

ホームエネルギーマネジメントシステムの導入に向けた 生活者の行動データに基づく電力需要の推定

Electricity Demand Estimation Based on Residential Behavioral Data Towards Home Energy Management Systems

曹 子琦*・前 匡鴻*・松橋 隆治*

Ziqi Cao Masahiro Mae Ryuji Matsushashi

Abstract

To appropriately evaluate the operational and equipment-introduction effects of HEMS, residential load scenarios that reflect household composition, occupancy status, and variability in daily activities are required, rather than a single average load curve. This paper aims to develop a household electricity load estimation model for HEMS evaluation by generating residents' daily activity schedules from time-use statistics and linking them to appliance-use rules. Time-varying Markov transition probabilities were estimated from time-specific activity participation rates, and individual and household activity schedules were generated at a 3-minute resolution; these schedules were then converted into household-level electricity load curves using activity-based appliance rules, appliance ownership rates, and weather conditions. The generated activity schedules broadly reproduced the temporal patterns and daily average durations of major activities, while the load distributions showed increased demand and variability caused by morning and evening at-home activities and winter heating use. The proposed model can generate multiple residential load scenarios that account for uncertainty in residents' behavior and may serve as a fundamental model for future evaluation of HEMS operation and equipment introduction, including PV systems, storage batteries, electricity tariff menus, and contract-based HEMS services.

Key words : Time-use data, Markov chain, Household load, Residential behavior, Home energy management system

1. 序論

近年、住宅部門における省エネルギー化および再生可能エネルギーの有効利用が重要な課題となっている。特に、太陽光発電設備、家庭用蓄電池および電気自動車の普及に伴い、住宅内のエネルギー機器を統合的に管理する Home Energy Management System (HEMS) の役割が重視されている。HEMS は、家庭内の電力消費量や太陽光発電量を可視化するだけでなく、電力料金、発電量および需要状況に応じて、空調、給湯、蓄電池、EV 充電器などの運転を制御することができる。HEMS には、家庭内の省エネルギー化に加え、電力需要ピークの抑制、電気料金の削減および電力需給調整への貢献が期待されている。

一方、家庭部門の電力需要は、家電の保有状況や住宅性能だけでなく、居住者がいつ在宅し、どの行動を行うかに強く依存する。家庭単位または少数世帯を対象とする HEMS の評価では、大規模系統需要で期待されるならし効果が十分に働かないため、個々の世帯の生活リズムの差が負荷曲線に直接反映される。したがって、HEMS の導入効果や運用方策を評価するためには、単一の平均負荷曲線だけでなく、世帯構成、在宅状態、生活行動に起因する不確実性を含む負荷シナリオが必要である。

HEMS 最適化研究の多くはあらかじめ与えられた負荷曲線、または集計済み需要データを用いる場合が多い。その場合、なぜその時間帯にピークが生じたのか、どの行動が必要変動を生んだのか、世帯構成や在宅状態の違いがどの程度負荷に影響するのかを説明しにくい。

近年の HEMS 研究では、PV、蓄電池、電気料金、デマンドレスポンス、ユーザ快適性などを考慮した運用最適化が広く検討されている。Raza ら¹⁾はスマートホームエネルギーマネジメントに関する広範なサーベイを行い、負荷予測、スケジューリング最適化、強化学習、IoT、ユーザ嗜好などが HEMS の主要課題であることを整理している。また、Liu ら²⁾は NILM に基づくユーザ嗜好とその不確実性を HEMS に組み込む枠組みを提案し、Blonsky ら³⁾は気象予測や居住者活動予測の不確実性が HEMS 制御性能に影響することを示した。これらの研究は、HEMS を現実的に評価するには、単なる平均需要ではなく、不確実性を含む入力データが必要であることを示している。

住宅負荷モデルに関しては、住宅の電力負荷曲線を構築する手法としてトップダウンモデルとボトムアップモデルが整理されており、個別の家電、世帯属性、居住者行動を積み上げるボトムアップ型モデルの有効性が示されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。また、Richardson ら⁷⁾は生活時間データや在宅状態を用いての住宅電力需要を生成する研究をした。Widén and Wäckelgård⁸⁾は非同次マルコフ連鎖により居住者の活動系列と電力需要を生成

