、山口ら^[26]による計測値を参考にした。セルが灰色になっているもの（炊飯器・洗濯機・冷蔵庫・温水便座）に関しては計測値が得られなかったため、空気調和・衛生工学会^[27]のデータを参考にした。

表 4-2 家電機器の消費電力

家電機器	対応する行為	消費電力 [W]
ドライヤー	洗顔、入浴	775
電気スタンド	学習、読書	34
電子レンジ	炊事	1141
炊飯器	炊事	1200
洗濯機	洗濯	400
掃除機	掃除	776
アイロン	アイロンがけ	1068
パソコン	ネット	50
テレビ	テレビ、ビデオ	107
ラジオ	ラジオ	11
コンポ	音楽	40
HD/DVDレコーダ	ビデオ	30
冷蔵庫	常時	80
温水便座	常時	35
その他・待機電力	常時	200

4.2.3 照明の消費電力の設定

住宅の部屋ごとに照明の消費電力を設定し、それぞれに部屋に在室して行われる行為を対応付けることで、照明による消費電力を推定した。照明の消費電力を表 4-3 に示す。消費電力は省エネ法の判断基準^[28]の「レベル0」に基づいて設定した。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人家族の戸建住宅で「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(図 4-7)。住宅の間取りは後述する日本建築学会住宅用標準問題のものと一致しないが、部屋数とその大きさはほぼ等しく十分適合可能であると判断した。

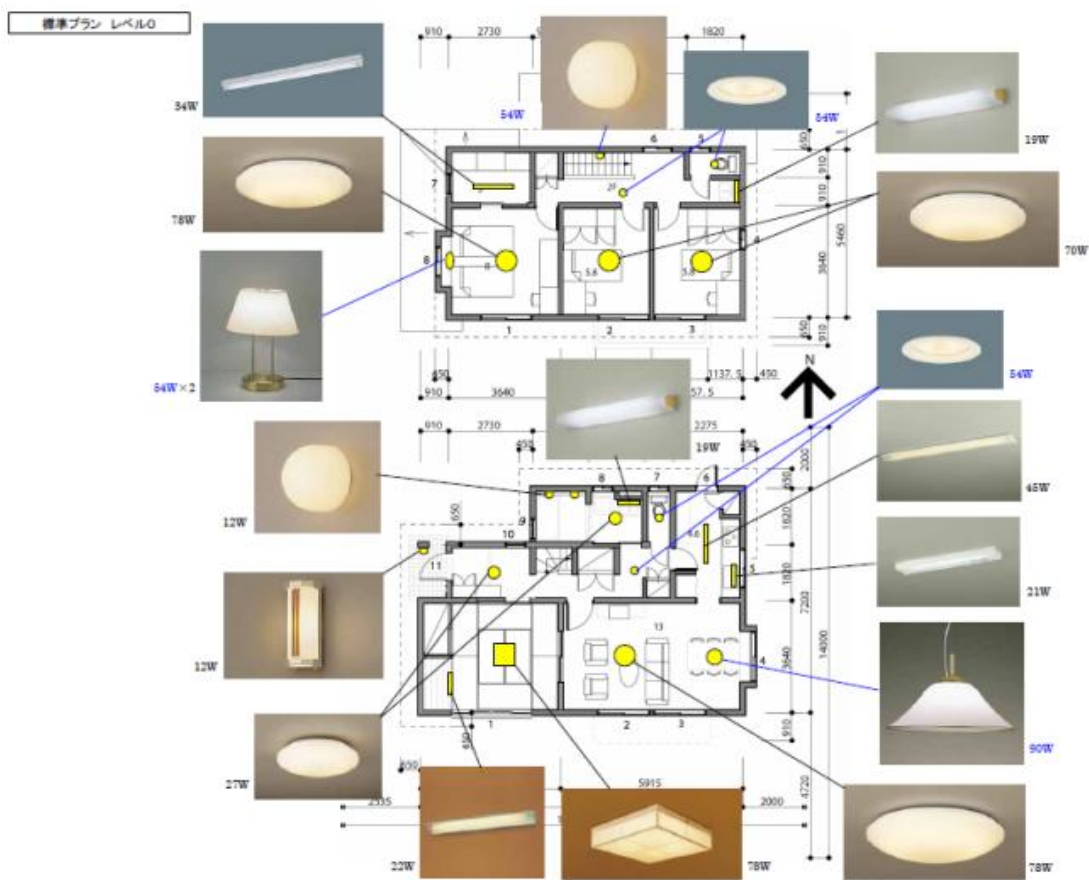


図 4-7 省エネ法判断基準「レベル0」の照明設備

表 4-3 照明の消費電力

照明場所	対応する行為	消費電力 [W]
リビング	アイロンがけ、会話、世話、テレビ、ネット、新聞、ビデオ	78
ダイニング	食事	90
キッチン	炊事	66
主寝室	療養、学習、趣味、ラジオ、読書、音楽、休息	186
洋室1	療養、学習、趣味、ラジオ、読書、音楽、休息	70
洋室2	療養、学習、趣味、ラジオ、読書、音楽、休息	70
洗面	洗顔、洗濯	46
浴室	入浴	24
トイレ	トイレ	54
掃除	掃除	90

4.2.4 消費湯量の設定

4.2.2 と同様に空気調和・衛生工学会^[27]のデータを参考に、給湯温度を 42℃として行為ごとの消費湯量を表 4-4 のように設定した。行為によっては常に湯を消費しているわけではないものがあるため、それぞれ行為中に湯の消費が生じる確率を「入浴」は 1/3、「炊事」は 1/2 と設定した。また、最初の人「入浴」する直前 30 分間に「湯はり」が行われ、「湯はり」が完了してから 1 時間おきに 15 分間の「追いだき」が 3 回行われるものとした。

表 4-4 消費湯量

対応する行為	消費湯量 [リットル/分]			消費確率
	冬	春・秋	夏	
洗顔	1.00	0.00	0.00	1
入浴	1.67	2.00	2.50	1/3
炊事	0.80	0.00	0.00	1/2
湯はり	6.67	6.67	6.67	1
追いだき	2.67	2.67	2.67	1

4.3 空調による消費電力の推定

家庭における空調（暖房・冷房）負荷はすべてエアコンによって賄われると仮定して、服部^[31]の手法を参考に空調による消費電力を推定した。

4.3.1 熱負荷シミュレーションによる空調負荷の算出

まず、熱負荷シミュレーションソフト「SMASH for Windows ver.2」（以降、SMASH と略称する）を使用して、空調で室温を保つのに必要な熱負荷（空調負荷）を算出した。

4.3.1.1 SMASH の概要

SMASH は熱回路網により多数室住宅の動的熱負荷計算を行うプログラムで、立地における気象条件、室容積や内部発熱・換気量、建材の種類などを入力することで、時々刻々の空調負荷や後述する熱損失係数（Q 値）を計算することができる。プログラムの構成を図 4-8 に示す。

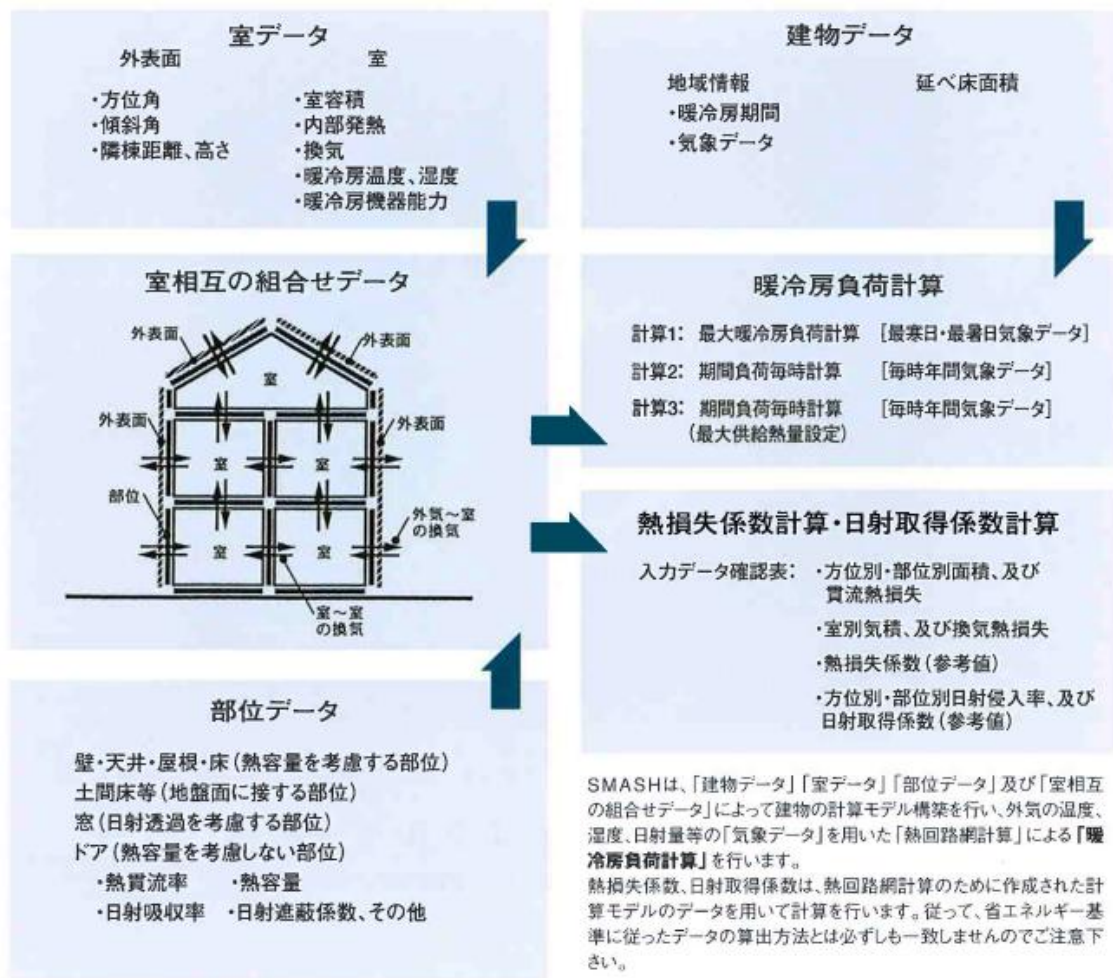


図 4-8 SMASH の構成^[32]

4.3.1.2 住宅の間取りと建材の設定

住宅の間取りは、日本建築学会住宅用標準問題のものを採用した（図 4-9）。また壁・天井・屋根・床・窓といった建材の種類・厚さ（部位データ）は、住宅の Q 値が新省エネ基準相当になるように設定した。Q 値は住宅の断熱性能を数値化したもので、各部位データや換気量などによって式 4-6 で決定される^[34]。Q 値が小さいほど、住宅の断熱性能が高いことを表す。

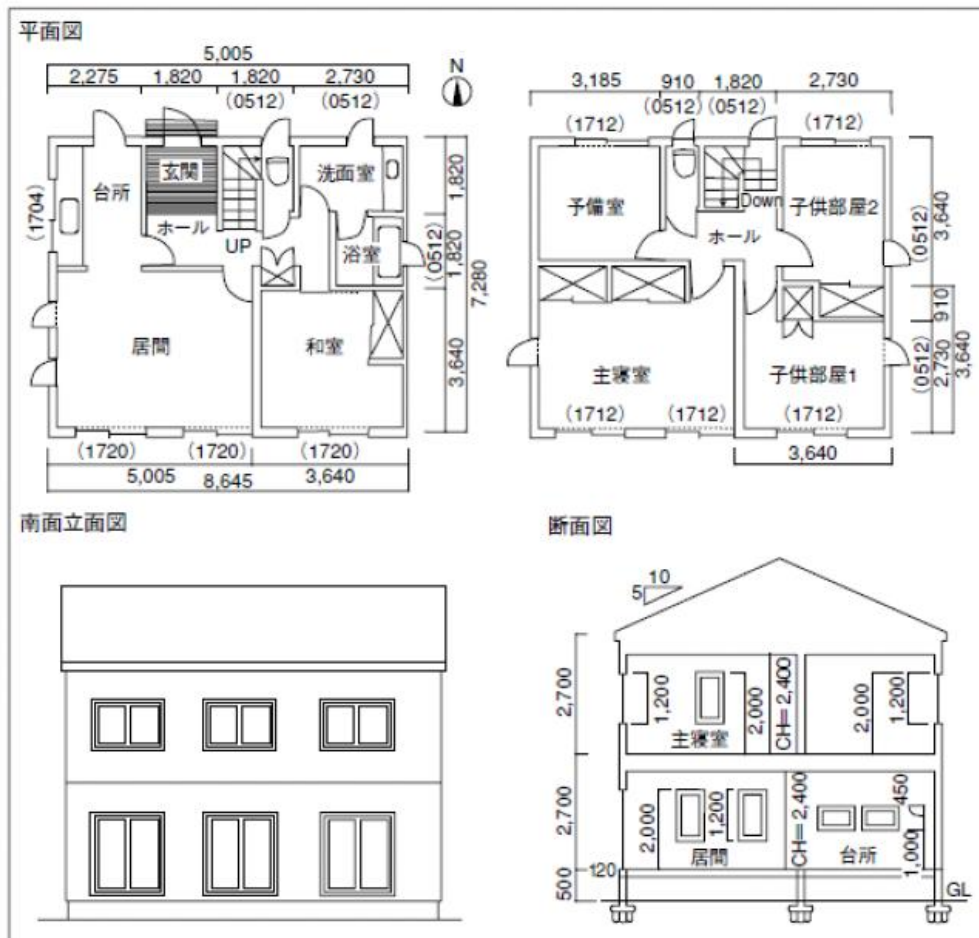


図 4-9 住宅用標準問題の間取り

$$Q = \frac{KA}{F} = \frac{\sum_i (A_i K_i + L_i K_F) + c_a r_a V n}{F} \quad \text{式 4-6}$$

Q [W/m²k] : 熱損失係数

KA [W/K] 総合熱貫流率

A_i [m²] : 外気との熱的な境界を構成する部位（外壁・窓・床など）の面積

K_i [W/m²K] : 各部位の熱貫流率

L_i [m] : 土間床の周長

K_F [W/mK] : 土間床の単位周長あたりの熱貫流率

$c_a r_a$ [kJ/m³K] : 空気の容積比率 (=1.2)

V [m³] : 熱的な境界で囲まれた内部の気積

n [回] : 換気回数

4.3.1.3 空調負荷の算出

住宅における空調使用は生活者の行動スケジュールによって決まるため、本来であれば4.1で再現された世帯ごとの行動スケジュール一つ一つに対して空調負荷を算出することが望ましい。しかし SMASH による空調負荷計算は非常に時間を要するため、本研究では平均的な行動スケジュール一つを選択し、その在室状況に基づいて標準的空调負荷を計算し全ての世帯に当てはめることとした。月ごとの算出結果の一例を図 4-10 に示す。

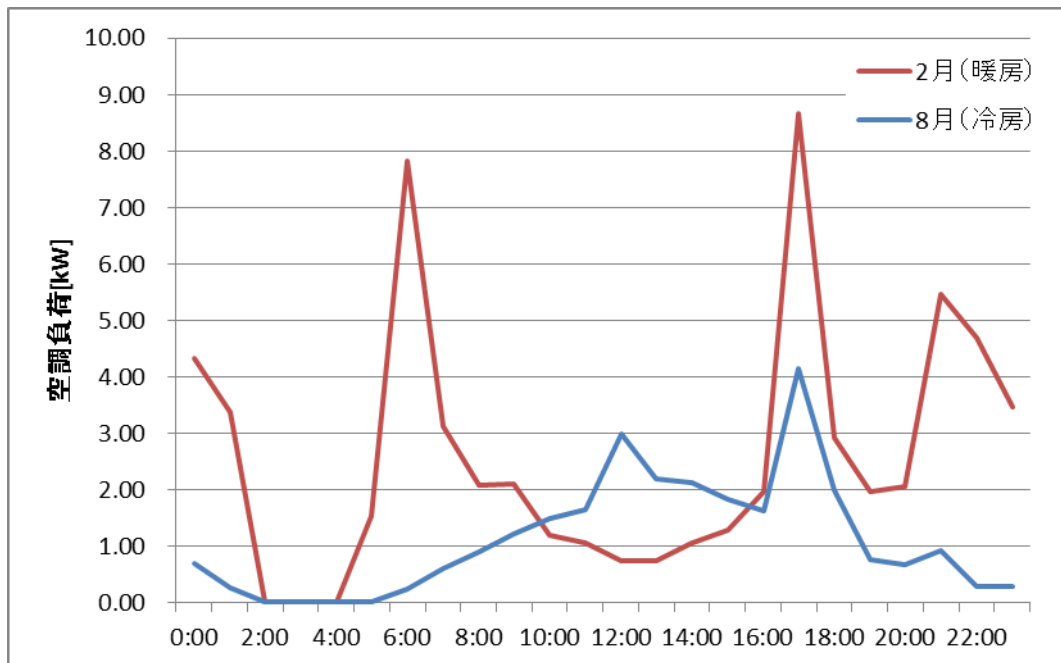


図 4-10 算出された空調負荷の例

4.3.2 エアコン COP の算出

家庭で一般的に利用されるヒートポンプ型エアコンは、空気の圧縮・膨張によって住宅内外の熱変換を行うため、成績係数（COP. 消費電力 1kW あたりの冷房・暖房性能）は室内温度と外部気温に応じて変化する。そのためエアコンの COP には季節差があり、カタログに掲載される定格 COP から空調による消費電力を正確に推定することはできない。

そこで佐藤^[35]は実機計測によって、室内外の温度・湿度からエアコンの COP を簡易的に推定する手法を編み出した。本研究ではこの手法を利用して、暖房・冷房の COP を推定した。以下に手法を概説する。

4.3.2.1 エアコン機械効率の算出

カタログの定格 COP を理論 COP で割ることで、暖房・冷房それぞれの機械効率を算出する。理論 COP は、JIS（日本工業規格）の温度条件において冷媒の熱物性値と理論冷凍サイクルから機械効率を 1.0 として冷凍サイクル計算ソフトウェア「CYCLE_D」を用いて算出した値であり、暖房は 9.44、冷房は 6.13 となる。

4.3.2.2 理論 COP の算出

凝縮温度と蒸発温度の温度差 ΔT で場合分けして以下のように冷房の理論 COP を計算し、暖房の COP = 冷房の COP + 1 として求める。

$3^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 11^{\circ}\text{C}$	冷房の COP = $274 / \Delta T^{1.03}$
$11^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 22^{\circ}\text{C}$	冷房の COP = $340 / \Delta T^{1.12}$
$22^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 25^{\circ}\text{C}$	冷房の COP = $385 / \Delta T^{1.16}$
$25^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 36^{\circ}\text{C}$	冷房の COP = $499 / \Delta T^{1.24}$
$36^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 40^{\circ}\text{C}$	冷房の COP = $709 / \Delta T^{1.33}$
$40^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 60^{\circ}\text{C}$	冷房の COP = $900 / \Delta T^{1.40}$

なお、暖房の場合は凝縮温度 = 設定温度 + 7°C、蒸発温度 = 外気温度 - 7°C とし、冷房の場合は蒸発温度 = 室内露点温度 - 7°C、凝縮温度 = 外気温度 + 7°C とする。室内露点温度は、設定した温度・相対湿度から空気線図を用いて求めることができる。

4.3.2.3 エアコンシステム COP の推定

4.3.2.1 で求めた機械効率と 4.3.2.2 で求めた理論 COP をかけることで、エアコンシステムの COP を算出する。

推定に使用するパラメタとして、定格 COP を 5.2（暖房）・4.2（冷房）、暖房時の設定温度を 24°C、冷房時の室内露点温度を 12.3°C（設定温度 27°C・相対湿度 40%）、外気温度は過去の気象データ^[36]から月ごとの最低気温と平均気温の平均（暖房）／最高気温と平均気温の平均（冷房）と設定し、月ごとにエアコンの COP を推定した。

推定の結果、平均 COP は 4.77（暖房）／5.47（冷房）となった。

4.3.3 空調消費電力の推定

4.3.1・4.3.2の結果から月ごとに空調によって消費される電力を算出し、それぞれ暖房と冷房に分けて平均をとることで夏・冬の空調による消費電力を推定した(図 4-11)。

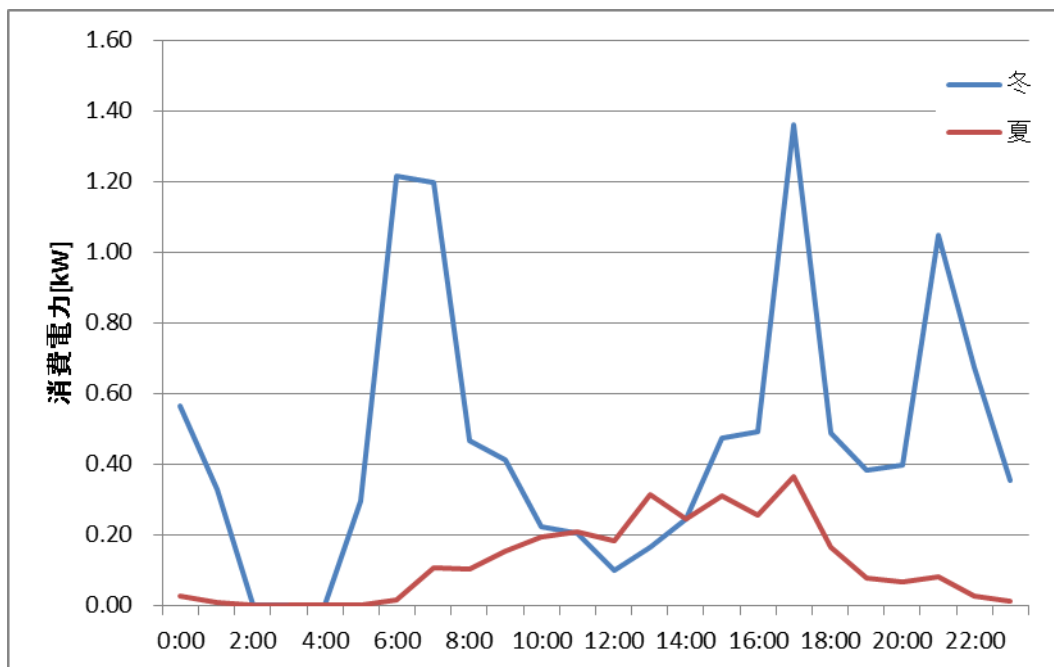


図 4-11 空調による消費電力

4.4 エネルギー需要スケジュールの推定

4.2の設定に基づいて家電機器・照明による電力需要と給湯需要を推定し、さらに4.3で得られた空調による電力需要を加えることで、時々刻々の電力・給湯需要のスケジュールを推定した。推定にあたって想定した諸条件を整理して表 4-5 に示す。200 世帯平均の需要とその中の特定世帯(世帯 A)の需要を図 4-12~図 4-17 に示す。以降、季節ごとに需要の傾向を説明する。

表 4-5 想定した条件

世帯構成	4人(男勤め人・主婦・中学生・小学生)
地域	東京
住宅断熱基準	新省エネ基準
空調設定温度	暖房24°C, 冷房27°C
給湯温度	42°C

4.4.1 春・秋のエネルギー需要

まず電力需要の平均的な傾向を見る。朝 4 時過ぎから生活者が起床するにつれて徐々に増加して 6 時過ぎにピークを向かえる。その後 7 時過ぎまで徐々に減少しながら 0.5kW 付近で安定化し、夜に生活者が就寝して 22 時頃から再度徐々に減少する。平日・休日を比較すると、在宅者が少ない平日の日中（7 時～17 時）は休日に比べ電力需要が少ない。

