

修士論文

時間分割クラスタリングを用いた
太陽光発電・業務用ヒートポンプ機器
を利用した受電点電力調整手法の検討

令和4年1月27日提出

指導教員 馬場 旬平 教授

東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻

学籍番号 37-206539

毛 致森

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	4
1.3	研究の構成	5
第 2 章	可制御需要家機器としてのヒートポンプ機器	6
2.1	可制御需要家機器	6
2.2	ヒートポンプ機器の原理	7
2.3	ヒートポンプ給湯機	9
2.4	本章のまとめ	11
第 3 章	検討対象のシステム	12
3.1	システムの概要	12
3.2	ヒートポンプ給湯機のモデル	12
3.3	太陽光発電のモデル	14
3.4	本章のまとめ	15
第 4 章	給湯需要分析	16
4.1	太陽光発電の出力とヒートポンプ給湯機の給湯需要の時間特性	16
4.2	時間分割クラスタリング	16
4.3	クラスタリングにより給湯需要の予測	23
4.4	本章のまとめ	29
第 5 章	受電点電力調整手法	30
5.1	ヒートポンプ給湯機の運転計画の最適化	30
5.2	湯切れ対策	33
5.3	シミュレーション	37
5.4	天気急変によるヒートポンプ給湯機の運転計画の再計画の検討	41
5.5	本章のまとめ	47
第 6 章	結論	48
6.1	本研究の成果	48
6.2	今後の課題	49
付録 A	天気急変における異なるヒートポンプ給湯機の運転の運転計画による受電点変動の比較	53

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、気候変動問題や地球温暖化を巡る議論では、脱炭素化が主流となり、現在では世界共通の目標となっている。それとともに、風力発電 (Wind Turbine : WT) や太陽光発電 (Photovoltaic : PV) などの再生可能エネルギーは発電コストが低減し、電力系統への導入が急速に進んでいる。日本では、2012年に固定価格買取制度 (Feed-in Tariff : FIT) の導入により、再生可能エネルギーの導入が着実に進展している。特に、PVは比較的設置しやすいという特徴などにより、再生可能エネルギーを利用した発電設備の中でも、突出して導入が進んでいる。図 1.1 は日本で FIT の実施により PV の導入量と 2030 年までの導入推計を示す。

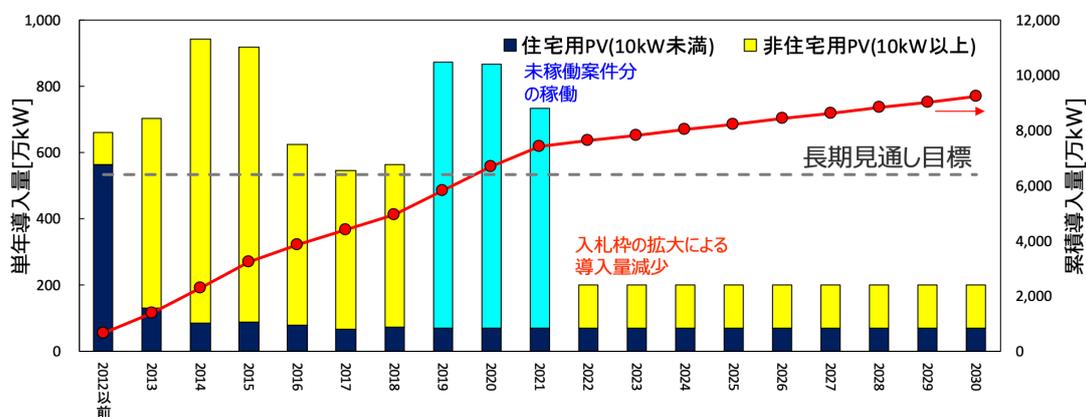


図 1.1: PV の導入量と今後の導入推計 [1]

2021年には、日本政府により2050年カーボンニュートラル目標と2030年の温室効果ガス排出削減目標が発表され、今後再生可能エネルギーの更なる導入が予測されている。文献 [2] によると、2030年度の温室効果ガス46%削減に向けては、PVの導入量を103GW以上に増加させる必要があると予想される。