*東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
E-mail: cao@enesys.t.u-tokyo.ac.jp

した。Fischer ら⁹⁾は個人行動、家電保有率を考慮したモデルを構築した。日本においても、生活時間データと居住者属性に基づき、居住者間・世帯間の行動ばらつきを表現する確率モデルが検討されている¹⁰⁾。

そこで、本論文の目的は、単一の平均負荷曲線ではなく、居住者行動のばらつきを反映した複数の住宅負荷シナリオを生成し、HEMS における設備容量および運用効果の評価に利用可能な基礎モデルを構築することである。これにより、太陽光発電設備、蓄電池およびその他の制御対象機器について、居住者行動の不確実性を考慮した設備投資および運用計画の検討が可能になると考えられる。

本論文の貢献は下記の通りである。

- ・時刻別行為者率に基づく遷移確率の推定と性別・年代別の居住者行動の3分刻みのスケジュール生成による生活行動の時間的ばらつきを反映したシナリオの作成
- ・行動スケジュールを世帯単位の電力負荷曲線に変換する枠組みの構築による HEMS の運用および設備導入評価に利用可能な入力データの生成

2. 使用データ

2.1 生活時間データ

生活行動日程の推計には、NHK 国民生活時間調査に基づく時刻別行為者率データを用いる¹¹⁾。NHK の生活時間調査は、国民の生活行動を時間面から把握する調査であり、定例調査では1日の行動を行動分類に振り分け、15分単位で記入する方式が用いられている。本論文で用いた入力データは、時刻別主行動者割合と、日単位の行為者率・行為者平均時間・全員平均時間・標準偏差である。対象層は性別・年代別、対象日は平日、土曜日、日曜日である。

行動分類は、睡眠、食事、身のまわりの用事、仕事、授業・学内の活動、炊事・掃除・洗濯、テレビ、インターネット動画などを含む29種類とした。自由行動では同一時間帯に複数行動が記入され得るが、本論文ではマルコフ連鎖の状態を単一主行動とするため、日程生成段階では同時行動を導入しない。

2.2 家電保有率・気象データ

行動から家電負荷へ変換する際には、内閣府による消費動向調査（年齢・性別・世帯類型別の家電保有率）を用いた¹²⁾。特に、乾燥機や空気清浄機など必須ではない家電に対し、保有率から所持するか否かを判定する。

空調負荷の運転判断には、気象庁の過去気象データから取得した2023年東京の平均・最高・最低気温を用いた¹³⁾。年間電力量の検証には、環境省の家庭部門CO2排出実態統計調査（令和5年度）における世帯人数別電気使用量を用

いた¹⁴⁾。

3. 手法

3.1 従来手法

小澤・吉田¹⁵⁾は、NHK 放送文化研究所の生活時間データを用い、生活者の行動スケジュールをマルコフ連鎖で再現したうえで、行動に対応する消費電力および給湯量を設定し、家庭エネルギー需要を推定した。同研究は、生活行動の時間刻みを15分から3分へ細分化することで、電子レンジやドライヤーなど短時間・高出力機器による急峻な需要変動を表現できる点を特徴としている。

そこで、本論文では、マルコフ連鎖に基づく手法を用いて、各年齢層（10代から70代以上）および性別（男女）の居住者を対象として生活行動日程を生成し、より多くの家庭タイプのスケジュールを再現した。これにより、生活行動のばらつきを反映した複数の負荷シナリオを作成し、HEMS における設備投資および運用評価に利用可能な基礎データを構築する。

従来の手法と比べ、本論文の特徴は、より多様な居住者属性に対応した3分刻みの生活行動日程を生成する点と、短時間での頻繁な行動切替を抑える連続性ペナルティおよび不自然な行動順序を抑える順序ペナルティを導入して遷移確率を推定する点にある。