つづいて個々の世帯での細かな電力需要変動を見る。平日は朝（5 時～9 時）と夕方から夜にかけて（16 時～23 時）、休日は深夜以外（5 時～23 時）において、電力需要の変動が大きい。理由として、いずれの時間帯も在宅者が多く活動が活発であることが考えられる。

給湯需要に関しては、平日・休日を問わず夜（17 時～24 時）に需要が集中している。これは「湯はり」「追いだき」「入浴」といった湯を消費する行為が夜に行われるためである。

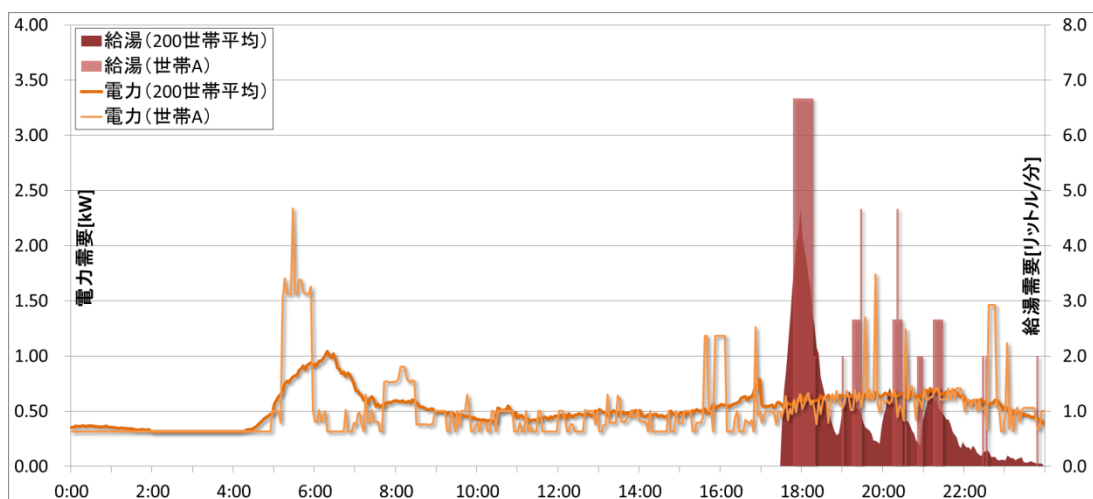


図 4-12 電力・給湯需要スケジュール（春・秋 平日）

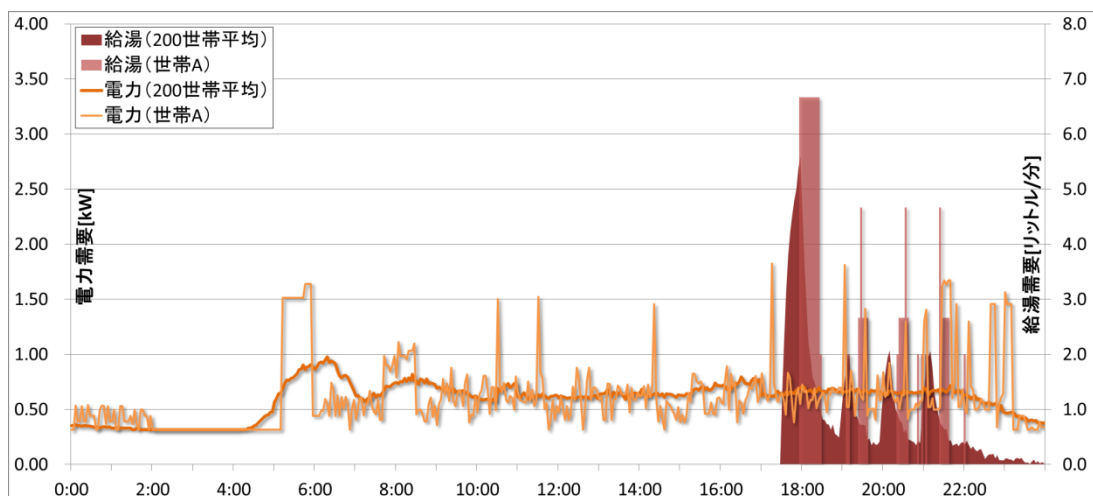


図 4-13 電力・給湯需要スケジュール（春・秋 休日）

4.4.2 冬のエネルギー需要

冬は暖房の利用によって朝（5時～9時）と夜（17時～23時）における電力需要のピークが先鋭化する傾向が見られる。また炊事でも湯を消費するようになり、朝（5時～9時）と昼（11時～13時）にも給湯需要が生じるようになる。しかし日中の給湯需要は、夜の入浴による給湯需要と比べ僅かである。

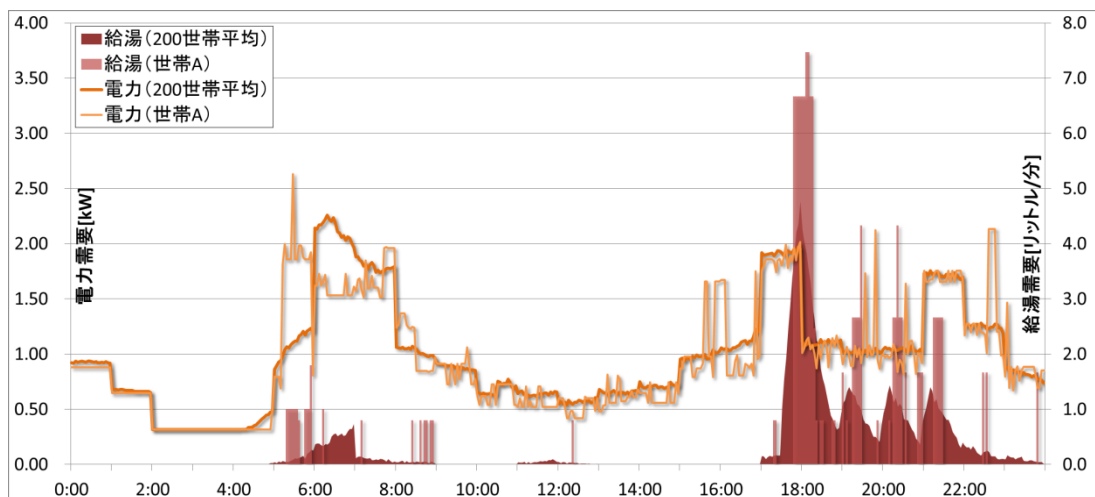


図 4-14 電力・給湯需要スケジュール（冬 平日）

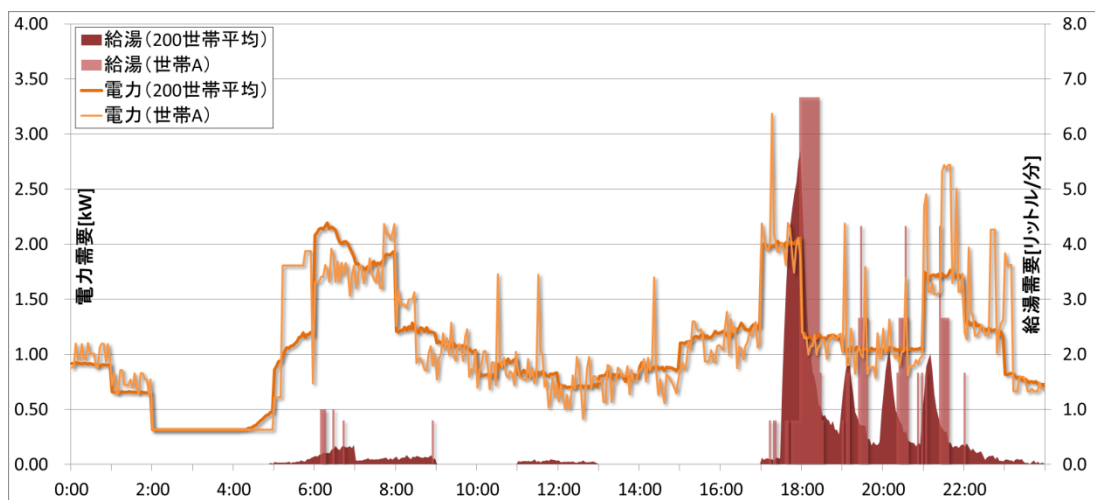


図 4-15 電力・給湯需要スケジュール（冬 休日）

4.4.3 夏のエネルギー需要

夏は冷房の利用によって日中（9時～17時）の電力需要が底上げされ、1日全体では電力需要が平滑化する方向に向かう。給湯需要に関しては、春・秋における需要と大きな違いは見られない。

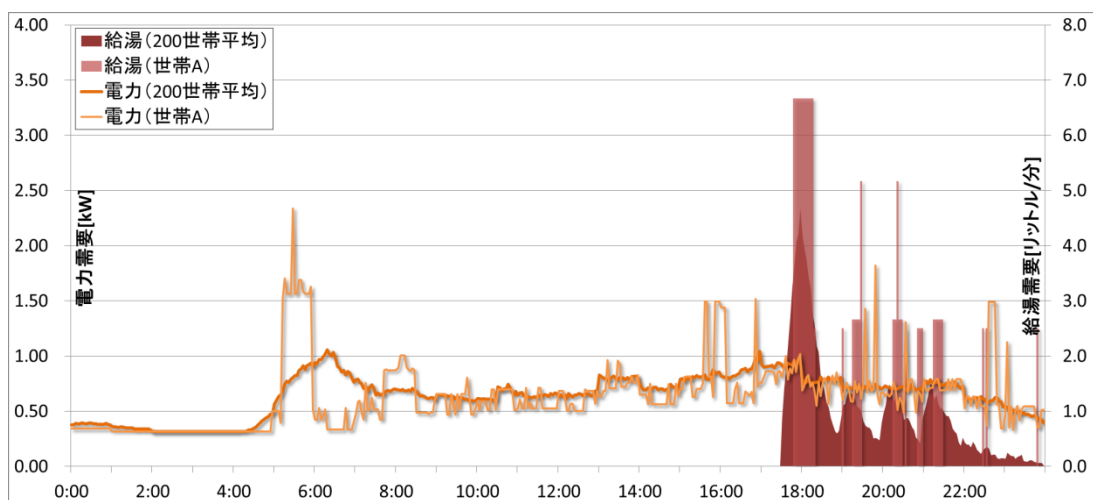


図 4-16 電力・給湯需要スケジュール（夏 平日）

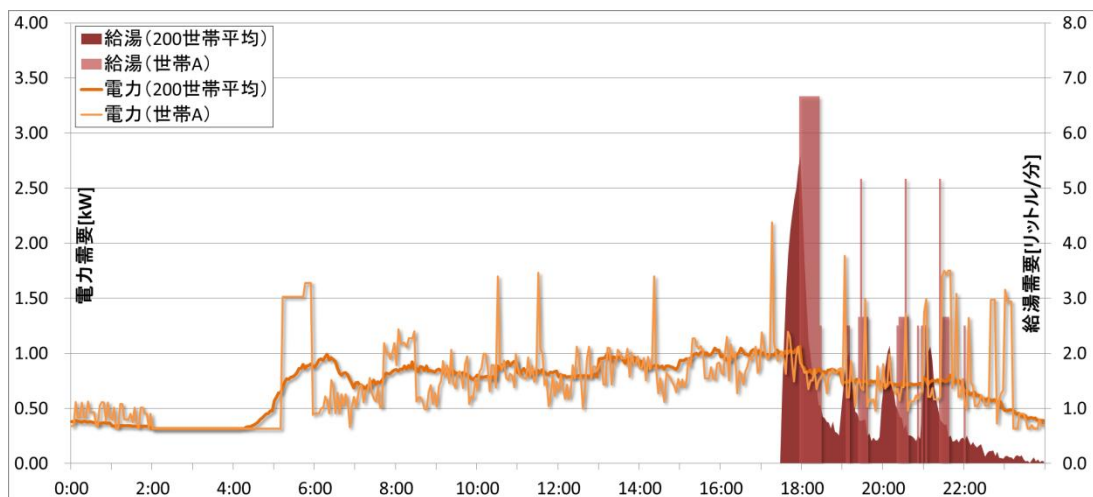


図 4-17 電力・給湯需要スケジュール（夏 休日）

4.5 河野モデルとの比較

モデルから得られた家庭エネルギー需要の推定結果は、異なる手法によって得られた結果と比較することでモデルの妥当性を評価することができる。仮想的に作られたモデルの妥当性を評価するための最善の手段は、現実的に実測から得られた結果と比較することである。しかし、想定した条件に合う世帯（東京在住の戸建 4 人世帯）の家庭エネルギー需要データを入手することは、実データは勿論、統計値に関しても非常に困難である。そこで本研究では次善の策として、先行研究である河野モデルから得られたエネルギー需要の推定結果との比較を行なった。

河野^[5]は日本の世帯構成を 8 種類に分類して 8 通りの家庭エネルギー需要をモデルから推定し、推定結果を世帯数に応じて掛けあわせた民生家庭部門の電力・給湯需要が統計^[37]と非常に良く一致することを確認していることから、河野モデルの妥当性は非常に高いと判断した。本モデルと河野モデルで同一条件のもとで得られた電力・給湯需要の推定結果を比較することで、間接的に本モデルの妥当性を評価できる。

電力需要の比較を図 4-18、給湯需要の比較を図 4-19 に示す。年平均で比較すると、両者に大きな齟齬はないことが確認できる。季節別に見ると冬の電力需要を本モデルが過大に評価しており、これは空調による電力需要の推定に異なる手法を用いているためである。しかし、(1) 空調による電力需要の推定は住宅構造や気象条件などの設定が現実に十分即している、(2) 季節的な電力需要の差異が年平均では大きな影響を与えていない、という 2 点からモデルの妥当性を損なうとはいえない。

以上から、本モデルは妥当性があるものと判断し、以降モデルから得られた家庭エネルギー需要の推定結果を用いて議論を進める。

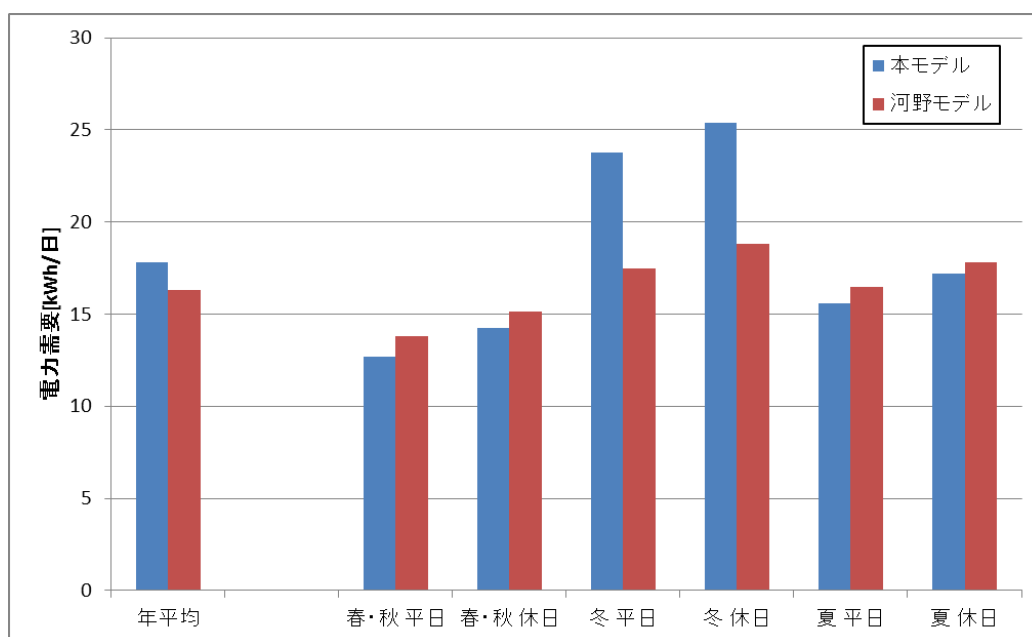


図 4-18 電力需要推定結果の比較

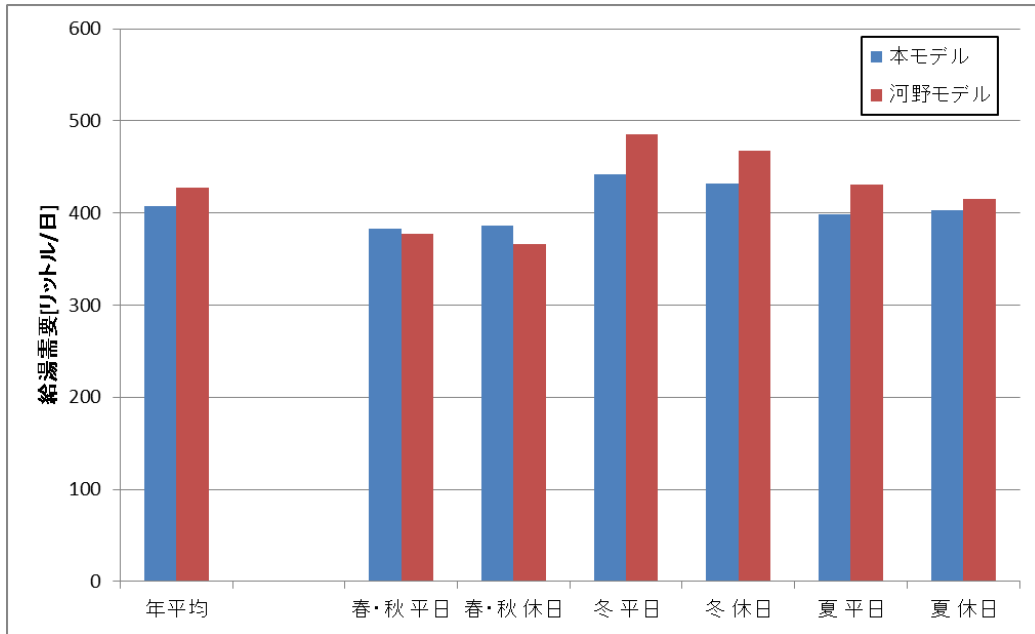


図 4-19 給湯需要推定結果の比較

第5章 家庭エネルギー需給シミュレーション

第3章・第4章では、それぞれ太陽電池出力・家庭エネルギー需要を3分刻みで推定した。第5章では推定結果をインプットデータとして現状における家庭エネルギー需給をシミュレーションする。

家庭用燃料電池・蓄電池・太陽電池などで構成される家庭用エネルギー機器システムは、機器性能・エネルギーの流れ・料金体系などを制約条件として定式化した上で、特定の目的関数についての最適化計算として表現することができる。目的関数をコスト（イニシャルコスト+ランニングコスト）の最小化を目的関数として、機器の導入に応じた家庭エネルギー需給のシミュレーションを行なった。最適化計算によるエネルギー需給シミュレーションは多くの先行研究事例^{[29][30]}によって有効性が確認されており、本研究では服部^[31]のシミュレーションモデルをベースとして大幅に改良し、計画問題の種類は燃料電池の起動/停止など二値的な状態を表現するために、混合整数計画問題（mixed integer programming, MIP）を選択した。モデルの改良点は主に次の点が挙げられる。

- (1) 時間刻みを15分から3分に短縮した
- (2) 新たに蓄電池を追加した
- (3) 燃料電池の起動による電力消費を考慮した
- (4) 機器性能・料金体系を更新した

モデル内のエネルギー流れ図を図5-1に示す。以降5.1でシミュレーションにおける機器仕様・料金体系の設定やCO₂排出量の算出方法を示し、5.2で設定の定式化を示す。

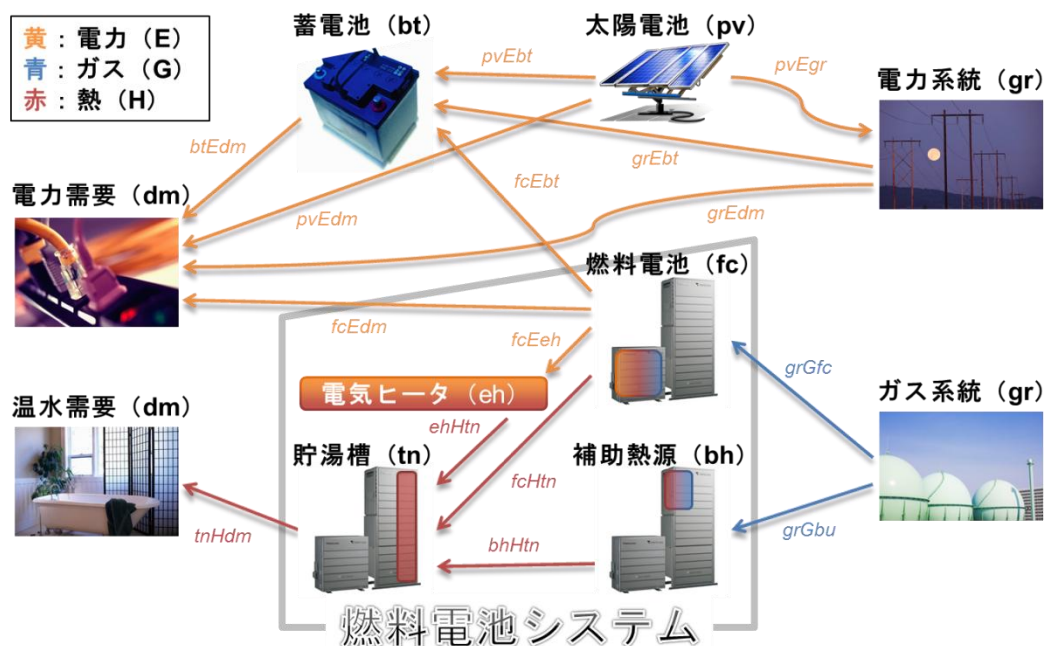


図 5-1 電力・ガス・熱の流れ図

5.1 シミュレーションにおける諸設定

5.1.1 エネルギー機器仕様

家庭用太陽電池システム・従来型給湯器・蓄電池・太陽電池の 4 種類のエネルギー機器を考慮に入れた。

5.1.1.1 家庭用燃料電池システム

家庭用燃料電池システム（エネファーム）の製品仕様は、パナソニック株式会社製（品番：NA-0111ARS-K）^[38]のものを参考にした。これは戸建住宅での利用を想定して 2011 年 4 月に発売され、東京ガス・大阪ガス・東邦ガス・西武ガスなど都市ガスを扱うガス会社で広く採用されている標準的なモデルである。

家庭用燃料電池システムは燃料電池ユニットと貯湯槽から構成される。

(1) 燃料電池ユニット

固体高分子形燃料電池（PEFC）であり、燃料は 13A 都市ガス（発熱量 12.5kWh/m³（高位発熱量基準））である。定格運転時はガス消費量 2.08333 kW，発電出力 0.75kW 熱出力 0.94kW で総合効率 81%（高位発熱量基準）である（うち、発電 36%，熱回収 45%）。部分運転時も効率は定格時と等しいものとし、最低負荷率は 33.33%である。

また本研究では、燃料電池を起動する際に発生する電力消費を新たに考慮に入れた。さらに急激な出力変動による消耗を防ぐために、出力制御は 15 分間隔で行なうものとする。

(2) 貯湯槽

60 度の湯を 200L 貯めることができる。貯湯槽は燃料電池からの排熱以外に、補助熱源機（熱回収効率 80%）と電気ヒータ（変換効率 90%）を熱源とすることもできる。また貯湯槽からは一定の割合で放熱が発生する。

機器価格は 2,761,500 円、補助金は燃料電池普及促進協会の 2011 年度第 3 期補助金^[39]を参考に 850,000 円とする。耐用年数は 10 年とする。