日本では、エネルギーの安定供給 (Energy Security)、経済効率性 (Economic Efficiency)、環境への適合 (Environment)、安全性 (Safety) 「S+3E」というエネルギー政策の原則があり、再生可能エネルギーの主力電源化が進められている一方、その原則に対して大きな懸念が生じつつある。電力系統の安定性を確保するためには、電力の需要と供給とのバランスを常に維持し、周波数を一定範囲内に保つ必要がある。WTやPVなどの出力変動再生可能エネルギーは日射量、風速、気温などの気象条件により発電の出力が変動してしまうため、周波数変動や電圧変動などの事態が発生する恐れがある。加えて、今までの電力系統は火力発電を主な調整力として、需給バランスを維持してきたが、今後再生可能エネルギーの増加とともに、火力発電の稼働率が低下し、調達できる調整力が不足する事態が想定される。そのため、火力発電を代替する新たな調整力を確保する必要がある。

分散型エネルギー源 (DER : Distributed Energy Resources) の普及拡大とモノのインターネット (IoT : Internet of Things) による統合制御技術の発展により、需要家側の蓄電池 (BESS : Battery Energy Storage Systems)、電気自動車 (EV : Electric Vehicles)、ヒートポンプ給湯機 (HPWH : Heat Pump Water Heaters) などの応答性と制御性が優れる DER をアグリゲートし、制御するこ

とで、いわゆるデマンドレスポンス (DR : Demand Response) やバーチャルパワープラント (VPP : Virtual Power Plants) などの新技術は調整力として期待されている。

図 1.2 には VPP と DR の関係を示す [3]。VPP は DER の保有者もしくはアグリゲータなどの第三者が DER を制御することで発電所と同機能を提供する技術であり、DR は需要家側の可制御負荷もしくは発電、蓄電設備を制御することで、電力需要を調整する技術である。