3.2 遷移確率の推定

統計データから得られる時刻 t の行動 j の行為者割合を $R_t(j)$ 、モデルから得られる次時刻の行為者割合を $\hat{R}_{t+1}(j)$ とする。時刻 t で行動 i にいる人が、次時刻に行動 j へ移る確率を $P_t(i, j)$ とすると、次時刻の推計行為者割合は式(1)で表される。

$$\hat{R}_{t+1}(j) = \sum_i R_t(i) P_t(i, j) \quad (1)$$

したがって、遷移確率の推定は、式(2)のように、推計値 $\hat{R}_{t+1}(j)$ と統計値 $R_{t+1}(j)$ の差を小さくする二次計画問題として定式化できる。

$$\min F = \sum_t \sum_j \left(\hat{R}_{t+1}(j) - R_{t+1}(j) \right)^2 + \lambda_1 C_c + \lambda_2 C_s \quad (2)$$

ここで、 C_c は短時間で行動が頻繁に切り替わることを抑える連続性ペナルティ、 C_s は睡眠から直接仕事へ移るなど不自然な行動順序を抑える順序ペナルティである。 λ_1 および λ_2 は、バランスを調整する重み係数である。

表 1 行動別の家電負荷設定例

行動	負荷処理	主な家電・消費電力
食事	B	電子レンジ 1200 W, 電気ケトル 1000 W, 炊飯器保温 30 W
身のまわりの用事	B	ドライヤー 600 W
仕事	A	PC 80 W (在宅時のみ発生)
学校外の学習	A	PC 80 W
炊事・掃除・洗濯	B	IH 1200 W, 電子レンジ 1200 W, 炊飯器 700 W, 換気扇 30 W, 掃除機 600 W, 洗濯機 250 W, 乾燥機 1000 W
インターネット (動画除く)	A	PC 80 W
インターネット動画	A	PC 80 W
テレビ	A	テレビ 100 W
録画番組・DVD	A	テレビ 100 W, 録画機・DVD 機器 20 W

また、遷移確率は式(3)の制約を満たす必要がある。

$$\sum_j P_t(i, j) = 1, \quad P_t(i, j) \geq 0 \quad (3)$$

すなわち、各行の遷移確率の和は 1 であり、すべての遷移確率は非負である。

3.3 個人日程の生成

個人日程は、推定された時刻別遷移確率を用いて逐次的に生成する。まず、対象とする年齢性別層および平休日区分の初期分布から 0 時時点の状態を乱数で選ぶ。次に、時刻 t で状態 i にいる人について、遷移確率 $P_t(i, j)$ を用いて次時刻の状態 j をランダムに決定する。この操作を繰り返すことで、各年齢層・性別層における平日・休日の生活行動スケジュールを生成した。

4. 負荷曲線の生成

4.1 行動別の家電対応ルール

主要行動と家電の対応は、(A)行動継続中に持続的に発生する負荷、(B)行動中の一部時間だけ発生する負荷の二つに分け、家電機器による消費電力を推定した。現段階では、行動に対応する複数の機器のうち使用機器を確率的に選択する簡易ルールを設定した。ただし、機器使用確率については今後、実測データや追加調査に基づく精緻化が必要である。

「炊事・掃除・洗濯」は複合行動であるため、朝・昼・夕の食事前では炊事として判断し、それ以外の時間帯では掃除と洗濯を同程度に割り当てる。空調負荷については、現段階では詳細な建物熱負荷シミュレーションではなく、外気温シナリオ、冷暖房設定温度、在宅人数、睡眠状態などを

反映した簡易モデルとして扱う。表 1 に行動別の家電対応例を示す。各機器の代表消費電力は、先行研究および公表資料に示された定格消費電力を参考に設定した。

4.2 家庭電力負荷合成

個人負荷を世帯単位へ合成する際、負荷を人数分単純加算すると冷蔵庫や待機電力が過大評価される。テレビや照明、空調の一部は共有負荷として扱うべきであり、人数分単純加算すること是不適切である。一方で、PC、ドライヤーなどの負荷は、メンバーごとに発生し得る。したがって、世帯負荷の集計では、用途ごとに最大値を取る共有機器と人数分加算する個人機器を区別する。世帯類型は、単身、夫婦、夫婦と子供、母子・父子、夫婦と片親、三世帯世帯など 14 類型を設定した。