5.1.1.2 従来型給湯器

家庭用燃料電池システムを利用していない家庭で、一般的に利用されるタイプのガス給湯器である。熱回収効率 80%で、機器の価格 360,000 円、補助金なしとする。耐用年数は 10 年とする。

5.1.1.3 蓄電池

蓄電池の製品仕様は、家庭用燃料電池エネファーム用「停電対応システム」（品番：ESK-I1.5B07-T）のものを参考にした。これは東日本大震災を受けて、停電時も家庭用燃料電池システムが利用できるようにするために、2012 年 2 月に発売された。パナソニック株式会社製の家庭用燃料電池は運転時に外部電源からの電力供給を必要とし、普段は系統から電力の供給を受けている。しかし東日本大震災直後の停電の際は系統電力が得られな

いため運転できず、一般に“自家発電機”として考えられていた燃料電池が停電時に利用できないという問題が浮き彫りとなった。そこで家庭用燃料電池のオプションとして蓄電池を設置することで、蓄電池からの電力供給によって停電時も燃料電池を運転することが可能となった。

このように本研究で参考にした蓄電池は「停電対策」が第一目的であり、「家庭用燃料電池の効率的運転による経済性の改善」を必ずしも狙ったものではない。つまり蓄電池の導入は経済性の見合うものではないことが予想される。しかしながら、多様な電源を活用する次世代型電力網の構築が期待されるなかで、燃料電池と蓄電池の併用システムとして現状で最も参考にできるものと判断し、これを採用した。

小型制御弁式鉛蓄電池で蓄電池総容量は 6.6kWh、インバータ容量は 1.5kVA である。充放電効率は 90%とし、蓄えられた電力は 0.04%/h の割合で自然放電する。

また蓄電池は蓄電率（総容量に対する蓄えられた電力量の割合）が 100%（満タン）や 0%（空っぽ）の状態になると消耗は激しく、長期間にわたって蓄電池を活用するためには常に適度な蓄電率を維持することが望ましい。そこで蓄電率は 10%～90%の間で制御する。

機器価格は 1,680,000 円、耐用年数は 10 年とする。

5.1.1.4 太陽電池

太陽電池の製品仕様は第 3 章でも触れたが、今一度ここで整理する。一般的な戸建住宅の屋根置きを想定して真南に傾斜 30° でパネルを設置するとし、パネル容量 3.0kW 出力係数 0.7 とする。

機器価格は 1,740,000 円、補助金は太陽光発電普及拡大センター^[40]の交付額目安（2011 年度）を参考に 144,000 円とする。耐用年数は 20 年とする。

5.1.2 コスト

5.1.2.1 イニシャルコスト

イニシャルコストは機器の導入によって発生する費用であり、各エネルギー機器の販売価格 ($PRICE$ [円])・補助金 (SUB [円])・耐用日数 ($TIME$ [年]) を用いて式 5-1 から求める。ただし、 r [-] は割引率とし本研究では 0.01 (1%) とする。

$$COST_{ini} = \frac{(PRICE - SUB) \times r}{1 - (1 + r)^{-TIME}} \quad \text{式 5-1}$$

5.1.2.2 ランニングコスト

ランニングコストは日々のエネルギー消費によって発生する費用であり、ガス料金と電力料金の和から太陽電池の売電利益を引いて求める。料金体系は地域によって異なるが、本研究ではガス料金は「一般契約 B 表」と「家庭用燃料電池契約 B 表」(東京ガス, 2012 年 12 月現在), 電力料金は「従量電灯 B」50A (東京電力, 2012 年 12 月現在) を参考とし、売電価格は一律で 42 円/kWh とした。

ガス料金について、家庭用燃料電池を導入しない場合は 1 か月のガス利用量が 20~80m³ の場合に適用される「一般契約 B 表」とし、家庭用燃料電池を導入する場合は 1 か月のガス利用量が 20m³ 以上の場合に適用される「家庭用燃料電池契約 B 表」とする。

電気料金について、「従量電灯 B」のうち契約アンペアが 50A のものとし、月ごとの電力量に応じて料金単価が 3 段階に設定されている。

売電価格について現行の固定価格買取制度では、太陽光単独の発電では 42 円/kWh, 燃料電池などと併用したいいわゆる「ダブル発電」では 34 円/kWh と差が設けられている。しかしガス会社の担当者へのヒアリングを行なったところ、売電利益の差額相当分をガス会社が補填する形で家庭に支払っていることが分かった。そこで機器の導入パターンによらず売電価格は一律 42 円/kWh とする。

それぞれの料金体系を表 5-1 に示す。

表 5-1 料金体系

ガス料金(従来型給湯器)	
基本料金 (CHAb _G) [¥/month]	1110.9
単位料金 (CHAc _G) [¥/m ³]	133.65
ガス料金(家庭用燃料電池)	
基本料金 (CHAb _G) [¥/month]	1497.3
単位料金 (CHAc _G) [¥/m ³]	114.33
電気料金	
基本料金 (CHAb _E) [¥/month]	1365
電力量 0~120kWh (CHAc _{E1})	18.89
料金単価 120~300kWh (CHAc _{E2})	25.19
[¥/kWh] 300kWh~ (CHAc _{E3})	29.10
売電価格 (VALUE _E) [¥/kWh]	42

5.1.3 CO₂ 排出量の算出方法

自家発電装置の導入による CO₂ 排出量削減の効果を評価する際の算出方法は、系統側で削減される発電を火力発電とする場合（以降、「火力代替基準」と呼ぶ）と全電源平均とする場合（以降、「全電源代替基準」と呼ぶ）の 2 通りの方法があり、本研究ではその両方を検討する。この 2 つの違いは、自家発電装置が導入されることによる電力需要の減少に対する系統側の行動として、ピーク供給力を担う火力発電から優先的に出力低下するか（火力代替基準）、すべての発電方式を同比率で出力低下するか（全電源代替基準）によるものである。一般的に全電源代替基準より火力代替基準の方が自家発電導入によって削減される CO₂ 量が大きいため、環境性がより良く評価される。式 5-2 に火力代替基準のとき、式 5-3 に全電源代替基準のときの算定式を示し、表 5-2 に排出源単位の値を示す。火力代替基準と全電源代替基準の違いとして、（1）回避電力による削減効果の有無、（2）買電による削減効果における排出源単位がある。図 5-2・図 5-3 にそれぞれの削減効果の違いを図示する。

$$\begin{aligned} \text{CO2}_{\text{ther}} &= \text{CO2}_E + \text{CO2}_G + \text{CO2}_{\text{pv}} - \text{CO2}_{\text{sbst}} - \text{CO2}_{\text{sell}_{\text{ther}}} \\ &= F_{\text{Eave}} \cdot \text{grE} + F_G \cdot \text{grG} + F_{\text{pv}} \cdot \text{pvE} \\ &\quad - (F_{\text{Ether}} - F_{\text{Eave}})(\text{Edm} - \text{grE}) - F_{\text{Ether}} \cdot \text{pvEgr} \end{aligned} \tag{式 5-2}$$

$$\begin{aligned} \text{CO2}_{\text{ave}} &= \text{CO2}_E + \text{CO2}_G + \text{CO2}_{\text{pv}} - \text{CO2}_{\text{sell}_{\text{ave}}} \\ &= F_{\text{Eave}} \cdot \text{grE} + F_G \cdot \text{grG} + F_{\text{pv}} \cdot \text{pvE} - F_{\text{Eave}} \cdot \text{pvEgr} \end{aligned} \tag{式 5-3}$$

表 5-2 CO₂ の排出源単位

CO ₂ 排出原単位	
系統電力 全電源平均(CO ₂ fac _{Eave}) [kg-CO ₂ /kWh]	0.44
系統電力 火力平均(CO ₂ fac _{Ether}) [kg-CO ₂ /kWh]	0.69
都市ガス(CO ₂ fac _G) [kg-CO ₂ /m ³]	2.21
太陽電池(CO ₂ fac _{pv}) [kg-CO ₂ /kWh]	0.053

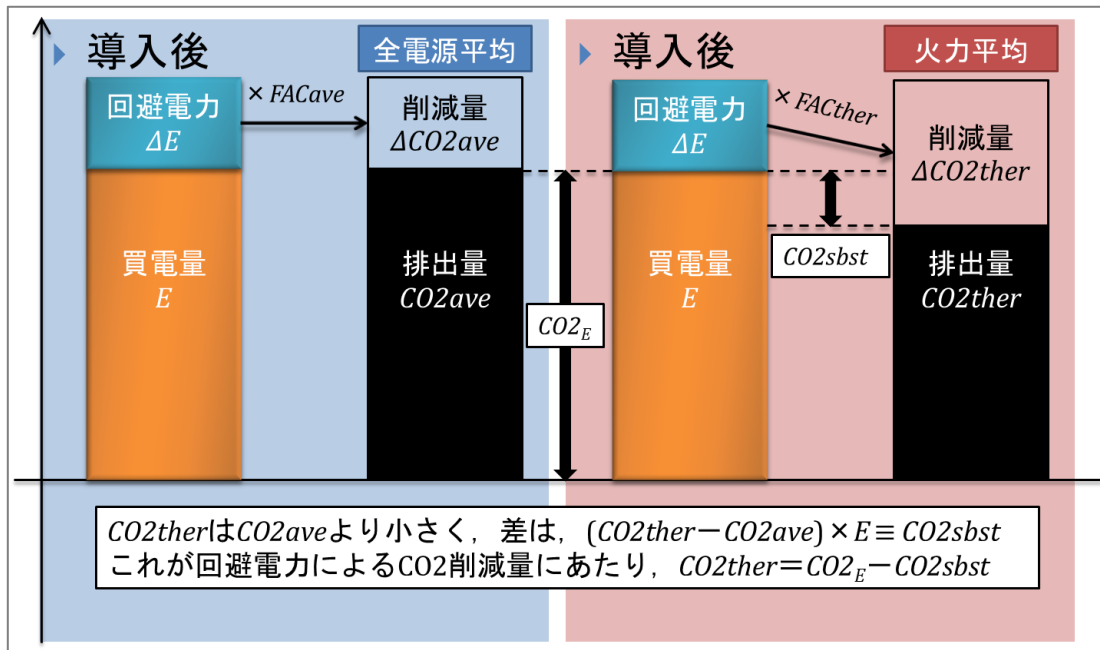


図 5-2 回避電力による CO₂削減効果

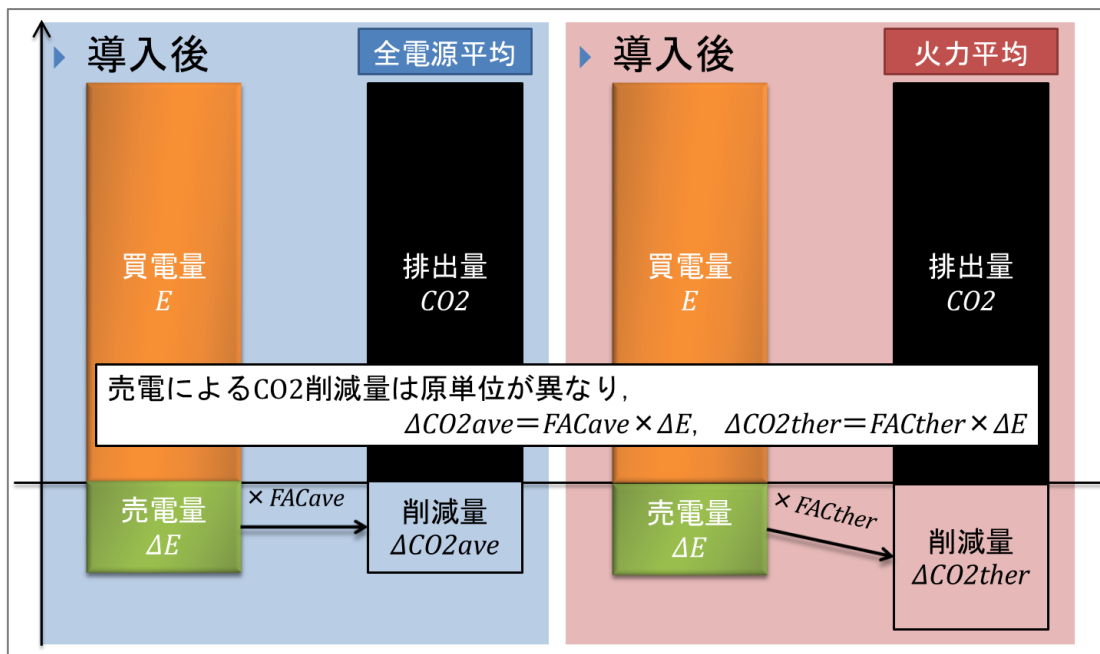


図 5-3 売電による CO₂削減効果

5.2 設定の定式化

5.2.1 コスト・利益に関する制約

式 5-4 は混合整数計画問題の目的関数となる総コストを表す。総コスト ($COST$ [円/日]) はイニシャルコスト ($COST_{ini}$ [円/日])、電力・ガス料金 ($COST_{run}$ [円/日])、売電利益 ($BENE_{sell}$ [円/日]) に分類される。

式 5-5 はエネルギー機器の購入によって発生する 1 日あたりのイニシャルコストを表す。イニシャルコストは各エネルギー機器の販売価格 ($PRICE$ [円])・補助金 (SUB [円])・耐用日数 ($TIME$ [年]) を用いて表すことができ、1 年あたりのコストから 1 日あたりのコストに変換するために 365 で割る。

式 5-6 はエネルギー機器の利用によって発生する 1 日あたりの電力・ガス料金を表す。電力・ガス料金の料金体系は、プランに応じて設定された基本料金 (CHA_b [円/月]) と従量料金によって構成される。基本料金は 1 日あたりの料金に換算するために基本料金は月額値を 30 で割り、従量料金は電力・ガス使用量 (grE [kWh], grG [m³]) に料金単価 (CHA_c [円/kWh または 円/m³]) を掛けた額として求めることができる。

式 5-7 は太陽電池から電力会社に電力を売電することで得られる売電利益を表す。売電利益は売電電力量 ($pvEgr$ [kWh]) に売電単価 ($VALUE_E$ [円/kWh]) を掛けた値である。

$$\text{総コストの計算式} \quad COST = \sum_d \{COST_{ini} + COST_{run}(d) - BENE_{sell}(d)\} \quad \text{式 5-4}$$

$$\text{イニシャルコストの計算式} \quad COST_{ini} = \frac{1}{365} \sum_{i=fc,pv,bt} \frac{(PRICE_i - SUB_i) \times r}{1 - (1 + r)^{-TIME_i}} \quad \text{式 5-5}$$

$$\begin{aligned} \text{電力・ガス料金の計算式} \quad COST_{run}(d) = & \frac{CHA_{bE} + CHA_{bG}}{30} + CHA_{cG} \sum_t grG(d, t) \\ & + CHA_{cE1} \cdot grE1(d) + CHA_{cE2} \cdot grE2(d) \\ & + CHA_{cE3} \cdot grE3(d) \end{aligned} \quad \text{式 5-6}$$

$$\text{売電利益の計算式} \quad BENE_{sell}(d) = VALUE_E \sum_t pvEgr(d, t) \quad \text{式 5-7}$$

表 5-3 コスト・利益に関する制約で用いる定数

初期費用・耐用日数

	従来型給湯器	燃料電池 (fc)	蓄電池 (bt)	太陽電池 (pv)
価格 (PRICE) [¥]	360000	2761500	1680000	1740000
補助金 (SUB) [¥]	0	850000	0	144000
耐用年数 (TIME) [year]	10	10	10	20

ガス料金(従来型給湯器)

基本料金 (CHAb _G) [¥/month]	1110.9
単位料金 (CHAc _G) [¥/m ³]	133.65

ガス料金(家庭用燃料電池)

基本料金 (CHAb _G) [¥/month]	1497.3
単位料金 (CHAc _G) [¥/m ³]	114.33

電気料金

基本料金 (CHAb _E) [¥/month]	1365
電力量 0~120kWh (CHAc _{E1})	18.89
料金単価 120~300kWh (CHAc _{E2}) [¥/kWh]	25.19
300kWh~ (CHAc _{E3})	29.10
売電価格 (VALUE _E) [¥/kWh]	42

5.2.2 ガスに関する制約

$$\text{ガス使用量の収支式} \quad grG(d, t) = grGfc(d, t) + grGbh(d, t) \quad \text{式 5-8}$$

式 5-8 はガス使用量の収支を表す。家庭で使用されるガス (grG [m³]) は燃料電池ユニット ($grGfc$ [m³]) か補助熱源機 ($grGbh$ [m³]) で消費される。

5.2.3 系統電力に関する制約

式 5-9 は系統電力の収支を表す。系統から供給される電力量 (grE [kWh]) は蓄電池に充電される ($-grEbt$ [kWh]) か、直接需要機器で消費される ($grEdm$ [kWh]) か、家庭用燃料電池の起動で消費される ($grEfc_{start}$ [kWh])。

式 5-10~式 5-12 は系統電力の三段階料金制度に基づく計算を表す。系統から供給される電力量は第 1 段階料金分 ($grE1$ [kWh])、第 2 段階料金分 ($grE2$ [kWh])、第 3 段階料金分 ($grE3$ [kWh]) に分けられる。第 1 段階料金分は 120kWh/月、第 2 段階料金分は 180kWh/月を上限とし、1 日あたりの料金に換算するために 30 で割る。

式 5-13・式 5-14 は余剰買取制度のときの売買電に関する制約を表す。余剰買取制度では太陽電池発電量のうち自家消費分を除いた余剰分の電力が買い取り対象となるので、電力システムに対しては電力を買うか売るかどちらかの行為しか一度にできない。そこで、系統から買電するときに 0、逆に系統に売電するときに 1 となるような二値数 ($BIN_{sold_{ele}}$)

を定義する。二値数が 0 のとき式 5-13 より太陽電池から系統への売電量 ($pvEgr$ [kWh]) がゼロになり、二値数が 1 のとき式 5-14 より系統から供給される電力量がゼロになる。

式 5-15 は系統から供給できる電力量の上限を表す。系統電力は支払う基本料金に応じて、家庭で使用できるアンペアの上限 (契約アンペア) が決まる。系統から供給される電力量は契約アンペアの電力換算値 (OUT_{gr} [kWh]) 以下とし、時間刻みを 3 分として換算するために 20 で割る。

系統電力の収支式 $grE(d, t) = -grEbt(d, t) + grEdm(d, t) + grEfc_{start}(d, t)$ 式 5-9

三段階料金制度の計算式 $grE1(d) + grE2(d) + grE3(d) = \sum_t grE(d, t)$ 式 5-10

$$grE1(d) \leq \frac{120}{30} \quad \text{式 5-11}$$

$$grE2(d) \leq \frac{180}{30} \quad \text{式 5-12}$$

余剰買取制度に関する制約 $pvEgr(d, t) \leq BIN_{sold_{ele}}(d, t) \cdot 100$ 式 5-13

$$grE(d, t) \leq (1 - BIN_{sold_{ele}}(d, t)) \cdot 100 \quad \text{式 5-14}$$

系統からの最大電力量の制約 $grE(d, t) \leq \frac{OUT_{gr}}{4}$ 式 5-15

表 5-4 系統電力に関する制約で用いる定数

系統電力

定格出力容量 (OUT_{gr}) [kVA]	5.0
-----------------------------	-----

5.2.4 家庭用燃料電池システムに関する制約

5.2.4.1 燃料電池ユニットに関する制約

式 5-16 は燃料電池ユニットの出力制御間隔に関する制約を表す。本研究では燃料電池の出力を 15 分ごとに制御すると設定した。モデルの時間刻みは 3 分なので、連続する時間 $5n+1, 5n+2, 5n+3, 5n+4, 5n+5 (n=0, 1, 2, \dots)$ における燃料電池ユニットのガス消費量 ($grGfc$ [m^3]) は等しい。

式 5-17・式 5-18 は燃料電池ユニットのガス消費量 ($grGfc$ [m^3]) に関する制約を表す。燃料電池ユニットが稼働中 ($BIN_{work_{fc}}=1$) のとき、定格運転時ガス消費量 (IN_{fc} [kW]) を単位発熱量 (Q_G [kWh/ m^3]) で割った値に対して最低負荷率 ($LOAD_{min}$ [-]) から最高負荷率 ($LOAD_{max}$ [-]) の間でガスが消費される。燃料電池ユニットが停止中 ($BIN_{work_{fc}}=0$) のとき、ガス消費量はゼロになる (ガスは消費されない)。時間刻みを 3 分として換算するために定格ガス消費量は 20 で割る。

式 5-19 は燃料電池ユニットのガス消費量と発電される電力量の関係を表す。発電される

電力量は、ガス消費量に単位発熱量を掛けたガス発熱量に対してさらに発電効率(EFF_{fcE} [–])を掛けた値に相当する。発電された電力量は一旦蓄電池に充電される分 ($-fcEbt$ [kWh])、即座に電力需要として消費される分 ($fcEdm$ [kWh])、電気ヒータで熱変換される分 ($fcEeh$ [kWh]) に分けられる。

式 5-20 は燃料電池ユニットのガス消費量と回収される熱量の関係を表す。回収される熱量は、ガス消費量に単位発熱量を掛けたガス発熱量に対してさらに熱回収効率(EFF_{fcH} [–])を掛けた値に相当する。係数 ($ALPHA$ [kJ/kWh]) は、ガス発熱量 (単位: kWh) を熱量 (単位: kJ) に単位換算するために用いる。回収された熱量はすべて貯湯槽に蓄熱 ($fcHtn$ [kJ]) される。

式 5-21 は燃料電池ユニットの起動に関する二値数 ($BINstart_{fc}$) を定義する。この二値数は、燃料電池ユニットが停止中から稼働中に変化するとき 1 となり、それ以外で 0 となる。

式 5-22 は燃料電池ユニットを起動するとき消費される電力量を計算する。燃料電池ユニットは起動する度 ($BINstart_{fc}=1$)、起動に必要な電力量 (Efc_{start} [kWh]) が系統 ($grEfc_{start}$ [kWh]) もしくは蓄電池 ($btEfc_{start}$ [kWh]) から供給される。

$$\begin{aligned}
 & grGfc(d, 5n + 1) = grGfc(d, 5n + 2) \\
 \text{出力制御間隔の制約} & = grGfc(d, 5n + 3) \\
 & = grGfc(d, 5n + 4) \\
 & = grGfc(d, 5n + 5) \quad (n = 0, 1, 2, \dots)
 \end{aligned}
 \tag{式 5-16}$$

$$\frac{1}{20} \cdot \frac{IN_{fc}}{Q_G} \cdot LOAD_{min} \cdot BINwork_{fc}(d, t) \leq grGfc(d, t)
 \tag{式 5-17}$$

$$\frac{1}{20} \cdot \frac{IN_{fc}}{Q_G} \cdot LOAD_{max} \cdot BINwork_{fc}(d, t) \geq grGfc(d, t)
 \tag{式 5-18}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ガス消費量と発電} & -fcEbt(d, t) + fcEdm(d, t) + fcEeh(d, t) \\
 \text{力量の収支式} & = Q_G \cdot EFF_{fcE} \cdot grGfc(d, t)
 \end{aligned}
 \tag{式 5-19}$$

$$fcHtn(d, t) = ALPHA \cdot Q_G \cdot EFF_{fcH} \cdot grGfc(d, t)
 \tag{式 5-20}$$

$$BINstart_{fc}(d, t) \geq BINwork_{fc}(d, t) - BINwork_{fc}(d, t - 1)
 \tag{式 5-21}$$

$$grEfc_{start}(d, t) + btEfc_{start}(d, t) = Efc_{start} \cdot BINstart_{fc}(d, t)
 \tag{式 5-22}$$

表 5-5 燃料電池ユニットに関する制約で用いる定数

燃料電池	
定格ガス消費量 (IN_{fc}) [kW]	2.08333
発電効率HHV (EFF_{fcE})	0.36
熱回収効率HHV (EFF_{fcH})	0.45
最低負荷率 (LOADmin)	0.33333
最高負荷率 (LOADmax)	1.0
13Aガス発熱量HHV (Q_G) [kWh/m ³]	12.5

5.2.4.2 補助熱源機に関する制約

式 5-23 は補助熱源機のガス消費量 ($grGb_h$ [m³]) と回収される熱量の関係を表す。回収される熱量は、ガス消費量に単位発熱量 (Q_G [kWh/m³]) を掛けたガス発熱量に対してさらに熱回収効率 (EFF_{bh} [-]) を掛けた値に相当する。係数 ($ALPHA$ [kJ/kWh]) は、ガス発熱量 (単位: kWh) を熱量 (単位: kJ) に単位換算するために用いる。回収された熱量はすべて貯湯槽に蓄熱 ($bhHtn$ [kJ]) される。

ガス消費量と発熱量
の収支式

$$bhHtn(d, t) = ALPHA \cdot Q_G \cdot EFF_{bh} \cdot grGb_h(d, t) \quad \text{式 5-23}$$

表 5-6 補助熱源機に関する制約で用いる定数

補助熱源機	
熱回収効率 (EFF_{bu})	0.80
13Aガス発熱量HHV (Q_G) [kWh/m ³]	12.5

5.2.4.3 電気ヒータに関する制約

式 5-24 は電気ヒータの電力消費量 ($fcEeh$ [kWh]) と変換される熱量の関係を表す。回収される熱量は、電力消費量に熱回収効率 (EFF_{eh} [-]) を掛けた値に相当する。係数 ($ALPHA$ [kJ/kWh]) は、電力変換量 (単位: kWh) を熱量 (単位: kJ) に単位換算するために用いる。回収された熱量はすべて貯湯槽に蓄熱 ($ehHtn$ [kJ]) される。

電力消費量と発熱量
の収支式

$$ehHtn(d, t) = ALPHA \cdot EFF_{eh} \cdot fcEeh(d, t) \quad \text{式 5-24}$$

表 5-7 電気ヒータに関する制約で用いる定数

電気ヒータ	
熱回収効率 (EFF_{eh})	0.90

5.2.4.4 貯湯槽に関する制約

式 5-25 は貯湯槽に蓄えられる熱量 (Htn_{st} [kJ]) と出入りする熱量の収支を表す。蓄熱量は時間刻み (3 分) ごとに一定の放熱率 (RAD [-]) で失われる。貯湯槽に入る熱量は燃料電池ユニット ($fcHtn$ [kJ]) と補助熱源機 ($bhHtn$ [kJ]) と電気ヒータ ($ehHtn$ [kJ]) から供給され、貯湯槽から出た熱量はすべて熱需要に回される ($tnHdm$ [kJ])。

式 5-26 は貯湯槽に蓄えられる熱量の上限を表す。熱量の上限は貯湯槽の容量 ($CAPA_{tn}$ [L]) と水の比熱 (C [kJ/°C · L]) と貯湯温度 60°C と上水温度 (T_c [°C]) の温度差で表される。

$$\begin{aligned} \text{蓄熱量と熱の出入り} \quad Htn_{st}(d, t - 1) \cdot (1 - RAD) + fcHtn(d, t) + bhHtn(d, t) \\ \text{に関する収支式} \quad + ehHtn(d, t) = Htn_{st}(d, t) + tnHdm(d, t) \end{aligned} \quad \text{式 5-25}$$

$$\text{最大蓄熱量の制約} \quad Htn_{st}(d, t) \leq CAPA_{tn} \cdot C \cdot (T_{\text{tank}} - T_c) \quad \text{式 5-26}$$

表 5-8 貯湯槽に関する制約で用いる定数

貯湯槽	
貯湯容量($CAPA_{tn}$) [L]	200
水の比熱(C) [kJ/L]	4.184
貯湯温度 T_{tank} [°C]	60.0
上水温度 T_c [°C] (春・秋)	16.8
(冬)	9.2
(夏)	23.0

5.2.5 蓄電池に関する制約

式 5-27 は蓄電池に蓄えられる電力量 (Ebt_{st} [kWh]) と充放電される電力量の収支を表す。蓄電されている電力量は時間刻み (3 分) ごとに一定の自己放電率 (DIS [-]) で損失が生じる。充電される電力量は系統 ($grEbt$ [kWh])、家庭用燃料電池 ($fcEbt$ [kWh])、太陽電池 ($pvEbt$ [kWh]) の 3 つから供給され、放電された電力量は需要機器 ($btEdm$ [kWh]) か家庭用燃料電池の起動 ($btEfc_{start}$ [kWh]) で消費される。充放電のときに極板などで生じる損失は、一定の効率 (EFF_{bt} [-]) として表される。

式 5-28・式 5-29 は蓄電池に蓄えられる電力量の下限と上限を表す。蓄えることができる電力量は蓄電池の容量 ($CAPA_{bt}$ [kWh]) に対して上限 ($CHRG_{max}$ [-]) と下限 ($CHRG_{min}$ [-]) で表される。

式 5-30・式 5-31 は蓄電池に一度に充放電できる電力量の上限を表す。蓄電池には蓄電量 (ストック) の上限値だけでなく、充放電量 (フロー) の上限値もあり、定格出力容量 (OUT_{bt} [kVA]) を時間刻み 3 分で換算するために 20 で割ることで表される。

$$\begin{aligned}
& Ebt_{st}(d, t - 1) \cdot (1 - DIS) \\
& - (grEbt(d, t) + fcEbt(d, t) + pvEbt(d, t)) \\
& \cdot EFF_{bt} \qquad \qquad \qquad \text{式 5-27} \\
& = Ebt_{st}(d, t) + \frac{btEdm(d, t) + btEfc_{start}(d, t)}{EFF_{bt}} \\
\text{蓄電量と充放電量} & \\
\text{に関する収支式} & \\
\text{最小蓄電量の制約} & \qquad Ebt_{st}(d, t) \geq CAPA_{bt} \cdot CHRGmin \qquad \text{式 5-28} \\
\text{最大蓄電量の制約} & \qquad Ebt_{st}(d, t) \leq CAPA_{bt} \cdot CHRGmax \qquad \text{式 5-29} \\
\text{最大充電量の制約} & \qquad - (grEbt(d, t) + fcEbt(d, t) + pvEbt(d, t)) \leq \frac{OUT_{bt}}{20} \qquad \text{式 5-30} \\
\text{最大放電量の制約} & \qquad btEdm(d, t) \leq \frac{OUT_{bt}}{20} \qquad \text{式 5-31}
\end{aligned}$$

表 5-9 蓄電池に関する制約で用いる定数

蓄電池	
充放電効率 (EFF_{bt})	0.90
3分あたり自己放電率 (DIS)	0.00002
最小蓄電率 (CHRGmin)	0.1
最大蓄電率 (CHRGmax)	0.9
蓄電容量 ($CAPA_{bt}$) [kWh]	6.6
定格出力容量 (OUT_{bt}) [kVA]	1.5

5.2.6 太陽電池に関する制約

式 5-32 は太陽電池から発電される電力量 (pvE [kWh]) の配分を表す。発電された電力量は一旦蓄電池に充電される ($-pvEbt$ [kWh]) か、即座に電力需要として家庭で消費される ($pvEdm$ [kWh]) か、売電して系統に送られる ($pvEgr$ [kWh])。

発電量の消費・蓄電・売電に関する収支式

$$pvE(d, t) = -pvEbt(d, t) + pvEdm(d, t) + pvEgr(d, t) \qquad \text{式 5-32}$$

5.2.7 電力需要に関する制約

式 5-33 は電力受給の収支を表す。家庭での電力需要 (Edm [kWh]) は系統 ($grEdm$ [kWh])、家庭用燃料電池 ($grEfc$ [kWh])、太陽電池 ($grEpv$ [kWh])、蓄電池 ($grEbt$ [kWh]) の4つから供給される。

電力受給の収支式
$$grEdm(d, t) + fcEdm(d, t) + pvEdm(d, t) + btEdm(d, t) = Edm(d, t) \quad \text{式 5-33}$$

5.2.8 熱需要に関する制約

熱使用量の収支式
$$tnHdm(d, t) = C \cdot HWdm(d, t) \cdot (Th - Tc) \quad \text{式 5-34}$$

表 5-10 給湯需要に関する制約で用いる定数

熱需要		
水の比熱(C) [kJ/L]	4.184	
給湯温度Th [°C]	42.0	
上水温度Tc [°C] (春・秋)	16.8	
	(冬)	9.2
	(夏)	23.0

式 5-34 は熱使用量の収支を表す。家庭で使用される熱は給湯需要 ($HWdm$ [L]) で消費される。熱は上水を平常温度 (Tc [°C]) から温水として消費する温度 (Th [°C]) に加温するために使い、温度を熱量に変換するための水の比熱 (C [kJ/°C・L]) を用いる。

5.2.9 CO2に関する制約

式 5-35・式 5-36 は CO₂ 排出量 ($CO2_{ther}$, $CO2_{ave}$ [kg-CO₂/日]) を計算する。式 5-35 は火力代替基準のもので、ガス由来の排出分 ($CO2_G$ [kg-CO₂/日])、系統電力由来の排出分 ($CO2_E$ [kg-CO₂/日])、太陽電池由来の排出分 ($CO2_{pv}$ [kg-CO₂/日])、回避電力による削減分 ($-CO2_{sbst}$ [kg-CO₂/日])、買電による削減分 ($-CO2_{sell_{ther}}$ [kg-CO₂/日]) によって構成される。式 5-36 は全電源代替基準のもので、ガス由来・系統電力由来・太陽電池由来の排出分と買電による削減分 ($-CO2_{sell_{ave}}$ [kg-CO₂/日]) によって構成される。

式 5-37～式 5-39 はガス由来・系統電力由来・太陽電池由来の CO₂ 排出量を計算する。それぞれガス使用量 (grG [m³])・系統電力量 (grE [kWh])・太陽電池発電量 (pvE [kWh]) に排出源単位 ($CO2_{fac_G}$ [kg-CO₂/m³], $CO2_{fac_{Eave}}$ [kg-CO₂/kWh], $CO2_{fac_{pv}}$ [kg-CO₂/kWh]) をかけることで求められる。

式 5-40～式 5-42 は自家発電導入による回避電力や売電による CO₂ 排出量の補正をする。

CO₂ 量の計算式 (火力代替基準)
$$CO2_{ther}(d) = CO2_G(d) + CO2_E(d) - CO2_{sbst}(d) + CO2_{pv}(d) - CO2_{sell_{ther}}(d) \quad \text{式 5-35}$$

CO₂ 量の計算式 (全電源代替基準)
$$CO2_{ave}(d) = CO2_G(d) + CO2_E(d) + CO2_{pv}(d) - CO2_{sell_{ave}}(d) \quad \text{式 5-36}$$

ガス由来の CO₂ 量の計算式
$$CO2_G(d) = CO2_{fac_G} \cdot \sum_t grG(d, t) \quad \text{式 5-37}$$

電力由来の CO2 量の
計算式

$$CO2_E(d) = CO2fac_{Eave} \cdot \sum_t grE(d, t) \quad \text{式 5-38}$$

太陽電池由来の CO2
量の計算式

$$CO2_{pv}(d) = CO2fac_{pv} \cdot \sum_t pvE(d, t) \quad \text{式 5-39}$$

回避電力による CO2
量の補正式

$$CO2_{sbst}(d) = (CO2fac_{Ether} - CO2fac_{Eave}) \cdot \sum_t (Edm(d, t) - grE(d, t)) \quad \text{式 5-40}$$

売電による CO2 量の
補正式
(火力代替基準)

$$CO2_{sell_{ther}}(d) = CO2fac_{Ether} \cdot \sum_t pvEgr(d, t) \quad \text{式 5-41}$$

売電による CO2 量の
補正式
(全電源代替基準)

$$CO2_{sell_{ave}}(d) = CO2fac_{Eave} \cdot \sum_t pvEgr(d, t) \quad \text{式 5-42}$$

火力代替基準：自家発電導入による回避電力および売電によって削減される発電が火力発電

全電源代替基準：自家発電導入による回避電力および売電によって削減される発電が全電源平均

表 5-11 CO2 に関する制約で用いる定数

CO2排出原単位

系統電力 全電源平均 (CO2fac _{Eave}) [kg-CO2/kWh]	0.44
系統電力 火力平均 (CO2fac _{Ether}) [kg-CO2/kWh]	0.69
都市ガス (CO2fac _G) [kg-CO2/m ³]	2.21
太陽電池 (CO2fac _{pv}) [kg-CO2/kWh]	0.053

第6章 シミュレーション結果

第6章・第7章では家庭エネルギー需給のシミュレーション結果を示す。まず第6章では家庭による変動抑制を考慮しない場合、すなわち現状でのエネルギー需給シミュレーションの結果を示す。

家庭用エネルギー機器の導入効果は、単に経済性だけでなく環境性や省エネルギー性など、多様な側面から評価することが求められる。機器の導入状況を様々に設定した際の家庭エネルギー需給のシミュレーション結果から、「電力」「経済性」「環境性」の3つの観点で機器の導入効果を評価した。

機器の導入については6通りのケースを想定した。給湯器の選択として「従来型給湯器」「家庭用燃料電池」「蓄電池付き家庭用燃料電池」の3通り、太陽電池の有無について「なし」「あり」の2通りで計6通りである。以降それぞれのケースを「ベース」「FC」「FC+BT」「PV」「W発電」「三電池」と呼ぶこととする(表6-1)。以降6.1で各ケースにおける運転スケジュールを説明し、6.3~6.4で家庭用エネルギー機器の導入効果を評価し、6.5でまとめを記す。

表 6-1 想定したケース

		給湯器の選択		
		従来型給湯器	家庭用燃料電池	蓄電池付き家庭用燃料電池
太陽電池の有無	なし	ベース	FC	FC+BT
	あり	PV	W発電	三電池

6.1 運転スケジュール

とある1日(春・秋の平日)を想定したエネルギー需要・太陽電池出力のもとでの、機器の運転状況を概説する。「ベース」ケースは時々刻々の電力・給湯需要を系統電力と従来型給湯器で賄うだけなので省略し、それ以外のケースでの運転スケジュールを紹介する。

6.1.1 「FC」 ケース

「FC」 ケースの運転スケジュールを図 6-1 に示す

日中(9時~21時)の家庭用燃料電池は電力需要に合わせて運転される(負荷追従運転). 燃料電池の出力制御は15分間隔で行われるので,15分ごとの最小需要に応じて燃料電池出力が決定される(図における青の部分). 一方で夜間(21時~9時)にかけては最小出力(0.25kW)で運転される. 以上のことから,燃料電池は電力需要が小さい夜中でも停止することなく24時間運転される. これは燃料電池を一旦停止すると,再起動する際にセルを運転温度まで加温するための電力消費が発生するためである. 特に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. よって,例えば5時~6時や8時前後など朝の家事によって電力需要が大きくなるタイミングでも,午前中は給湯需要がないので家燃料電池は最低出力での運転となる. このようにコスト最小化における燃料電池の運転は,まず給湯需要を満たすことを優先して,その範囲内で電力需要を満たすという「熱主電従運転」となる.

電力需要の残りは系統からの供給によって賄われる(図における緑の部分).

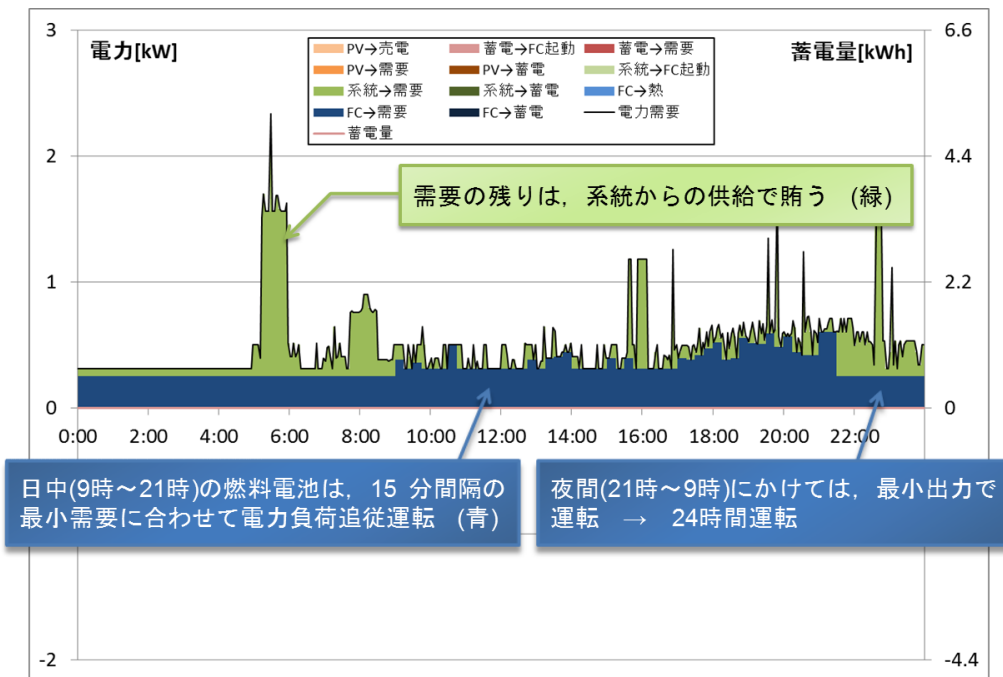


図 6-1 運転スケジュール (FC)

6.1.2 「FC+BT」 ケース

「FC+BT」 ケースの運転スケジュールを図 6-2 に示す。

蓄電池への充電は一切行われず、「FC」 ケースの運転スケジュールと同じ結果となった。蓄電池が充放電をする際には電力損失が発生する。損失まで考慮すると、燃料電池を集中的に稼働させて需要の過不足分を蓄電池の充放電によって賄い家庭内で需給調整を行なうよりも、系統電力を利用する方が経済的であるためである。蓄電池の充放電効率は 90%なので、1kWh の電力を充電したときに取り出すことのできる最大の電力量は、 $1\text{kWh} \times 90\%$ (充電時) $\times 90\%$ (放電時) $= 0.81\text{kWh}$ となる。すなわち、充電した電力の約 2 割は蓄電ロスとして失われてしまう。

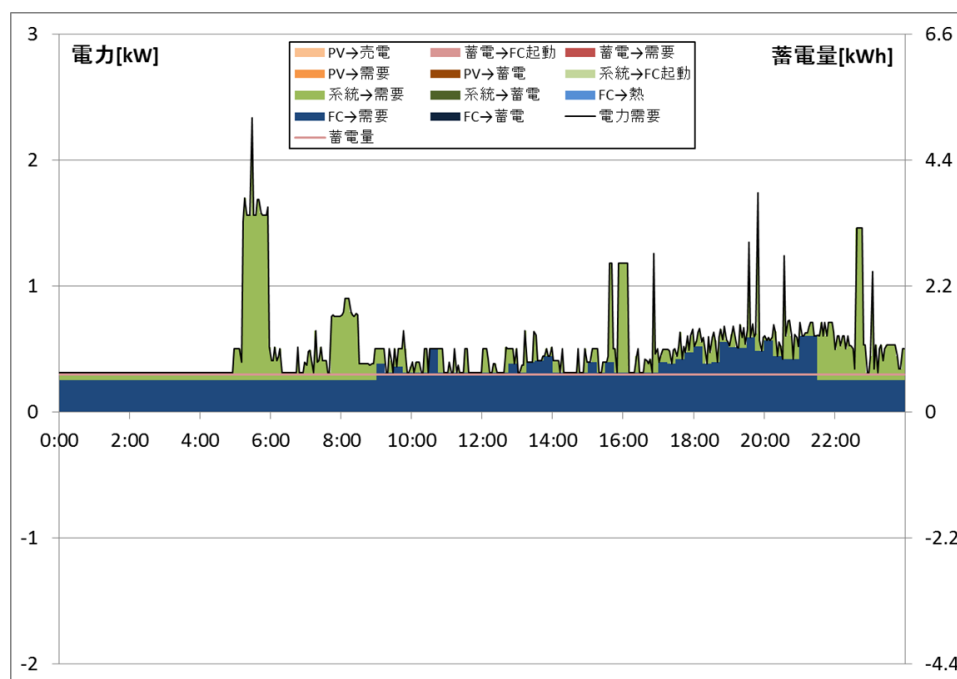


図 6-2 運転スケジュール (FC+BT)

6.1.3 「PV」 ケース

「PV」 ケースの運転スケジュールを図 6-3 に示す。

日中（6 時～15 時）は太陽電池による発電を自家消費にすることによって電力の系統依存度が低下する（図における橙の部分）。昼間（9 時～15 時）になると太陽電池出力はさらに増大し、家庭の電力需要を超過して余剰電力が発生する（図における薄い橙の部分）。家庭はこの余剰電力を系統に売電することで売電利益を得るようになる。

夜間（17 時～6 時）は従来通り、系統から電力を購入して需要を賄う（図における緑の部分）。

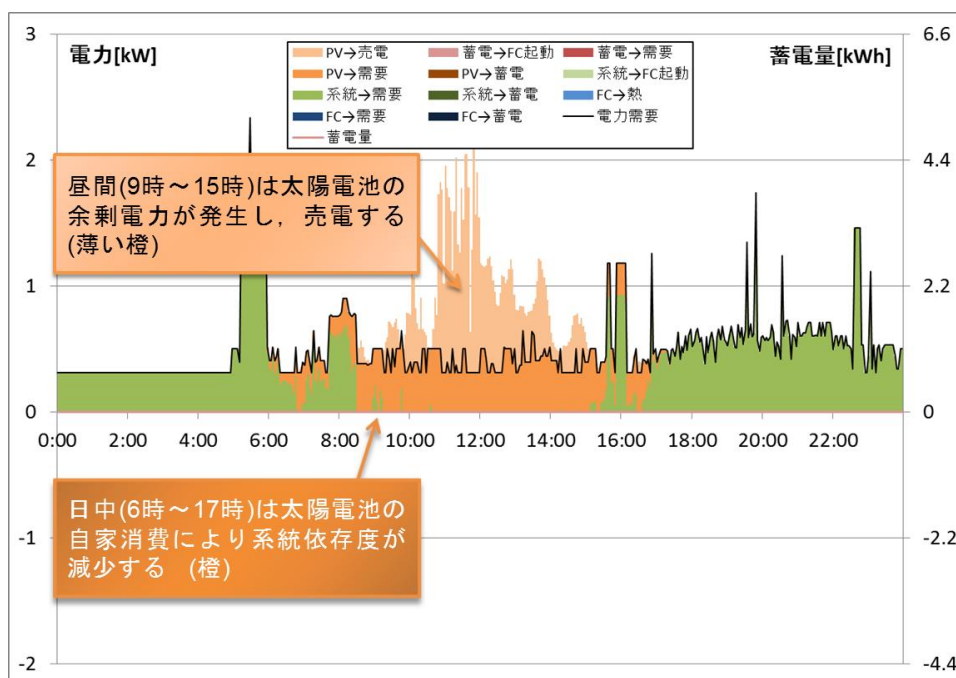


図 6-3 運転スケジュール (PV)