5. 結果と考察

5.1 生活日程生成結果

生成した 4 人家庭のスケジュール例を図 1 に示す。図より、生活リズムを反映した日程が生成されていることが確認できる。また、世帯内の各構成員で行動時刻や行動内容が異なっており、居住者行動に起因する世帯負荷のばらつきを表現できる可能性が示された。生成された日程の妥当性は、単一の代表例だけでなく、多数サンプルの集計結果に基づいて評価した。20 代女性 (平日) を例として、生成した 500 本の日程から各時刻の行為者割合を再計算し、入力データの時刻別行為者率と比較する。29 種の行動の中、一日の平均行為者率が高い上位 8 行動を比較した。結果を図 2 に示す。主要行動について、ピークが生じる時間帯および日内変動の傾向は統計データと概ね一致している。

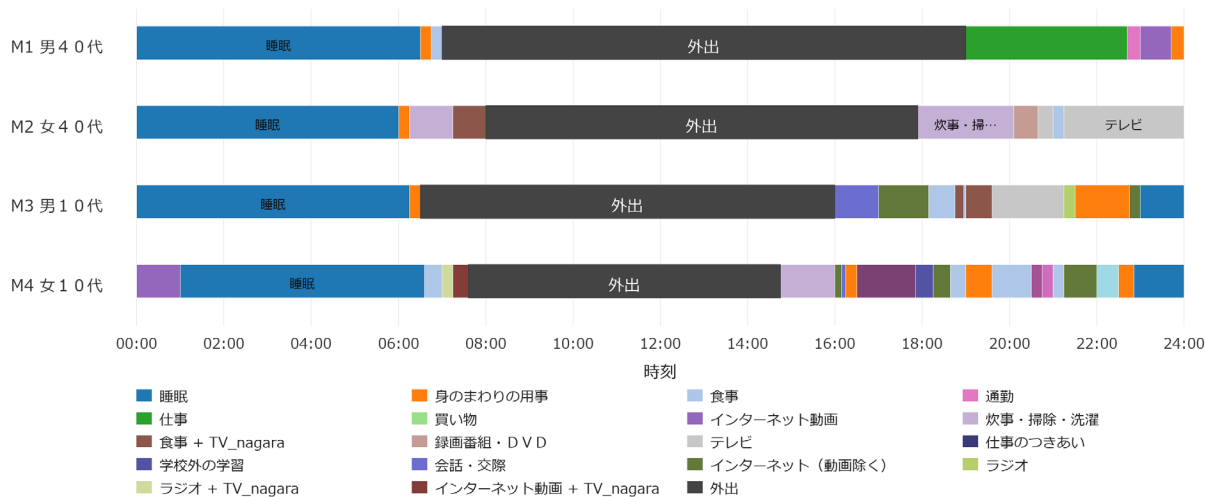