6.1.4 「W 発電」 ケース

「W 発電」 ケースの運転スケジュールを図 6-4 に示す。

住宅用太陽光発電による電力の買取価格は 42 円/kWh と高く設定されているので、家庭は余剰電力を増やして、できるだけ多く太陽電池の出力を売電に回したい。そこで日中の電力需要を自家発電機によって賄うようになり、燃料電池を電力負荷追従運転させるタイミングは早め（6 時～18 時）にシフトする（図における青の部分）。一方で燃料電池の稼働率が向上することで発生する発電分の余りは、電気ヒータによって熱変換されて、貯湯槽に熱として蓄えられる（図における下側の薄い青のヒゲ部分）。

日中に燃料電池の稼働率を上げることによって、太陽電池出力の多くを売電に回すことができる（図における薄い橙の部分）。「PV」 ケースと比較すると、早朝（6 時～9 時）や夕方（15 時～17 時）にも余剰電力が生じていることが分かる。一部、電力需要が大きくなる時間帯などでは自家消費に回す状況も発生する（図における橙の部分）。

「PV」 ケースと同様に、系統からの電力供給は夜間（18 時～6 時）に集中している（図における緑の部分）。

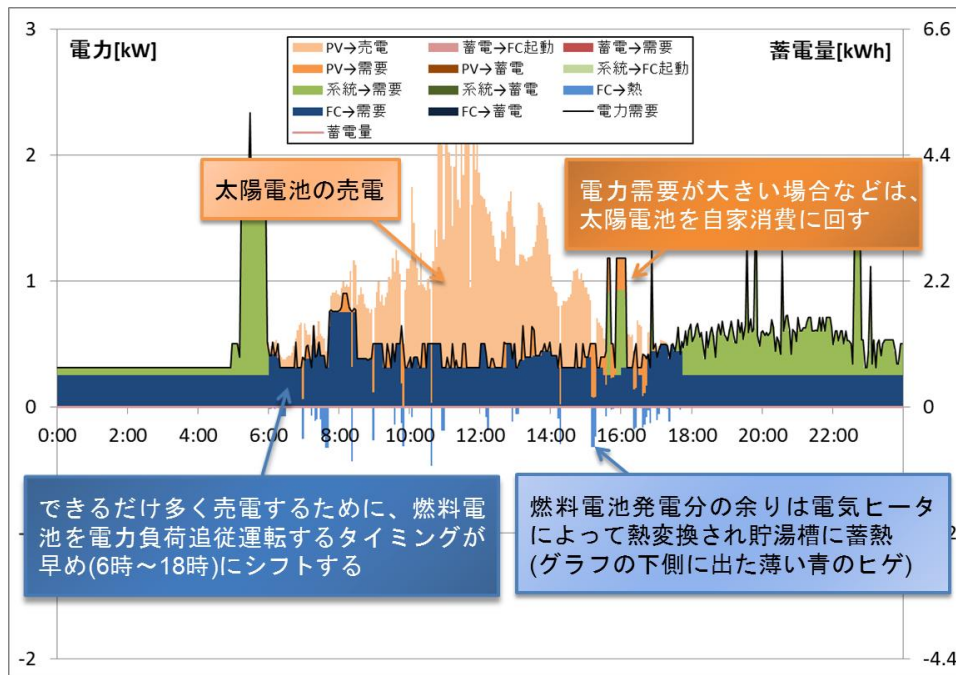


図 6-4 運転スケジュール（W 発電）

6.1.5 「三電池」ケース

「三電池」ケースの運転スケジュールを図 6-5 に示す。

日中の燃料電池の稼働率は「W 発電」ケースよりもさらに向上する（図における青の部分）、燃料電池発電分の余りは、熱変換する代わりに蓄電池に電力のまま蓄えられるようになる（図における下側の濃い青のヒゲ部分）。また太陽電池の出力が始まる早朝（6 時）前に、系統から予め充電しておく（図における下側の濃い緑のヒゲ部分）。蓄えられた電力は昼の電力需要が大きい時間に消費される（図における赤の部分）。

これらの方法によって日中の電力需要は燃料電池と蓄電池によって賄われるため、太陽電池出力はほぼ全量を売電することができる（図における薄い橙の部分）。

なお、蓄電池に蓄えられる電力量の平均は 1.3kWh 程度であり、容量（6.6kWh）に対して余り大きくない（図における薄い赤の線）。蓄電池は停電時を想定して大容量で設計されているのに対し、今回のシミュレーションでは電力需給の僅かな調整用に蓄電池を利用しているのが理由である。

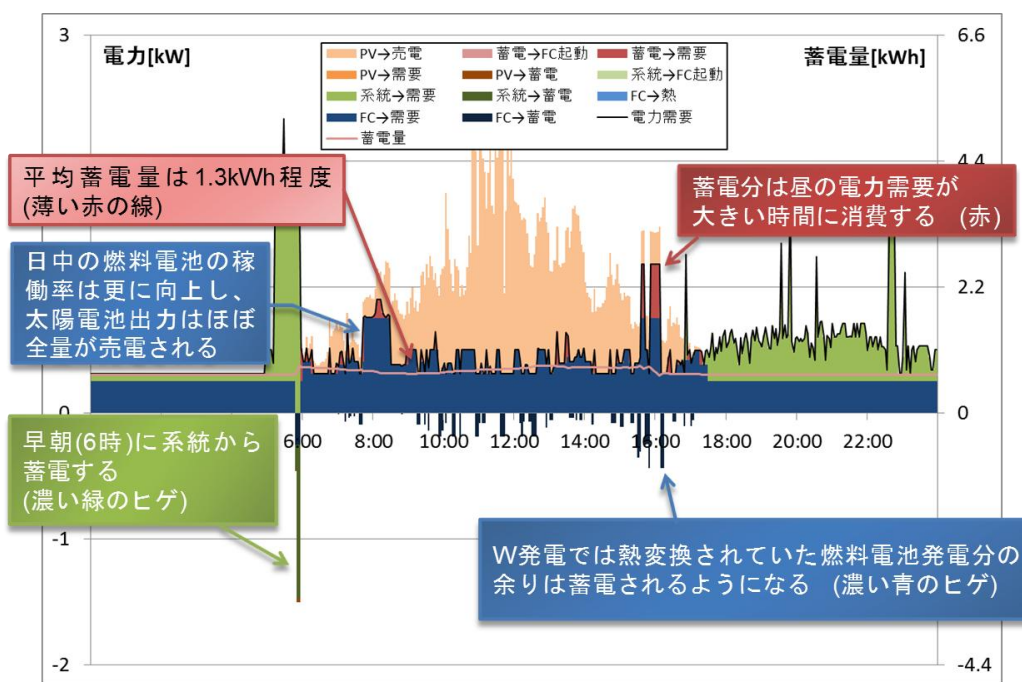


図 6-5 運転スケジュール (三電池)

6.2 電力に関する評価

6.2.1 電力供給源の比較

電力需要・熱変換・蓄電ロスを含めた家庭の電力消費量に対し、電力系統・燃料電池・太陽電池がどの程度の電力量を供給しているかを図 6-6 に示す。

6.2.1.1 家庭用燃料電池の導入による効果

家庭用燃料電池が導入されているのは「FC」「FC+BT」「W 発電」「三電池」の 4 ケースであり、それぞれ電力供給量は 3,985kWh/年 (FC), 3,986kWh/年 (FC+BT), 3,919kWh/年 (W 発電), 4,030kWh/年 (三電池) となっている。それぞれ電力消費量に対する供給量の割合を見ると、61.3% (FC), 61.4% (FC+BT), 59.2% (W 発電), 59.6% (三電池) と、6 割前後を燃料電池からの供給が占めている。

6.2.1.2 太陽電池の導入による効果

太陽電池が導入されているのは「PV」「W 発電」「三電池」の 3 ケースであり、それぞれ電力供給量は 1,697kWh/年 (PV), 663 kWh/年 (W 発電), 24kWh/年 (三電池) となっている。それぞれ電力消費量に対する供給量の割合を見ると、26.2% (PV), 10.0% (W 発電), 0.4% (三電池) と、燃料電池や蓄電池の導入によって太陽電池を自家消費から売電に回すようになっていくことが分かる。これは売電利益を大きくすることが年間コストの削減につながるためであり、「三電池」ケースではほぼ全量が売電に回されている。

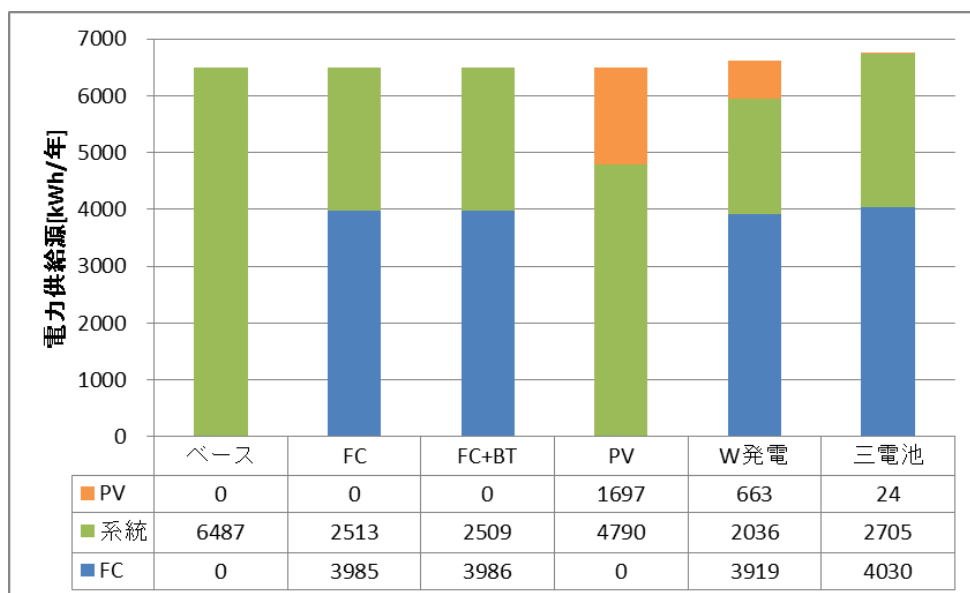


図 6-6 電力供給源の比較

6.2.2 熱変換・蓄電ロスの比較

家庭の電力消費は需要を満たす以外に、家庭用燃料電池に付属の電熱ヒータによる「熱変換」、蓄電池を充放電時の電力損失や自然放電による「蓄電ロス」が含まれる。熱変換と蓄電ロスによる電力消費量を図 6-7 に示す。図からわかるように「W 発電」ケースにおける熱変換が 131kWh/年、「三電池」ケースにおける蓄電ロスが 271kWh/年と大きい。熱変換された電力は給湯需要を満たすことで活用される一方で、「三電池」ケースでは需要の 4.2%に相当する電力量が蓄電ロスとして失われている。

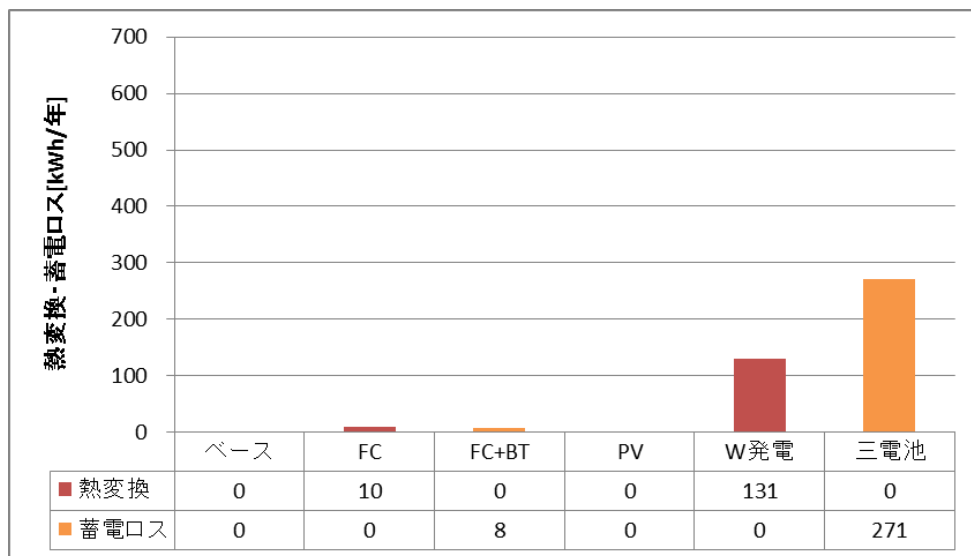


図 6-7 熱変換・蓄電ロスの比較

6.2.3 売電量の比較

各ケースにおける売電量を図 6-8 に示す。それぞれ売電量は 1,090kWh/年 (PV), 2,124kWh/年 (W 発電), 2,762kWh/年 (三電池) となっている。特に「三電池」ケースでは、太陽電池発電量の 99.1%が売電に回されている。

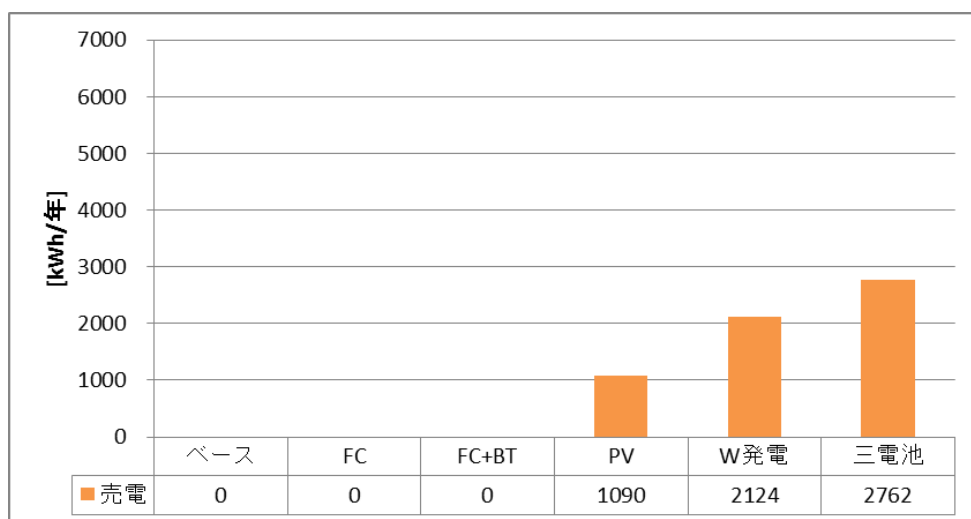


図 6-8 売電量の比較

6.2.4 電力の系統依存度の比較

「省電力性」の評価を行なうために、「電力の系統依存度」という指標を新たに定義する。電力の系統依存度は「家庭で消費される電力量に対して、どの程度系統から電力を購入または売却しているか」を表す指標で、以下の式から算出できる。この指標は、家庭の電力消費量すべてを系統で賄うときが最大（100%）となり、家庭用燃料電池や太陽電池を利用すると依存度は低下することになる。

$$\text{電力の系統依存度} = \frac{\text{系統からの電力購入量} - \text{系統への売電量}}{\text{家庭の電力消費量}}$$

各ケースにおける電力の系統依存度を図 6-9 に示す。「ベース」ケースは自家発電機を持たず電力需要を全て系統に依存するので 100%となる。太陽電池を導入した「PV」ケースでは依存度は 57.0%まで低下し、家庭用燃料電池を導入した「FC」「FC+BT」ケースでは依存度をさらに 38.6~38.7%にまで削減することができる。

顕著なのは「W発電」ケースと「三電池」ケースであり、いずれも-1.3%/ -0.9%と依存度が 0%を割り込んでいる。これは系統からの電力購入量よりも系統への売電量が大きいかを表しており、電力に関していわゆる「ゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）」が達成されていることを意味する。

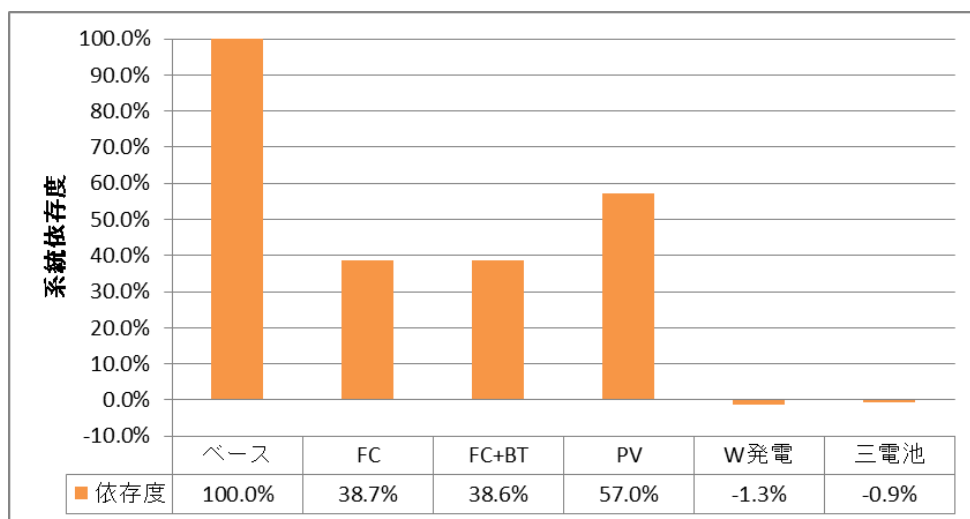


図 6-9 電力の系統依存度の比較

6.2.5 売電電力変動の比較

3.4.2 では太陽電池出力そのものの変動について触れたが、太陽電池を家庭に設置した場合は出力の一部は自家消費されるので、実際に運転予備力の容量を左右するのは自家消費されずに残った売電電力の変動である。そこで各ケースの売電電力の変動を比較する。式 3-4 の出力変動と同様に、売電電力の変動 $\Delta pvEgr(t)$ [kW] は時々刻々の売電電力 $pvEgr(t)$ [kW] を用いて式 6-1 で表すことができる。

$$\Delta pvEgr(t) = |pvEgr(t) - pvEgr(t - 1)| \quad \text{式 6-1}$$

1 日ごとに売電電力の最大変動を求め、各ケースにおける最大変動の季節平均を比較する (図 6-10)。季節差に関しては、夏の最大変動が大きく冬の最大変動が小さい。これは 3.4.2 で確認したように夏に太陽電池出力の最大変動が大きくなるのが原因であり、売電電力の最大変動も同様の傾向があることが確認できた。

また機器の導入による違いを見ると、「PV」ケースと「W 発電」ケースでは変動が大きく、「三電池」ケースでは変動が小さい。「PV」ケースと「W 発電」ケースでは太陽電池出力の一部が自家消費されて残りが売電されるので、売電電力の変動は「太陽電池そのものの出力変動」「家庭の電力需要変動」両方の影響を受ける。これに対して「三電池」ケースでは太陽電池出力のほぼ全量が売電されるので、売電電力の変動は「太陽電池そのものの出力変動」のみに左右される。よって「三電池」ケースは売電電力の出力変動を左右する変動要因が少ないため、最大変動が小さくなったと考えられる。

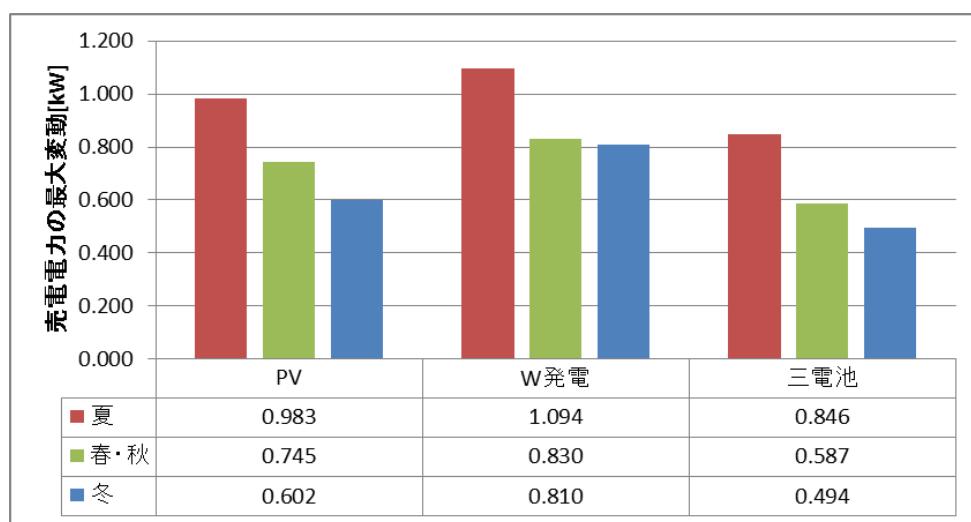


図 6-10 1 日における売電電力の最大変動

6.3 経済性の評価

機器導入の経済性を評価するために、各ケースにおける年間コストを比較する(図 6-11)。年間コストはイニシャルコストとランニングコストで構成され、ランニングコストは更に電力料金・ガス料金・売電利益に分類される。以降、家庭用燃料電池・蓄電池・太陽電池それぞれの導入効果を評価するために、適当なケースを抽出して年間コストを比較する。

6.3.1 家庭用燃料電池の導入による効果

「ベース」ケースと「FC」ケースの年間コストを比較することで、家庭用燃料電池の導入による経済性への効果を評価することができる。「ベース」ケースの年間コストが 294,883 円/年であるのに対して「FC」ケースの年間コストは 392,732 円/年となっており、家庭用燃料電池の導入によって年間コストが 97,849 円/年増加している。年間コスト増加の原因は燃料電池導入によって生じる追加的なイニシャルコスト (+163,809 円/年) にあり、コージェネレーションで家庭エネルギー需要が効率的に賄われることによるランニングコストの削減 (-65,961 円/年) よりも優位に作用している。

6.3.2 家庭用燃料電池と蓄電池の併設による効果

「FC」ケースと「FC+BT」ケースの年間コストを比較することで、家庭用燃料電池と蓄電池の併設による経済性への効果を評価することができる。「FC」ケースの年間コストが 392,732 円/年であるのに対して「FC+BT」ケースの年間コストは 570,062 円/年となっており、家庭用燃料電池に対して蓄電池を追加的に併設することで年間コストが 177,330 円/年増加している。蓄電池の導入によって生じる追加的なイニシャルコスト (+177,380 円/年) が、ほぼそのまま年間コストの増加に寄与している。6.1.2 の運転スケジュールで確認したように蓄電池はほとんど利用ないことが分かっており、ランニングコストの削減は無視できるほど小さい (-50 円/年)。

本研究の結果で蓄電池の導入が経済性に寄与しなかったのは、家庭が常に系統から電力を得られることを想定したためであり、停電という特殊条件を加味しなかったためである。参考にした蓄電池は停電時でも燃料電池が運転できるようにすることを目的としたものであり、導入効果の適正な評価には「停電回避コスト」のような外部費用を考慮する必要があることが確認できた。

6.3.3 太陽電池の導入による効果

「ベース」ケースと「PV」ケース、「FC」ケースと「W 発電」ケース、「FC+BT」ケースと「三電池」ケースの年間コストをそれぞれ比較することで、太陽電池の導入による経済性への寄与を評価することができる。それぞれ年間コストは 294,883 円/年→288,942 円/年 (ベース→PV)、392,732 円/年→378,266 円/年 (FC→W 発電)、570,062 円/年→548,398 円/年 (FC+BT→三電池) と変化している。つまり、いずれの場合も太陽電池の導入によっ

て年間コストは削減しており，削減額は従来型給湯器の場合（ベース→PV）が 5,941 円/年，家庭用燃料電池の場合（FC→W 発電）が 14,466 円/年，蓄電池付き家庭用燃料電池の場合（FC+BT→三電池）が 21,664 円/年となっている。

太陽電池の高額な追加的イニシャルコスト（+88,442 円/年）にも関わらず年間コストが減少したのは，売電単価が 42 円/kWh と高く設定されているため売電による利益が多く得られるためである。「W 発電」ケースや「三電池」ケースになると家庭用燃料電池や蓄電池によって家庭電力需要の多くを賄うことができるので，その分売電利益も大きくなる。しかし，売電利益によって家庭用燃料電池や蓄電池によるイニシャルコストが相殺される程には至っていない。

特徴的なのは蓄電池付き家庭用燃料電池に対して太陽電池を導入した「三電池」ケースで，イニシャルコストの増加に加えて，電力料金・ガス料金がいずれも増加している（+4,799 円/年，+1,108 円/年）。これは系統からの電力・ガス供給を増やしてでも太陽電池の売電に対するインセンティブが強いことを示している。

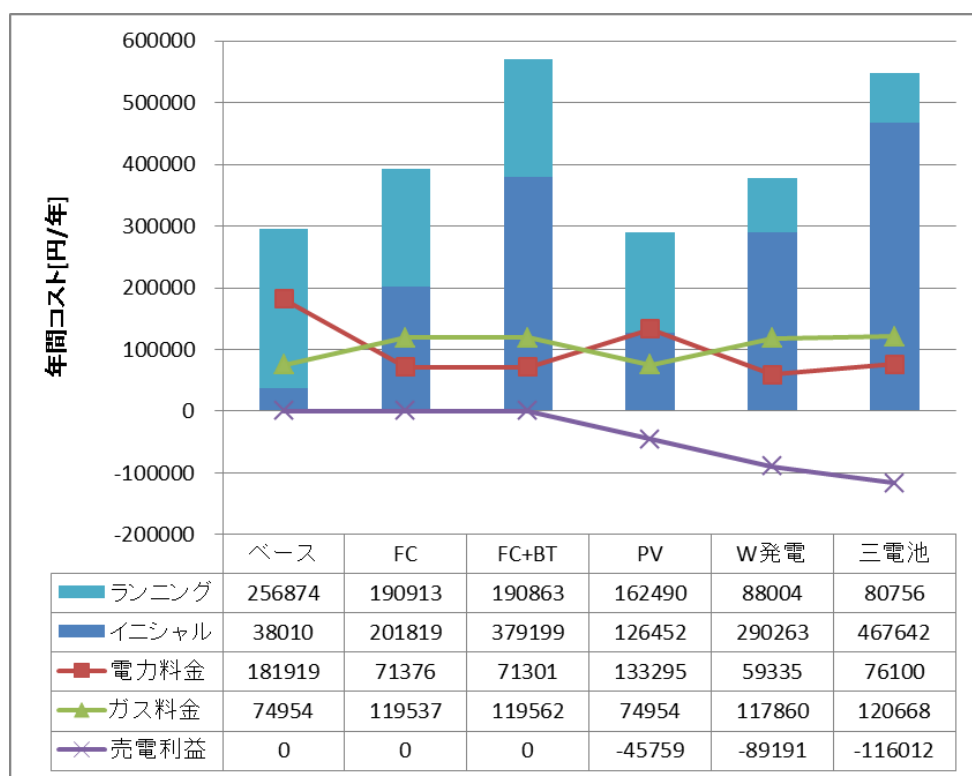


図 6-11 年間コストの比較

6.4 環境性の評価

機器導入の環境性を評価するために、各ケースにおける年間 CO₂ 排出量を比較する (図 6-12)。CO₂ 排出量の算出には「火力代替基準」と「全電源代替基準」の 2 種類の方法があり、自家発電装置の導入によって削減される発電を「火力代替基準」では火力発電とし、「全電源代替基準」では削減分を全電源平均とする (詳しくは、5.1.3 を参照)。以降、CO₂ 排出量への寄与が予想される家庭用燃料電池・太陽電池・W 発電それぞれの導入効果を評価するために、適当なケースを抽出して年間 CO₂ 排出量を比較する。

6.4.1 家庭用燃料電池の導入による効果

「ベース」ケースと「FC」ケースの年間 CO₂ 排出量を比較することで、家庭用燃料電池の導入による環境性への効果の評価を行うことができる。「ベース」ケースの年間 CO₂ 排出量は火力代替基準・全電源代替基準で等しく 4,026kg-CO₂/年であるのに対し、「FC」ケースの年間 CO₂ 排出量は火力代替基準で 2,226kg-CO₂/年、全電源代替基準で 3,124kg-CO₂/年となっており、家庭用燃料電池の導入は年間 CO₂ 排出量 44.7% (火力代替基準) / 22.4% (全電源代替基準) の削減効果があった。

家庭用燃料電池の導入による年間コストは+177,330 円/年なので、CO₂ 排出削減の限界費用は 54,361 円/t-CO₂ (火力代替基準) / 108,480 円/t-CO₂ (全電源代替基準) となった。

6.4.2 太陽電池の導入による効果

「ベース」ケースと「PV」ケースの年間 CO₂ 排出量をそれぞれ比較することで、太陽電池の導入による環境性への寄与を評価することができる。「ベース」ケースの年間 CO₂ 排出量は火力代替基準・全電源代替基準で等しく 4,026kg-CO₂/年であるのに対し、「PV」ケースの年間 CO₂ 排出量は火力代替基準で 2,251kg-CO₂/年、全電源代替基準で 2,881kg-CO₂/年となっており、家庭用燃料電池の導入は年間 CO₂ 排出量 44.1% (火力代替基準) / 28.4% (全電源代替基準) の削減効果があった。

太陽電池の導入による年間コストは売電利益を加味すると-5,941 円/年なので、CO₂ 排出削減の限界費用は-3,347 円/t-CO₂ (火力代替基準) / -5,189 円/t-CO₂ (全電源代替基準) となった。

売電利益が国民全体で負担されることを考慮して、売電利益を除いた社会全体のコストからも限界費用の算出を行なう。太陽電池の導入による社会全体の年間コストは+39,818 円/年なので、CO₂ 排出削減の社会的限界費用は 22,434 円/t-CO₂ (火力代替基準) / 34,776 円/t-CO₂ (全電源代替基準) となった。

6.4.3 W 発電の導入による効果

「ベース」ケースと「W 発電」ケースの年間 CO₂ 排出量をそれぞれ比較することで、太陽電池の導入による環境性への寄与を評価することができる。「ベース」ケースの年間 CO₂ 排出量は火力代替基準・全電源代替基準で等しく 4,026kg-CO₂/年であるのに対し、「W 発電」ケースの年間 CO₂ 排出量は火力代替基準で 547kg-CO₂/年、全電源代替基準で 2,033kg-CO₂/年となっており、家庭用燃料電池の導入は年間 CO₂ 排出量 86.4%（火力代替基準）／49.5%（全電源代替基準）の削減効果があった。

売電利益を含めた W 発電の導入による年間コストは 83,383 円/年なので、CO₂ 排出削減の限界費用は 23,968 円/t-CO₂（火力代替基準）／41,838 円/t-CO₂（全電源代替基準）となった。

売電利益を除いた W 発電の導入による社会全体の年間コストは 199,395 円/年なので、CO₂ 排出削減の社会的限界費用は 57,314 円/t-CO₂（火力代替基準）／100,048 円/t-CO₂（全電源代替基準）となった。

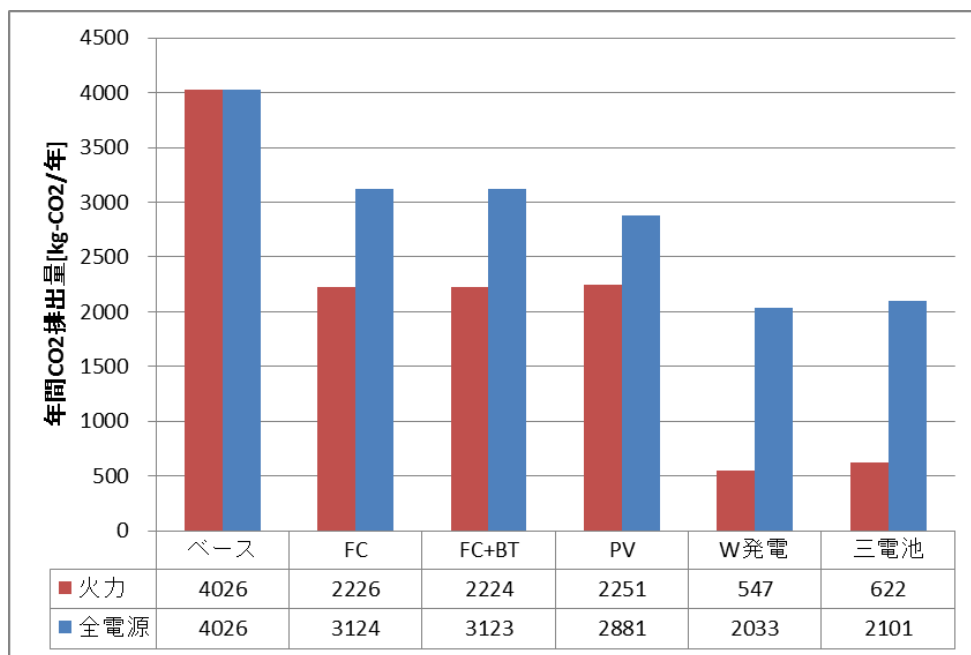


図 6-12 年間 CO₂ 排出量の比較

6.5 まとめ

以上、「電力」「経済性」「環境性」の3つの観点から、現状における家庭用エネルギー機器の導入効果を評価した。まとめたものを表 6-2 に示す。それぞれの項目について、相対的に優れているケースを緑、中間であるケースを黄色、相対的に劣っているケースを赤で表している。総括して言えることは、すべての観点から優れているような機器の選択はなく、いずれのケースも一長一短である。

家庭用燃料電池・太陽電池の導入によって、家庭における電力の系統依存度や排出するCO₂量は削減することができる。しかし機器の導入にはイニシャルコストがかかり、太陽電池は余剰電力の売電利益によってイニシャルコストを相殺できるが、家庭用燃料電池は年間10万円弱のコスト増加となる。

家庭用燃料電池と蓄電池の併用は、電力の系統依存度やCO₂排出量には効果がなく、むしろ年間コストは17~18万円程度の増加となっている。唯一、「三電池」ケースにおいて太陽電池の売電電力の変動を削減する効果が得られている。蓄電池の導入効果を適正に評価するためには、停電といった特殊条件も考慮する必要がある。

表 6-2 評価のまとめ

	電力の 系統依存度	売電電力の 最大変動 [kW]	コスト [円/年]	CO ₂ 排出量 [kg-CO ₂ /年]	
				火力	全電源
ベース	100.0%		294883	4026	4026
FC	38.7%		392732	2226	3124
FC+BT	38.6%		570062	2224	3123
PV	57.0%	0.777	288942	2251	2881
W発電	-1.3%	0.911	378266	547	2033
三電池	-0.9%	0.642	548398	622	2101

第7章 変動抑制を考慮した需給シミュレーション

第5章・第6章では現状における家庭エネルギー需要シミュレーションを行ない、その結果を示した。第7章では本研究で提案する変動抑制制度を考慮してエネルギー需要シミュレーションを行ない、その結果を示す。

家庭用エネルギー機器の制御による太陽電池の出力変動抑制は、主に売電電力量の減少によって家庭に経済的損失をもたらす。そこでこの損失を相殺するために、電力会社が変動抑制に協力した家庭に対して「変動抑制報酬」を支払う制度を提案する（以降、変動抑制制度と呼ぶ）。変動抑制を報酬化することによって、コスト最小化という単独の指標から家庭の利益と電力会社の負担回避が均衡する点を見極めることができる。以降7.1で変動抑制報酬の定式化を行ない、7.2でシミュレーション結果から売電電力変動の抑制効果と付随する経済性・環境性への影響を評価し、7.3でまとめを記す。

7.1 変動抑制制度の定式化

式7-1は変動抑制を考慮した場合の総コスト、式7-2は変動抑制報酬、式7-3は1日ごとの売電電力の最大変動を表す。

1日ごとに売電電力の最大変動 ($MAX\Delta pvEgr(d)$ [kW]) を求め、最大変動が小さくなるに応じて電力会社から家庭に支払われる報酬額 ($BENEmanage(d)$ [円/日]) が大きくなる。最大変動を基準1.0kW未満にすると家庭は報酬を得ることができ、逆に最大変動が1.0kWを超過すると家庭は課徴金を支払うことになる（負の報酬を得る）。基準1.0kWは制度がなかった場合の「PV」ケースにおける、夏の最大変動の平均値を参考に設定した(6.2.5参照)。報酬単価 ($Vmanage$ [円/kW]) を変化させることで、報酬額や抑制効果が変化する。

$$\begin{array}{l} \text{総コストの計算式} \\ \text{式 7-1} \end{array} \quad \text{COST} = \sum_d \{ \text{COST}_{ini} + \text{COST}_{run}(d) - \text{BENE}_{sell}(d) - \text{BENE}_{manage}(d) \}$$

$$\begin{array}{l} \text{変動抑制報酬の} \\ \text{計算式} \\ \text{式 7-2} \end{array} \quad \text{BENE}_{manage}(d) = Vmanage \cdot (1.0 - MAX\Delta pvEgr(d))$$

$$\begin{array}{l} \text{最大変動の計算式} \\ \text{式 7-3} \end{array} \quad \text{MAX}\Delta pvEgr(d) = \max_t |pvEgr(d, t) - pvEgr(d, t - 1)|$$

7.2 シミュレーション結果

夏は、電力の最大需要量が年間で最も大きくなり電力会社の運転予備力が低下すると同時に、**3.4.2**で確認したように太陽電池の出力変動が最も激しい季節でもある。そこで、夏4ヶ月間に変動抑制の制度を実施することを想定した。ただし、「一日中快晴」あるいは「一日中雨」のように気象データから予め太陽電池の出力変動が小さいことが予想できる日は除外し、「晴れ時々曇り」のように天候影響で出力変動が生じやすい日のみ実施することとした。その結果、変動抑制の制度が実施されるのは年間で97日程度となった。

家庭用エネルギー機器の導入「W発電」「三電池」の2通り、報酬単価「20円/kWh」「40円/kWh」「60円/kWh」の3通りの計6通りのケースについてシミュレーションを行なった。

7.2.1 出力変動時の運転スケジュール

1日の中で太陽電池の出力変動が激しかった時間帯を切り出して、変動抑制制度の有無による運転スケジュールの違いを確認する。「W発電」ケースと「三電池」ケースそれぞれについて、変動抑制制度なしの場合と制度ありで報酬単価40円/kWhの場合を比較した。売電電力の変動をわかりやすくするために、**6.1**の運転スケジュールとは異なり売電電力を赤線で示している。

7.2.1.1 「W発電」ケース

図7-1に「W発電」ケースにおける、変動抑制制度の有無による運転スケジュール違いを示す。変動抑制制度を導入すると、燃料電池の出力を低下させたり出力の一部を電気ヒータによって熱変換させたりすることで、変動のピークを低下させる。図で示した時間帯は9時過ぎに燃料電池の出力の一部を熱変換させて太陽電池の自家消費を増やすことによって変動抑制を行なっている。しかしながらそれ以前の8時~9時の変動は抑制されていない。燃料電池の出力は15分おきにしか制御できない上に電気ヒータは効率のよい給湯方法ではないため、条件が揃わないと変動抑制が行われないものであると考えられる。

7.2.1.2 「三電池」ケース

図7-2に「三電池」ケースにおける、変動抑制制度の有無による運転スケジュール違いを示す。変動抑制制度を導入すると、太陽電池出力が上昇する「山」のタイミングに太陽電池から蓄電池へ充電を行い、出力が下降する「谷」のタイミングで放電して需要に回すという、蓄電池の充放電を繰り返すことによって売電電力の変動を抑制している。「W発電」ケースでは抑制がなされなかった8時~9時の変動に対しても「三電池」ケースでは対応できており、多様な変動に対して抑制力を持つことが分かる。これは変動の山をカットしたときに生じる蓄電を変動の谷を埋める際に利用できるため、効率的に出力変動が行えるためである。

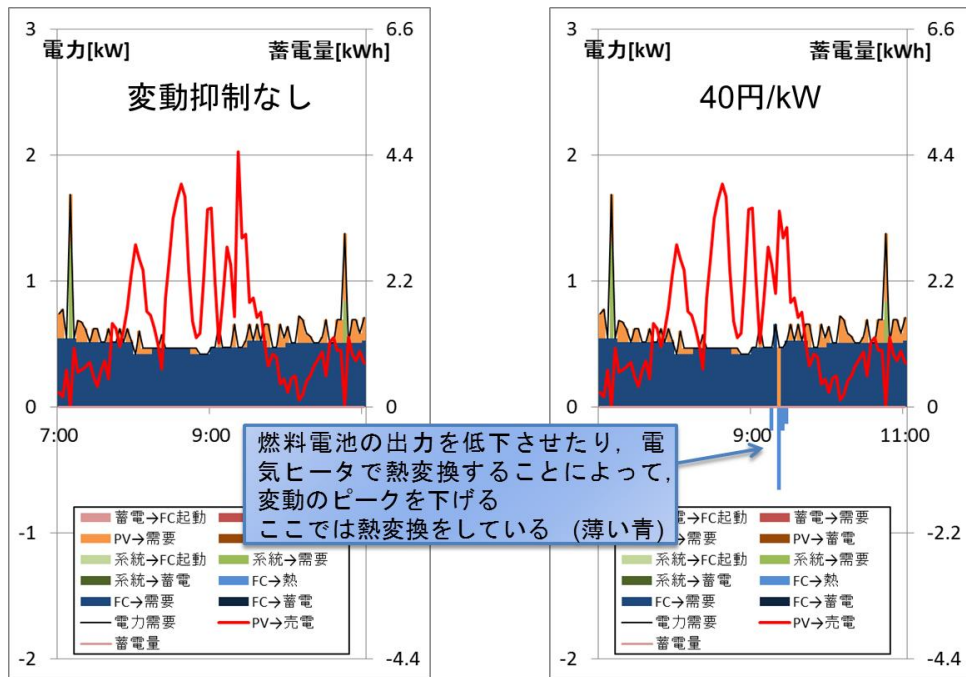


図 7-1 運転スケジュール (W 発電)

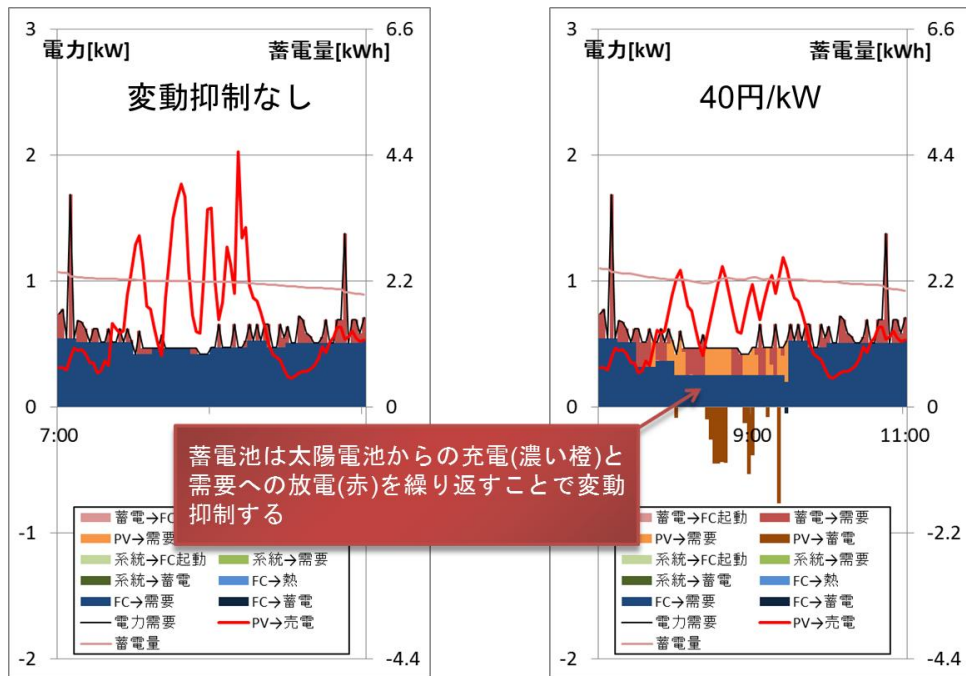


図 7-2 運転スケジュール (三電池)

7.2.2 変動抑制効果の評価

変動抑制制度の有無によって夏に最も大きかった売電電力の変動（以降、「夏季最大変動」と呼ぶ）にどの程度の開きがあるかを確認することで、変動抑制制度の効果を評価することができる。

結果を見ると、「W 発電」ケースでは報酬単価が 20 円/kW の段階で夏季最大変動が 1.154kW に収束し、「三電池」ケースでは報酬単価が 40 円/kW の段階で夏季最大変動が 0.495kW に収束している。いずれのケースでも、低い報酬単価の段階で夏季最大変動が一定値に収束することが分かる。変動抑制効果は「W 発電」よりも「三電池」の方が高く、これは 7.2.1 の運転スケジュール結果とも整合性が取れている。「制度なし」と「40 円/kW」の夏季最大変動の差から変動抑制効果を求めると、「三電池」ケースで 0.949kW 「W 発電」ケースで 0.590kW の抑制効果がある。報酬単価 40 円/kW で変動抑制制度を導入することによって、制度がない場合に対して 66%（W 発電）／34%（三電池）まで変動を削減することができた。

抑制された夏季最大変動がそのまま運転予備力の容量を削減すると考えると、変動抑制制度化において「W 発電」や「三電池」の住宅が何世帯集まれば運転予備力用発電所 1 基分に相当するかを推定することができる。運転予備力用発電所を LNG 火力発電所（容量 40 万 kW）として計算すると、三電池住宅 421,496 世帯、W 発電住宅 677,966 世帯で発電所 1 基相当の変動抑制力を持つ。

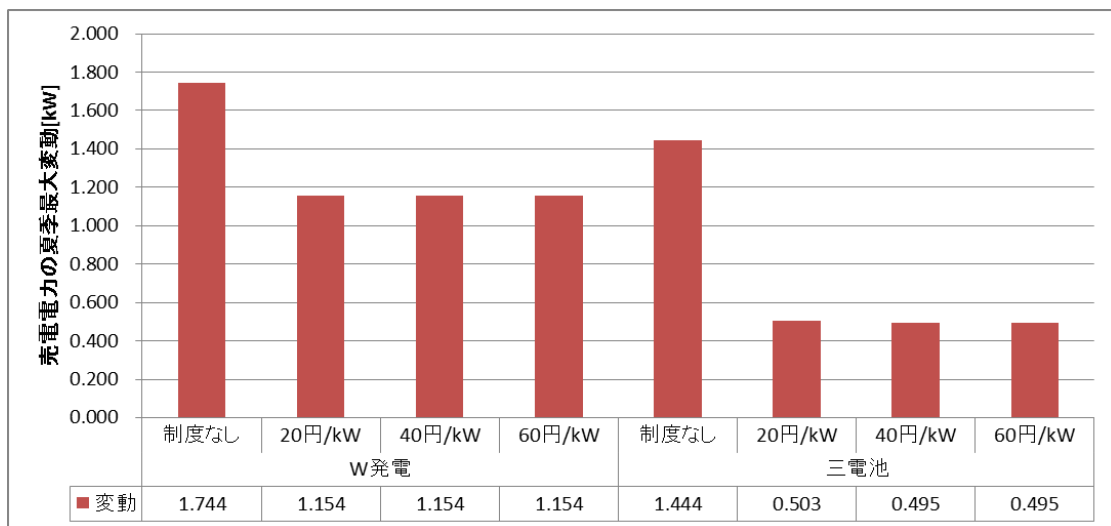


図 7-3 売電電力の夏季最大変動の比較

7.2.3 電力供給源の比較

電力需要・熱変換・蓄電ロス合計した家庭の電力消費量に対し、電力系統・燃料電池・太陽電池がどの程度の電力量を供給しているかを図 7-4 に示す。

変動抑制制度の導入によって、太陽電池から自家消費に回される電力量が増加する。「W 発電」／「三電池」いずれのケースも、74kWh/月／3kWh/月（制度なし）→77kWh/月／9kWh/月（20 円/kW）→79kWh/月／15kWh/月（40 円/kW）→79kWh/月／20kWh/月（60 円/kW）と、報酬単価が高くなるにつれ自家消費量が増加していく。ただし制度が年間で 4 ヶ月実施されるとして、変動抑制制度による自家消費増分は年間発電量（2,787kWh/年）の 2.5%にも満たない。