図1 代表家庭の平日日程（夫婦と子供2人）

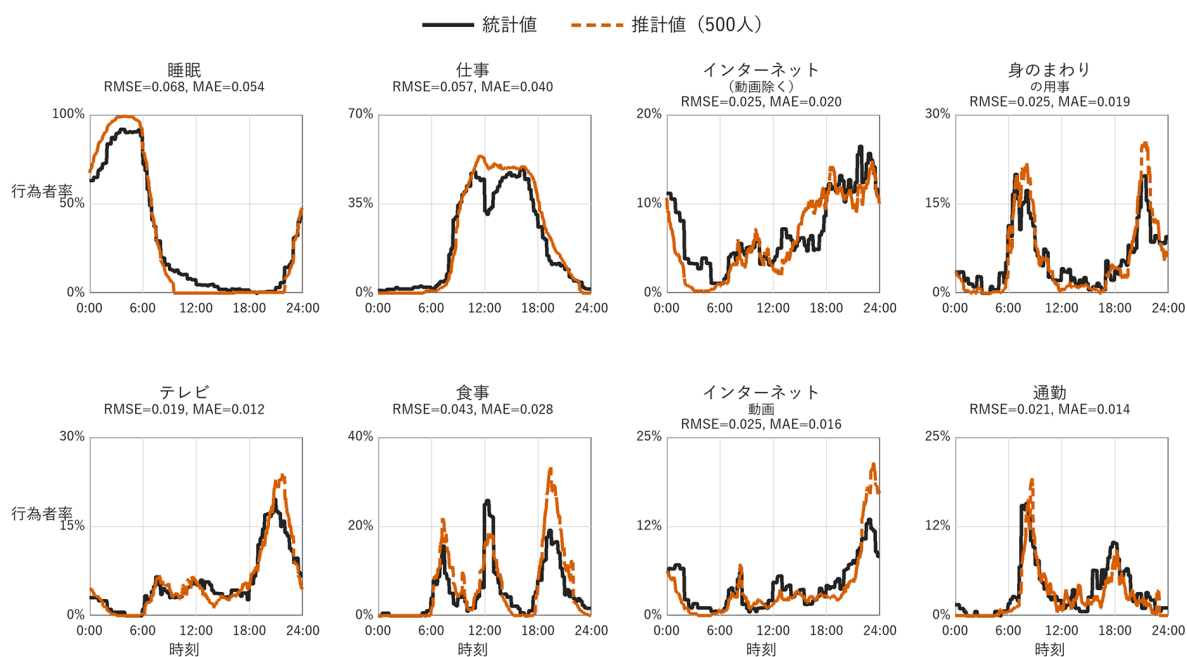


図2 女20代・平日における主要行動の時刻別行為者率比較

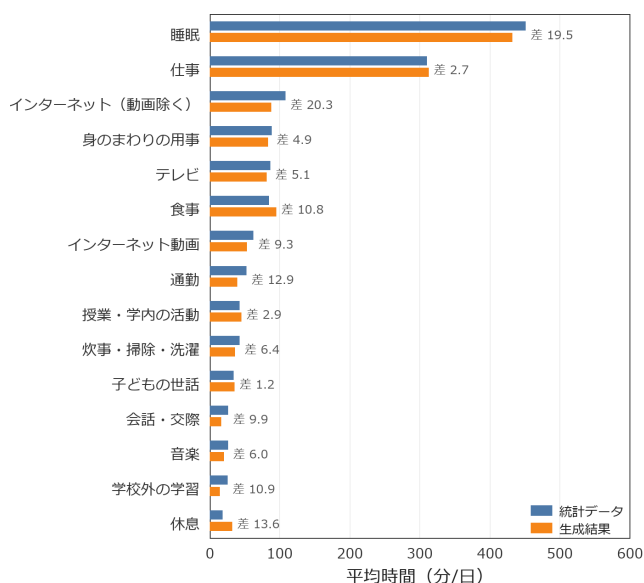


図3 女20代・平日における長時間行動の平均時間比較

さらに、長時間行動については、行為者率の時刻変化だけでなく、一日当たり平均時間の整合性も確認した。図3より、睡眠、仕事、身のまわりの用事、食事などの主要行動では、生成結果の一日当たり平均時間が統計値と概ね整合している。

5.2 電力需要の推定結果

例として、夫婦と子供2人世帯について500世帯分を合成した平日負荷分布を図4および図5に示す。ここでは、代表一世帯の負荷曲線ではなく、10-90%範囲、25-75%範囲、平均値、中央値を示すことで、同一世帯類型内のばらつきを確認した。