太陽電池の自家消費が増えることで他の電源からの供給量が低下する。「W 発電」の場合は燃料電池からの供給が低下し（245kWh/月（制度なし）→244kWh/月（20 円/kW）→243kWh/月（40 円/kW）→243kWh/月（60 円/kW））、「三電池」の場合は系統電力からの供給が低下する（257kWh/月（制度なし）→250kWh/月（20 円/kW）→242kWh/月（40 円/kW）→237kWh/月（60 円/kW））という違いが確認できる。「W 発電」ケースでは燃料電池の出力制御、主に出力低下によって変動抑制をするのに対し、「三電池」ケースでは太陽電池出力が優先的に充電され系統からの充電が控えられるためと考えられる。

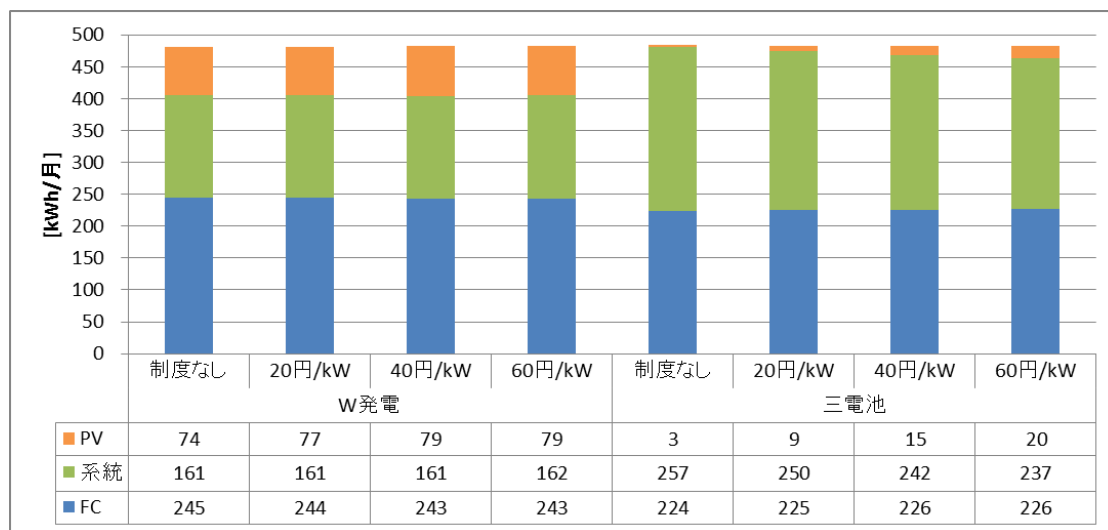


図 7-4 月間電力供給源の比較（夏）

7.2.4 経済性の評価

7.2.4.1 家庭のランニングコストの比較

各ケースにおける夏の月間ランニングコストを比較する（図 7-5）。「W 発電」／「三電池」いずれのケースも，3,485 円/月／2,914 円/月（制度なし）→3,409 円/月／2,670 円/月（20 円/kW）→3,247 円/月／2,311 円/月（40 円/kW）→3,020 円/月／1,921 円/月（60 円/kW）と，変動抑制制度の導入によって月々のランニングコストは減少することが分かった。これは売電利益の減少が変動抑制報酬によって相殺されるのと同時に電力・ガス料金の減少が重なるためである。「W 発電」ケースではガス料金「三電池」ケースでは電気料金が下がっており，これは 7.2.3 の電力供給源の結果からも確認できる。

7.2.4.2 電力会社の抑制コストの試算

変動抑制報酬は電力会社が家庭に対して支払うもので，発電所の運転予備力を確保する代わりにコストとして計上される。変動抑制報酬を変動抑制効果（7.2.2 参照）で割ることで，出力変動を 1kW 抑制するために電力会社が追加的に支払うコスト（以降，電力会社の抑制コストと呼ぶ）を算出することができる。制度が年間で 4 ヶ月実施されるとして報酬単価「40 円/kW」のケースで計算した場合，電力会社の抑制コストはそれぞれ 2,583 円/年（W 発電）／3,233 円/年（三電池）と推定される。ただし，制度が十分な変動抑制力を持つには，W 発電や三電池の住宅が広く普及することが前提となる。

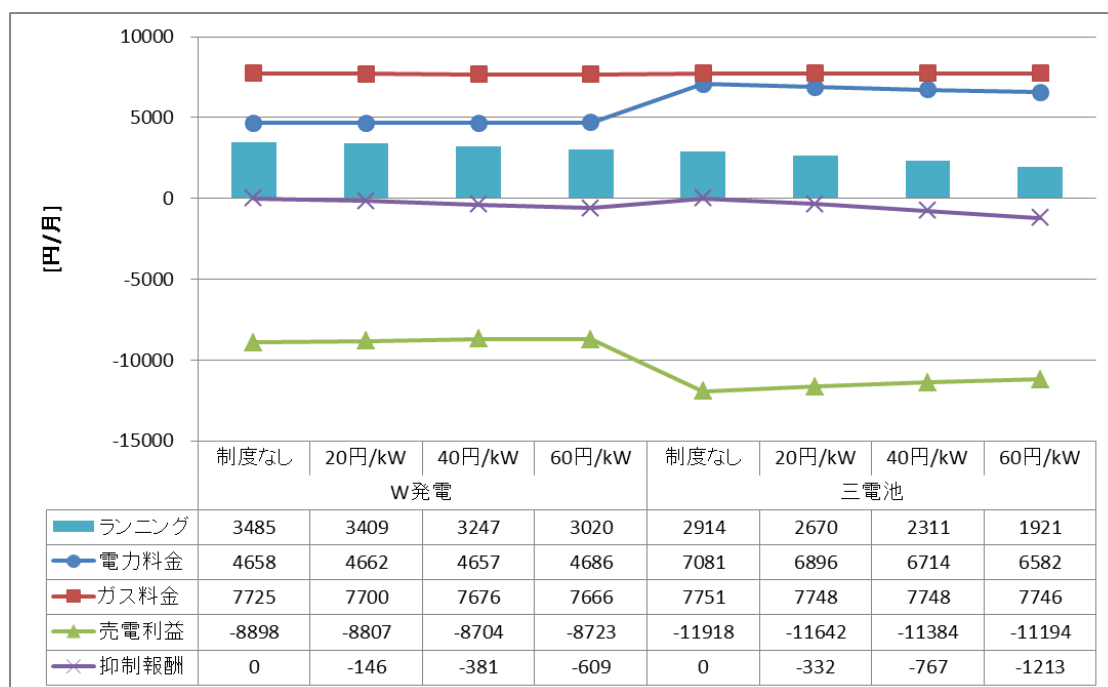


図 7-5 月間ランニングコストの比較（夏）

7.2.5 環境性の評価

各ケースにおける夏の月間 CO₂ 排出量を比較する（図 7-6）。

「W 発電」ケースでは、制度なしのときに -8.3kg-CO₂/月（火力代替基準）／111.8kg-CO₂/月（全電源代替基準）であるのに対し制度ありで報酬単価 40 円/kW のときに -6.1kg-CO₂/月（火力代替基準）／113.0kg-CO₂/月（全電源代替基準）と変動抑制制度の導入によって CO₂ 排出量が微増している。これは売電電力量の減少によって系統での CO₂ 排出削減効果が薄れるためである。

一方で「三電池」ケースでは、制度なしのときに 9.0kg-CO₂/月（火力代替基準）／123.6kg-CO₂/月（全電源代替基準）であるのに対し制度ありで報酬単価 40 円/kW のときに 7.7kg-CO₂/月（火力代替基準）／122.7kg-CO₂/月（全電源代替基準）と変動抑制制度の導入によって CO₂ 排出量が微減している。これは系統から購入する電力量が削減されることで CO₂ 排出が抑えられるためである。

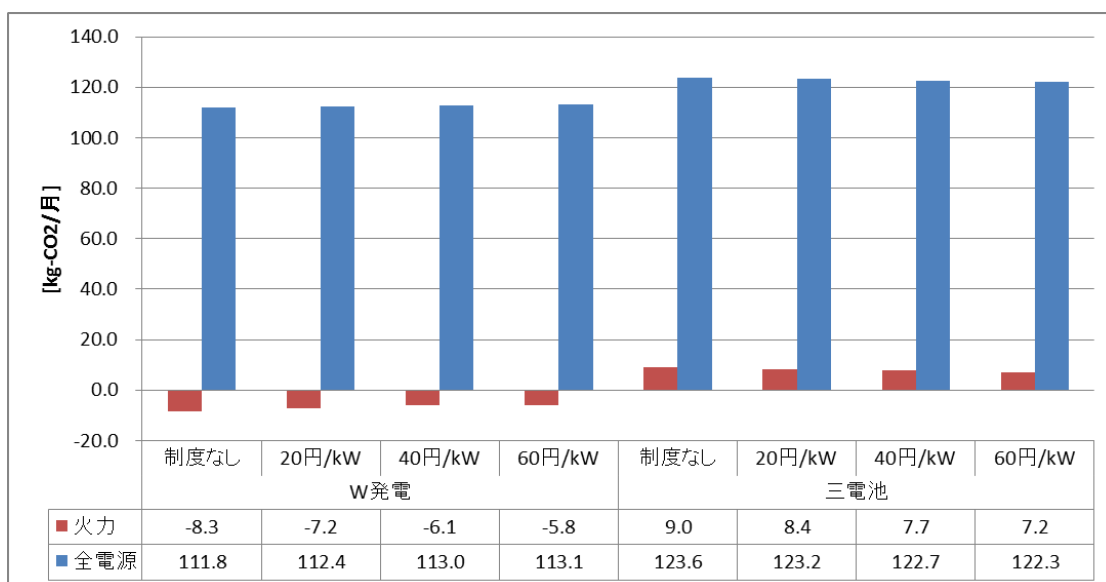


図 7-6 月間 CO₂ 排出量の比較（夏）

7.3 まとめ

以上、家庭用エネルギー機器の制御による売電電力の変動抑制制度を導入した際の、抑制効果と付随するコスト・CO₂排出量への影響を評価した。まとめたものを表 7-1 に示す。

本研究で提案した変動抑制制度の導入によって電力会社が追加的に支払うコストは、1kW の変動抑制に対して 2,500～3,000 円/年程度であることが分かった。家庭用エネルギー機器の導入による違いを見ると、W 発電よりも三電池住宅のほうが効率的に変動抑制を行なうことができ、家庭のコスト低減効果も大きい。また制度導入によって W 発電住宅では売電量が減り CO₂ 排出量が微増したが、三電池住宅では太陽電池の自家消費が系統からの電力購入を代替することで逆に CO₂ 排出量をわずかながら削減する。

以上から、家庭用燃料電池・蓄電池といった家庭エネルギー機器を出力制御することによる太陽電池の出力変動抑制の効果を確認することができた。また機器の比較では燃料電池よりも蓄電池の方が効率的に変動抑制された。

表 7-1 変動抑制制度の導入による影響（報酬単価 40 円/kW）

	変動抑制効果 [kW]	変動抑制報酬 [円/年]	電力会社 抑制コスト [円/年]	家庭コスト [円/年]	CO ₂ 排出量 [kg-CO ₂ /年]	
					火力	全電源
W発電	-0.590	1525	2583	-952	+8.4	+4.8
三電池	-0.949	3066	3233	-2412	-5.2	-3.6

第8章 結論

8.1 本研究の結論

本研究は、DSMによる経済的かつ環境的な電力システムの構築を目指して、家庭用エネルギー機器の出力制御によって住宅用太陽光発電の出力変動を抑制させる手法を提案した。まず、現状における家庭用燃料電池・太陽電池・蓄電池の導入効果を「電力」「経済性」「環境性」の観点から評価した。そして電力会社がW発電・三電池の家庭に対し「変動抑制報酬」を支払うことで売電電力の変動抑制に対し経済的インセンティブを付与する変動抑制制度を提案し、その抑制効果を評価した。

8.2 今後の展開

本研究は変動抑制制度の対象としてW発電や三電池の住宅を想定したが、三電池住宅は未だ実証実験の段階であり、W発電住宅の「再生可能エネルギーの固定買取制度」導入から1年も満たない現在は世帯数が限られている。しかし分散型エネルギーシステムに対する関心が強まっているなかで、可能エネルギーの大量導入と同時に家庭用燃料電池・蓄電池の普及も進んでいくものと考えられる。

東日本大震災を契機に住宅への蓄電池の設置が「停電対策」として注目を集めたが、蓄電池をより普段使いの用途で活用しようという動きもあり、その好例が電気自動車である。本研究で提案した出力変動抑制策は電気自動車ようバッテリーなど常に系統接続されていない蓄電池に対しても応用可能である。電気自動車と家庭の間で電力のやり取りを行なう「ホーム・トゥ・ヴィークル (H2V)」「ヴィークル・トゥ・ホーム (V2H)」によって家庭の電力需要対応・太陽電池の出力変動・電気自動車の充電を一度に達成することが期待される。

本研究は議論を一つの家庭の中で完結するために、W発電・三電池住宅を想定した。しかし、仮に太陽電池と出力制御する家庭用エネルギー機器が遠隔地に設置されている場合でも手法の一般性は変わらない。すなわち本研究を発展させることで、地域内にある再生可能エネルギー・分散型電源を強調運転する場合も考えることができる。これはまさに分散型エネルギーシステムの構築のために関心が高まっている分野であり、本研究はその足がかりを作る事ができたといえよう。

本研究では一世帯におけるエネルギー需給を対象とした評価を行なった。太陽電池出力や家庭電力需要は、対象を個々の世帯から複数世帯に広げることによって変動がお互いに打ち消し合って抑制される「ならし効果」があることが知られている。本研究ではならし効果の影響を考慮することができなかつたので、今後はモデルの対象を複数世帯に拡大することで研究を深化することができるであろう。また本研究は東京在住の4人世帯という特定の世帯構成についてのみの検討をしているが、今後核家族化や少子高齢化が進む中でより多様な家族構成についても検討が求められる。

参考文献

- [1] IPCC (以上 編), 文部科学省, 経済産業省, 気象庁, 環境省 (以上 翻訳); IPCC 地球温暖化第四次レポート 気候変動 2007, (2009), pp.2-22, 中央法規.
- [2] 内閣府;平成 23 年度版 防災白書, <http://www.bousai.go.jp/hakusho/h23/index.htm>, アクセス日: 2012 年 1 月 9 日.
- [3] 資源エネルギー庁;平成 23 年度 エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2012), <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2012/index.htm>, アクセス日: 2012 年 1 月 13 日.
- [4] 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会;国会事故調 報告書, (2012), pp.23-25, 徳間書店.
- [5] 環境省;報道発表資料 平成 22 年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について (お知らせ), <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14702>, アクセス日: 2013 年 1 月 26 日.
- [6] 環境省;報道発表資料 平成 23 年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について (お知らせ), <https://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15912>, アクセス日: 2013 年 1 月 26 日.
- [7] 経済産業省;太陽光発電導入量の年度展開, <http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g81125a03j.pdf>, アクセス日: 2013 年 1 月 26 日.
- [8] 大和総研グループ;ESG ニュース 家庭用燃料電池、2011 年度導入量は過去最高, <http://www.dir.co.jp/research/report/esg/esg-news/12041601esg-news.html>, アクセス日: 2013 年 1 月 26 日.
- [9] 東京都;報道発表資料 電力緊急対策 住宅用蓄電システムの補助事業の受付を開始します, <http://www.metro.tokyo.jp/INET/OSHIRASE/2012/05/20m57500.htm>, アクセス日: 2013 年 1 月 27 日.
- [10] 東京電力(株);プレスリリース 2011 年今夏の需給見通しと対策について (第 4 報) <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11070102-j.html>, アクセス日: 2013 年 1 月 27 日.
- [11] 東京電力(株);電力会社における周波数調整と会社間連系について, http://www.re-policy.jp/keito/2/030912_09.pdf, アクセス日: 2013 年 1 月 26 日.
- [12] 国家戦略室;コスト等検証委員会報告書, http://www.npu.go.jp/policy/policy09/archive02_hokoku.html, アクセス日: 2013 年 1 月 27 日.
- [13] 大屋慎次;マイクログリッドの制御可能電源による系統需給制御への貢献に関する研究, (2008), 東京大学工学系研究科 修士論文.

- [14] 藤本卓也, 山口容平, 下田吉之; 住宅におけるエネルギーマネジメントによる太陽光発電に起因する余剰電力および負荷変動抑制効果の検討, 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), pp.543-546.
- [15] 河野孝史; 一般生活者の行動パターンに基づく住宅用エネルギーシステムの研究, 東京大学工学部 卒業論文 (2005).
- [16] 西川兼康, 長谷川修 (編); エネルギー変換工学 改訂版, (1990), pp.170-173, 理工学社.
- [17] (財)気象業務支援センター; 地上気象観測 1 分値データ, (2009).
- [18] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構; 日射量データベース, <http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>, アクセス日: 2013 年 1 月 21 日.
- [19] (財)新エネルギー財団; 都道府県別 kW 当たりの年間発生電力量と年間売電電力量 (10 年間) (1995 年 4 月~2005 年 3 月), <http://www.solar.nef.or.jp/josei/h18-07.pdf>, アクセス日: 2013 年 1 月 21 日.
- [20] 小澤暁人; 生活行動の再現による家庭のエネルギー需要の推定, エネルギー・資源, Vol.34 No.1 (2013), pp.57-60.
- [21] J. Widén, E. Wäckelgård; A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand, *Applied Energy*, 87-6 (2010), pp.1880-1892.
- [22] Richardson, M. Thomson, D. Infield, and C. Clifford; Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model, *Energy and Buildings*, 42-10 (2010), pp.1878-1887.
- [23] NHK 放送文化研究所; データブック国民生活時間調査 2010, (2011), NHK 出版.
- [24] Y. Shimoda, T. Asahi, A. Taniguchi, and M. Mizuno; Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model, *Energy*, 32-9 (2007), pp.1617-1633.
- [25] M. Mitzenmacher, E. Upfal (以上 著), 小柴 健史, 河内 亮周 (以上 翻訳); 確率と計算—乱択アルゴリズムと確率的解析, (2009), pp.215-219, 共立出版.
- [26] 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), pp.361-364.
- [27] (社)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).
- [28] (財)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 7 章照明エネルギー消費量の評価方法, http://ees.ibec.or.jp/documents/img/kaisetsu200903_07_shoumei.pdf, アクセス日: 2013 年 1 月 18 日.

- [29] 池上貴志, 岩船由美子, 荻本和彦; 電力需給調整力確保に向けた家庭内機器最適運転計画モデルの開発, 電気学会論文 B 電力・エネルギー部門誌 130(10), (2010), pp.877-887.
- [30] 田中洋一; 数理最適化によるコージェネレーションシステムの設計と運用に関する研究, 京都大学大学院情報学研究科 博士論文 (2009).
- [31] 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, 東京大学新領域創成科学研究科 修士論文 (2011).
- [32] (財)建築環境・省エネルギー機構; SMASH for Windows ver.2 住宅用熱負荷計算プログラム, <http://www.ibec.or.jp/program/files/smash.pdf>, アクセス日: 2013 年 1 月 19 日.
- [33] 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).
- [34] 浦野良美, 中村洋 (編著); 建築環境工学, (1996), pp.228, 森北出版.
- [35] 佐藤春樹; 冷蔵庫・エアコンの実際の電力消費量推定法, 日本建築学会第 4 回住宅エネルギーシンポジウム, (2005).
- [36] 気象庁; 気象統計情報 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, アクセス日: 2013 年 1 月 19 日.
- [37] (財)日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット (編); EDMC エネルギー・経済統計要覧 2004 年度版, (2004), 省エネルギーセンター.
- [38] 東京ガス(株); エネファームとは—製品仕様/価格, http://home.tokyo-gas.co.jp/enefarm_special/enefarm/specific.html, アクセス日: 2013 年 1 月 22 日.
- [39] (社)燃料電池普及促進協会; 平成 23 年度 民生用燃料電池導入支援補助金 補助金交付申請書の提出期限の延長について, <http://www.fca-enefarm.org/news20120907.html>, アクセス日: 2013 年 1 月 22 日.
- [40] (社)太陽光発電協会 太陽光発電普及拡大センター; <http://www.j-pec.or.jp/>, アクセス日: 2013 年 1 月 22 日.