図4は春秋条件の結果であり、空調負荷を加えない場合の行動起因負荷を表している。朝6時以降に平均負荷が上

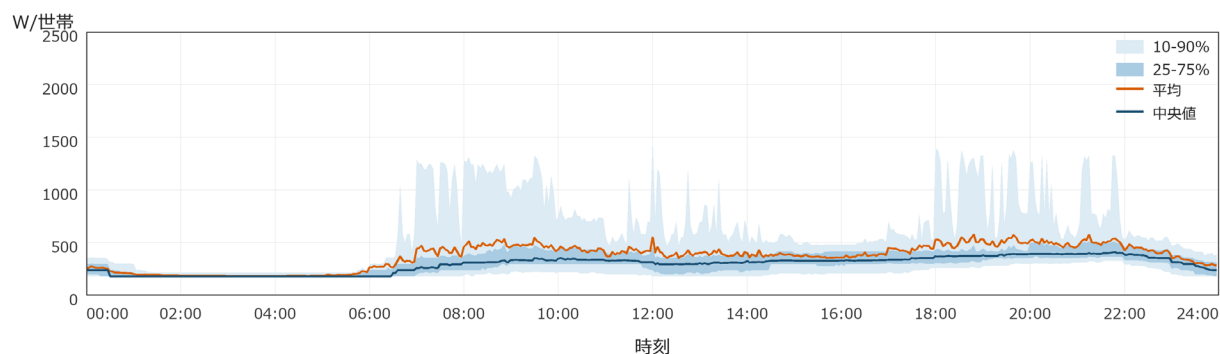


図4 夫婦と子供2人世帯における500世帯負荷分布（平日春秋）

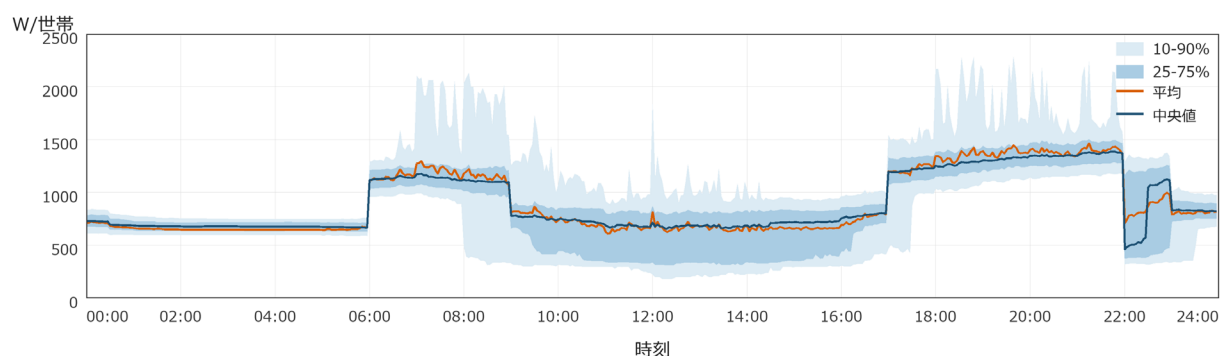


図5 夫婦と子供2人世帯における500世帯負荷分布（平日冬）

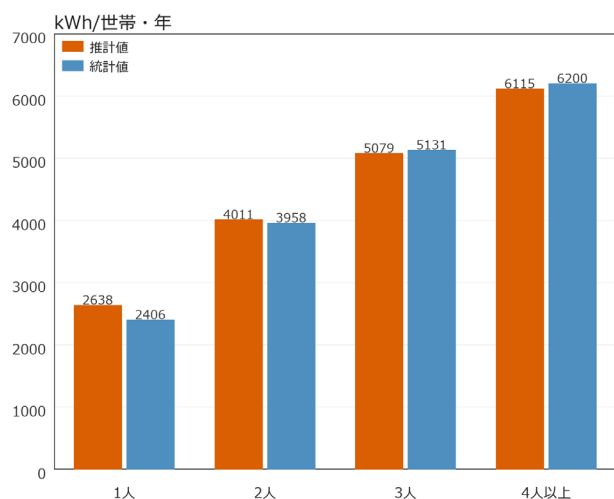


図6 世帯人数別年間消費電力量：推計値と統計値の比較

昇し、朝食や家事、テレビ等の行動が重なる時間帯では上位分位が大きく広がる。夕方から夜間にかけても平均負荷と分位幅が増加しており、帰宅後の在宅行動と照明・調理関連負荷が重なることを反映している。

図5は冬条件の結果であり、暖房負荷を加えた場合を示す。冬条件では、早朝および夕方から夜間にかけて平均値と中央値が春秋条件より大きく上昇し、特に暖房使用が重

なる時間帯で10-90%範囲が広がる。このことから、同じ夫婦と子供2人世帯であっても、在宅人数、睡眠・外出時刻、暖房使用時間の違いにより、冬季の負荷ばらつきが春秋より大きくなることが分かる。

6. 結論

本論文では、生活時間統計に基づくマルコフ連鎖手法による日程生成モデルと、家電負荷モデルを統合し、家庭電力負荷曲線を推計した。3分刻みの個人日程から家電使用を発生させ、14種類の世帯類型について500世帯平均の負荷曲線と年間電力量を算出した。

一方、炊事・掃除・洗濯の内訳、インターネット行動におけるPCとスマートフォンの比率、食事時の電子レンジ・電気ケトル使用確率などは、現時点ではルールベースの設定である。追加調査と実測スマートメータデータによる時系列検証を行い、PV、蓄電池、料金メニュー、契約型HEMSを含む運用・設備導入モデルへ拡張することが今後の研究課題である。

参考文献

- 1) Ali Raza, Li Jingzhao, Yazeed Ghadi, Muhammad Adnan, Mansoor Ali; Smart home energy management systems: Research challenges and survey, Alexandria Engineering Journal, 92 (2024), pp.117–170.
- 2) Yinyan Liu, Jin Ma, Xinjie Xing, Xinglu Liu, Wei Wang; A home energy management system incorporating data-driven uncertainty-aware user preference, Applied Energy, 326 (2022), 119911.
- 3) Michael Blonsky, Killian McKenna, Jeff Maguire, Tyrone Vincent; Home energy management under realistic and uncertain conditions: A comparison of heuristic, deterministic, and stochastic control methods, Applied Energy, 325 (2022), 119770.
- 4) Arnaud Grandjean, Jérôme Adnot, Guillaume Binet; A review and an analysis of the residential electric load curve models, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16-9 (2012), pp.6539-6565.
- 5) A. Capasso, W. Grattieri, R. Lamedica, A. Prudenzi; A bottom-up approach to residential load modeling, IEEE Transactions on Power Systems, 9-2 (1994), pp.957-964.
- 6) J. V. Paatero, P. D. Lund; A model for generating household electricity load profiles, International Journal of Energy Research, 30-5 (2006), pp.273-290.
- 7) Ian Richardson, Murray Thomson, David Infield, Conor Clifford; Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model, Energy and Buildings, 42-10 (2010), pp.1878-1887.
- 8) Joakim Widén, Ewa Wäckelgård; A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand, Applied Energy, 87-6 (2010), pp.1880-1892.
- 9) David Fischer, Andreas Härtl, Bernhard Wille-Haussmann; Model for electric load profiles with high time resolution for German households, Energy and Buildings, 92 (2015), pp.170-179.
- 10) Takeshi Okada, Yuto Shoda, Tatsuya Imai, Yohei Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda; Demographic-enhanced Stochastic Model of Household Occupants' Activity, Journal of Japan Society of Energy and Resources, 42-6 (2021), pp.403-412.
- 11) NHK 放送文化研究所; 国民生活時間調査, <https://www.nhk.or.jp/bunken/yoron-jikan/> (アクセス日 2026.6.7) .
- 12) 内閣府; 消費動向調査, https://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/shouhi/menu_shouhi.html (アクセス日 2026.6.7) .
- 13) 気象庁; 過去の気象データ, <https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html> (アクセス日 2026.6.7) .
- 14) 環境省; 家庭部門 CO2 排出実態統計調査, <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html> (アクセス日 2026.6.7) .
- 15) 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 論文集, ceis27:97-102, 2013