A 付録

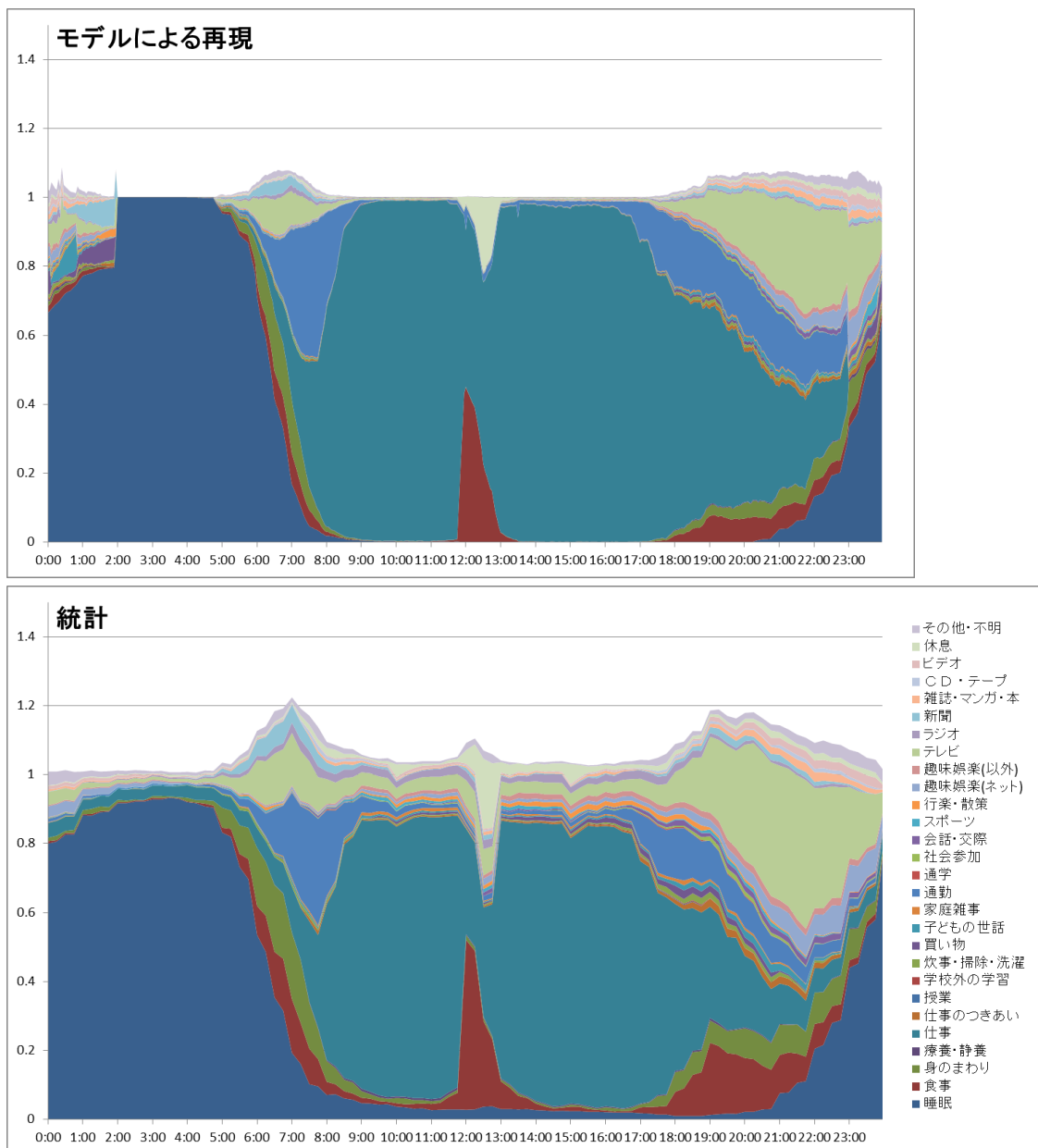


図 A-1 行為者割合 (男勤め人・平日)

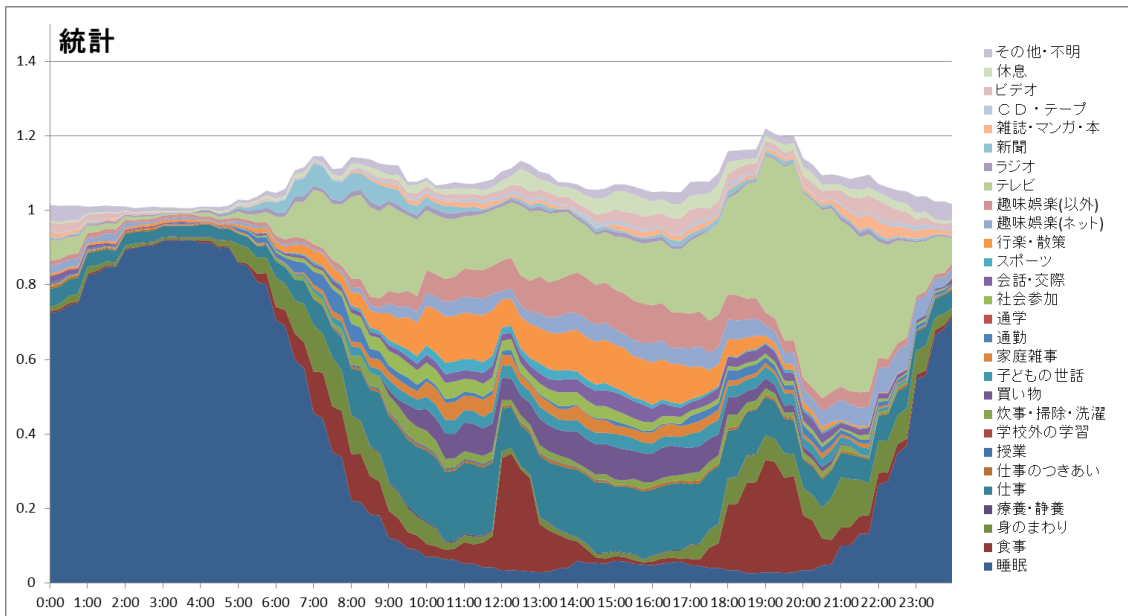
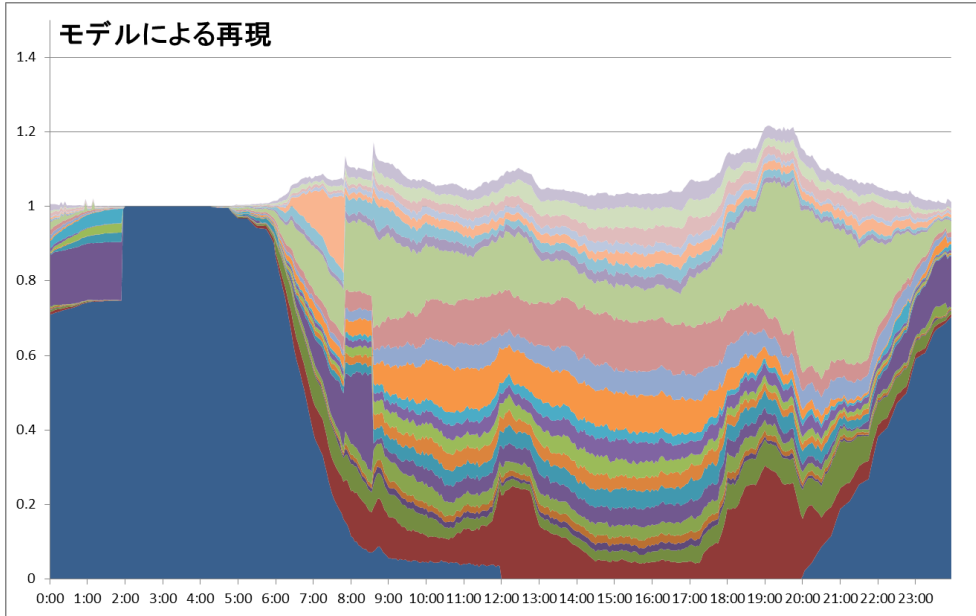


図 A-2 行為者割合 (男勤め人・休日)

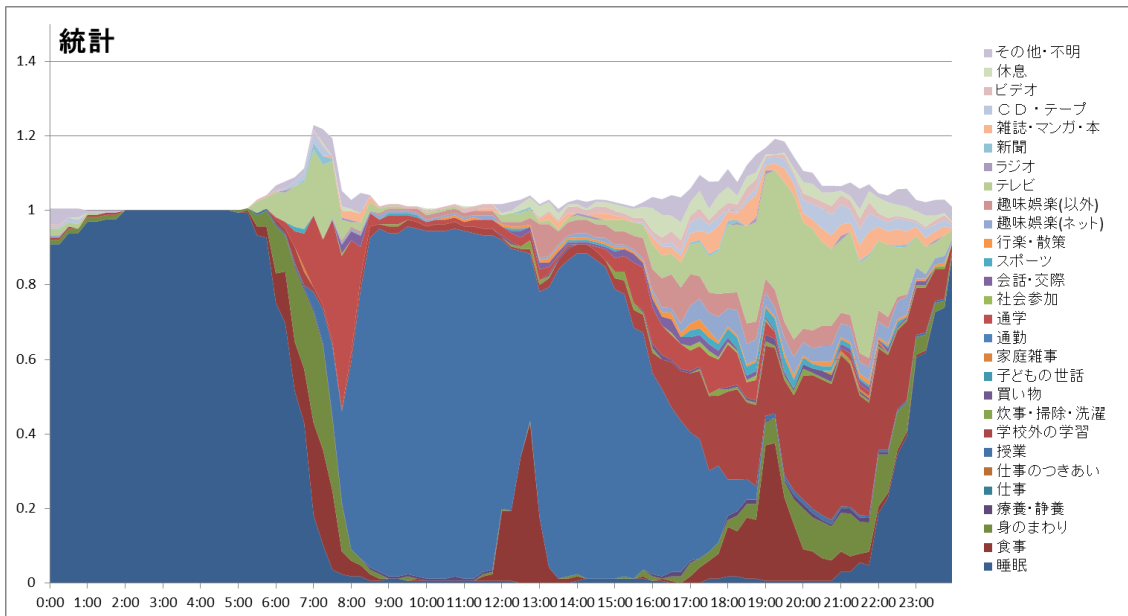
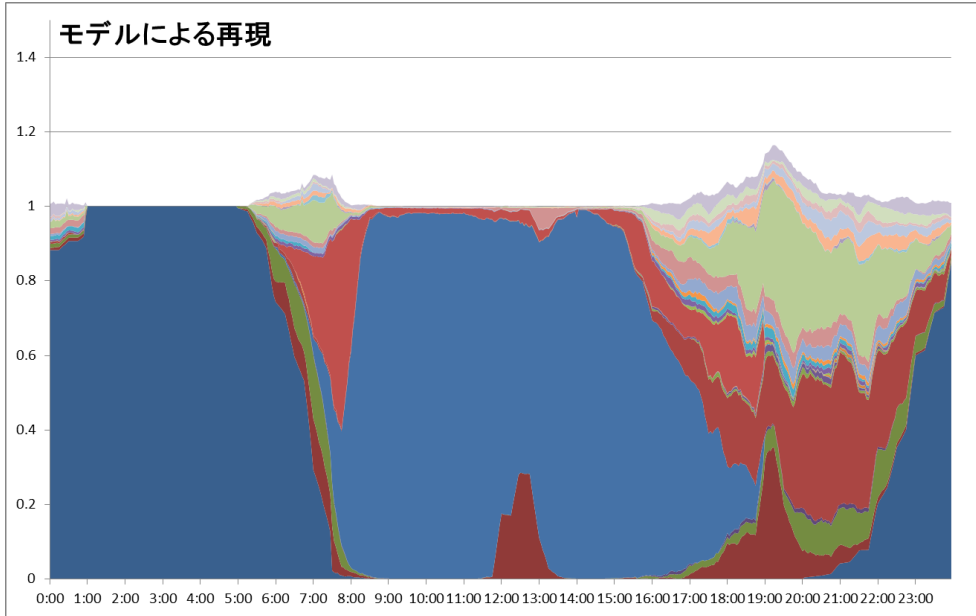


図 A-3 行為者割合 (中学生・平日)

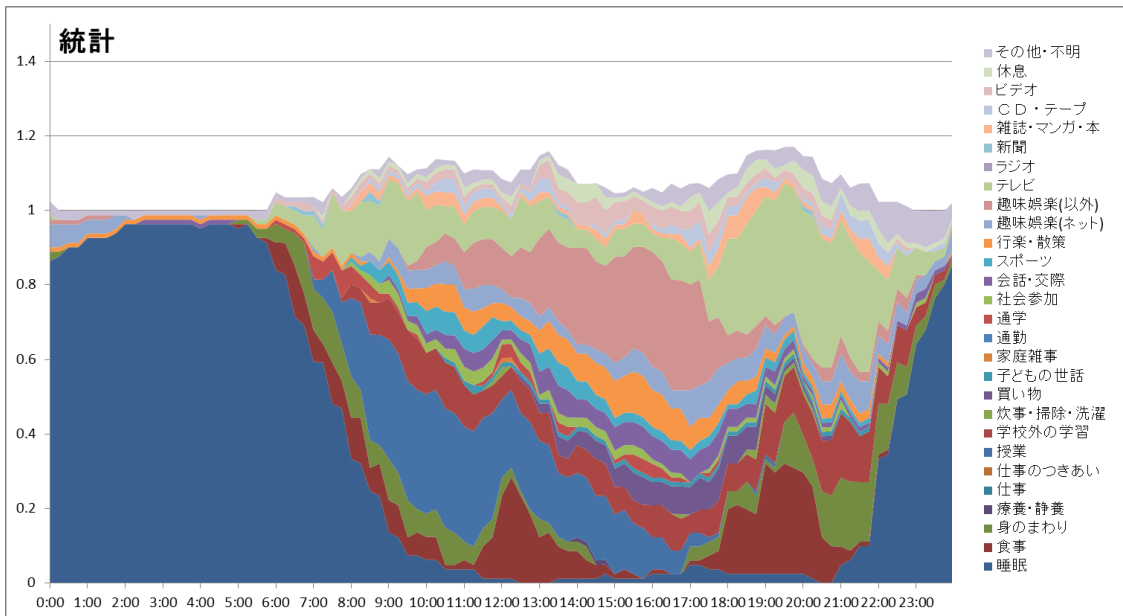
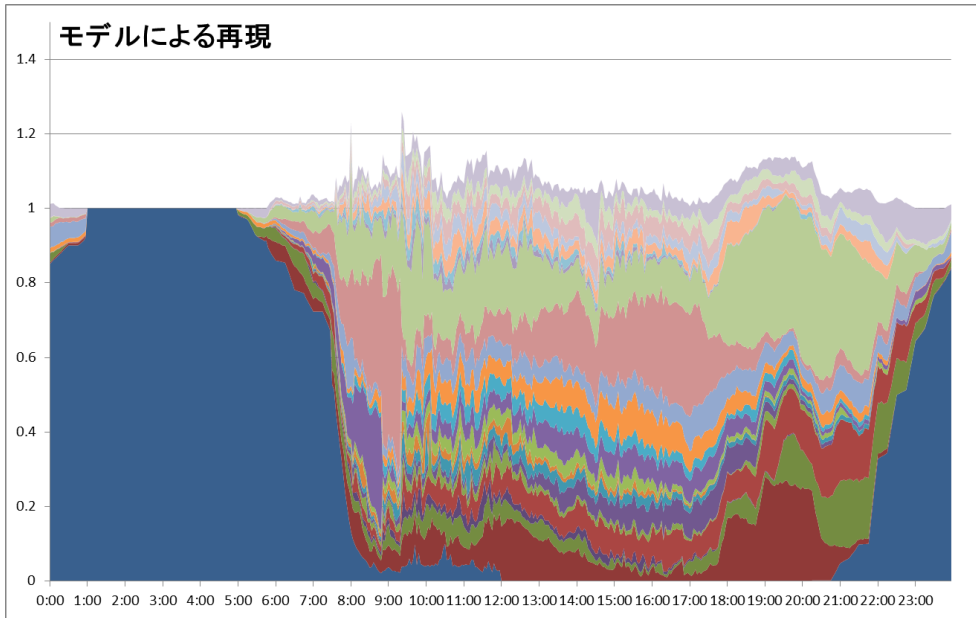


図 A-4 行為者割合 (中学生・休日)

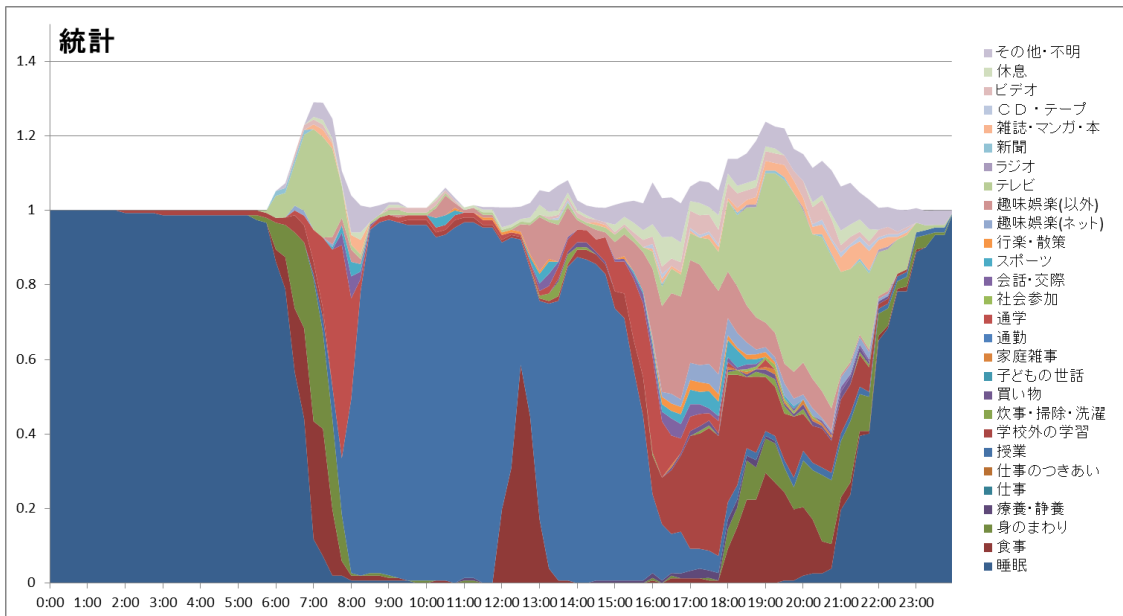
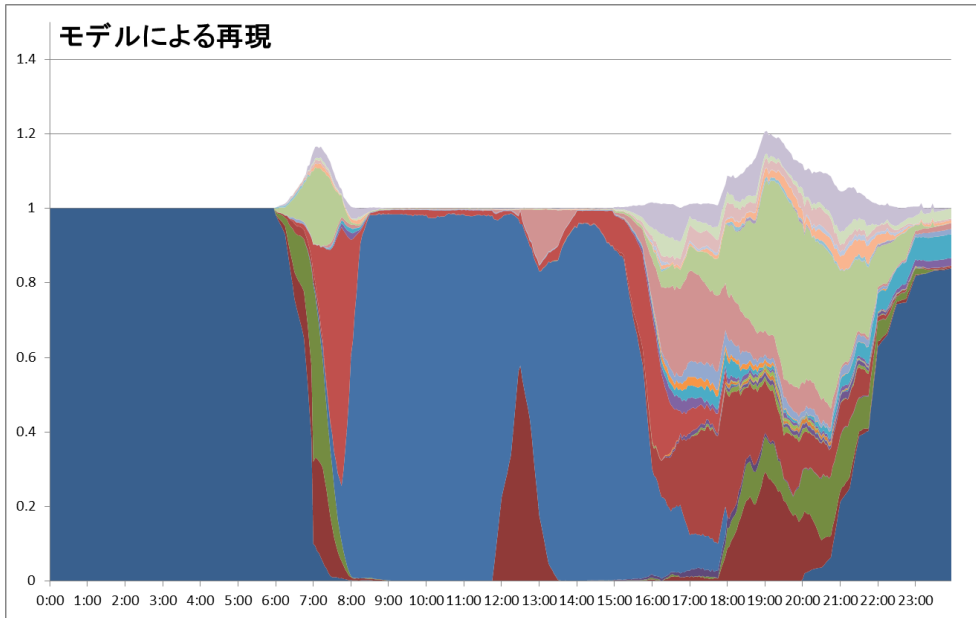


図 A-5 行為者割合 (小学生・平日)

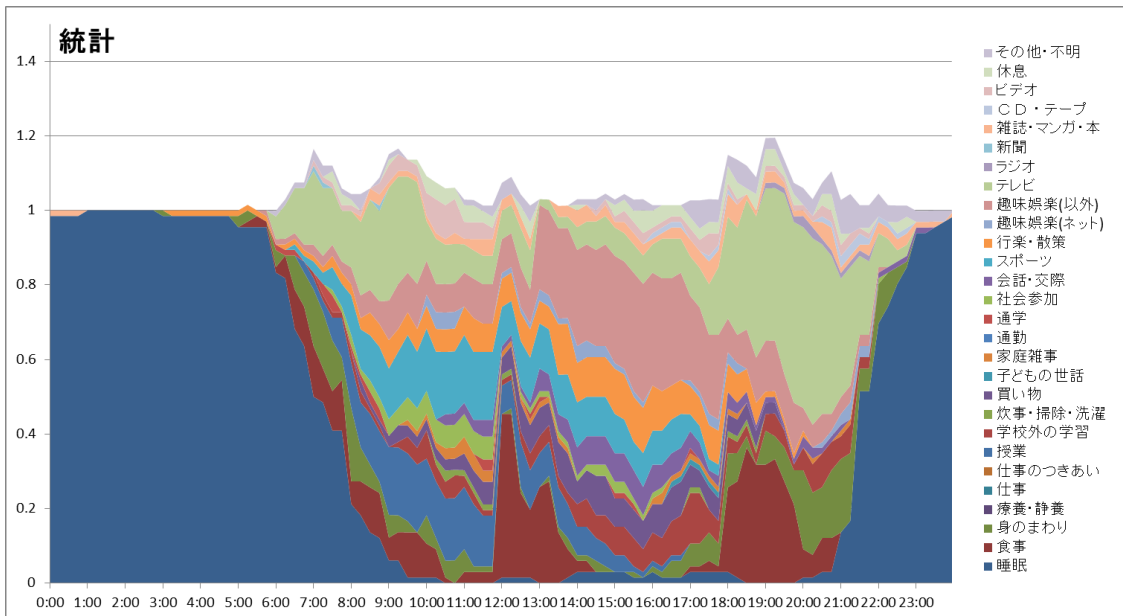
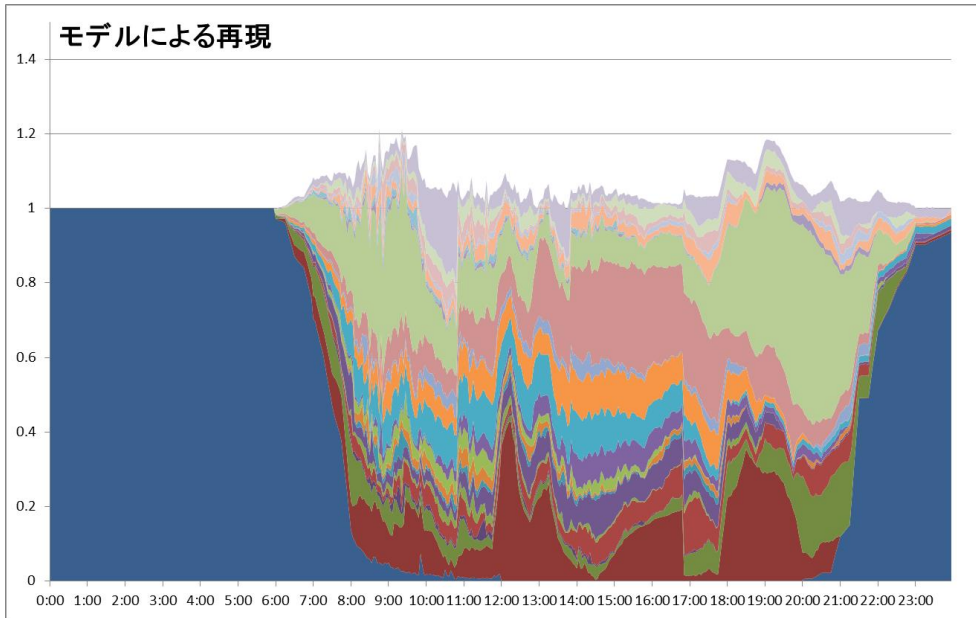


図 A-6 行為者割合 (小学生・休日)

謝辞

私が修士課程での研究に取り組む上で、担当教員の吉田好邦教授から多くのご助力を賜りました。日頃より、吉田先生から鋭い洞察のもとで助言をしていただけたことで、2年間の研究活動を非常に有意義に送ることができ、その成果をこの修士論文としてまとめ上げることが果たせました。また、学会発表・シンポジウム・企業見学など学外でも様々な経験の場を与えていただいたことで、環境・エネルギーに関する見識を広げることができました。

松橋隆治教授からは工学系研究科への異動でお忙しいにも関わらず、ゼミなどで貴重な時間を割いてアドバイスをしていただきました。松橋先生の研究に対するひたむきな姿勢を見るたびに、私も奮起して研究に従事するエネルギーを与えていただきました。

先生方お二人には深く深く感謝いたします。

松橋・吉田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。

研究を行なうにあたって、(社)日本ガス協会から家庭エネルギー機器に関する貴重なデータを提供していただきました。私の研究に対して業界人としての視点でコメントをしていただいたことで、より実用性の高い研究に仕上げることができました。

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