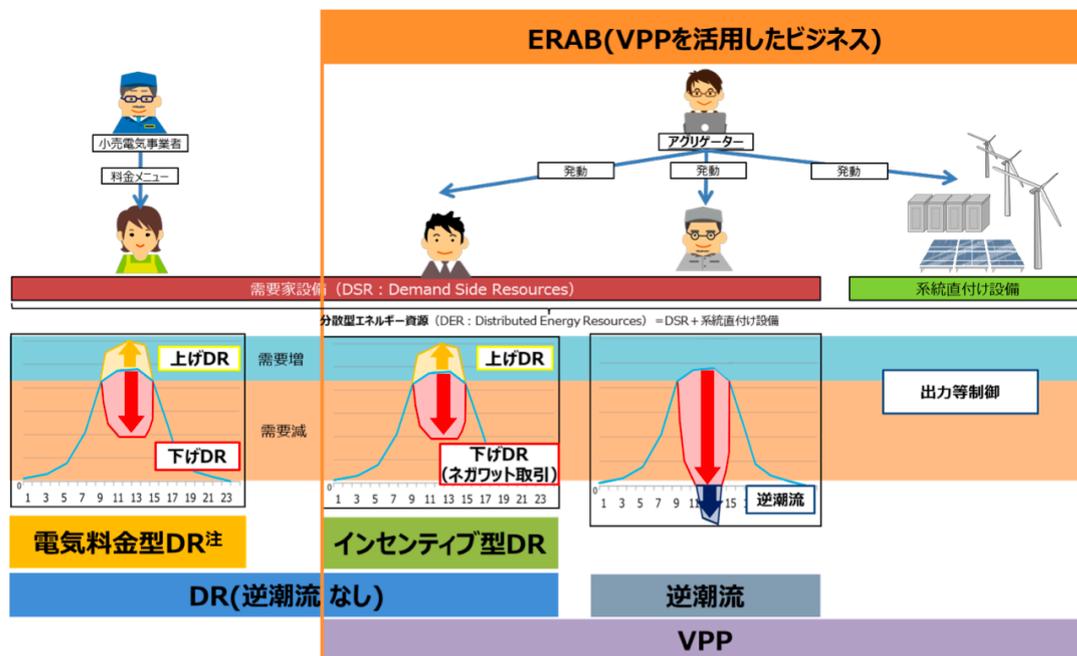


図 1.2: VPP と DR の関係

VPP の実証例として、オーストラリアの再生可能エネルギー機関 ARENA と電力会社 Simply Energy による VPPx というプロジェクトが挙げられる [4]。VPPx においては、Simply Energy は南オーストラリアにある 1200 戸以上の需要家と契約し、需要家が所有した BESS をアグリゲートすることで、その地域の電力系統に 6.5MW 以上の調整力を提供できると予想される。実証においては、BESS 群が周波数変動に対してどのような効果を与えるのか、また電力会社と需要家に対して電力市場に参入した後どの程度の価値があるのかに関して検討された。周波数変動への効果を検証するために、系統周波数のデッドバンドを 49.99~50.01Hz に設定し、実証を行った。図 1.3 に示すように、周波数 (赤い線) が 49.99Hz より低くなった場合に、BESS 群に必要な放電電力 (灰色の線) が系統側に計算され、BESS 群 (黄色の線) が速やかに放電し始めた。周波数が 50.01Hz より高くなった場合に、BESS 群は系統からの計算結果に応じて蓄電を始めた。結果として、BESS 群の周波数変動への効果が確認された。

需要家可制御機器を活用した DR を調整力として利用するプロジェクトも世界中に検討されている。需要家可制御機器を活用した DR は以前ではピークシフトにおいて利用され、図 1.4 の②と③のように可制御負荷の使用時間を電力の使用量が多い時間帯から電力を比較的少ない夜間などの時間帯にシフトすることで、最大電力需要を削減する。現在では、通信技術の発展とともにリアルタイム制御が可能となるため、図 1.4 の①のように需給バランス調整などのアンシラリーサービスや PV の大量導入によるダックカーブの対策としても応用されている。

カリフォルニア州の DR ポテンシャルを評価するレポート [6] では、"Shimmy" DR (ファスト DR) が下記の二種類の調整力としてのポテンシャルについて評価された。

- Load Following: 制御信号が 5 分おきで更新
- Regulation: 制御信号が 4 秒おきで更新

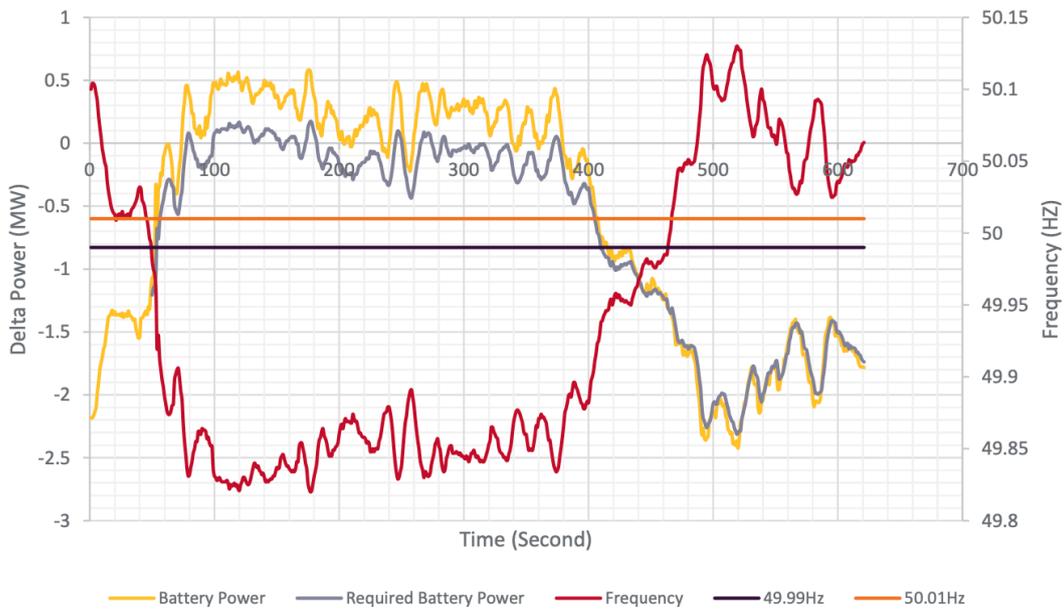


図 1.3: VPPx における周波数変動に対する効果の実証

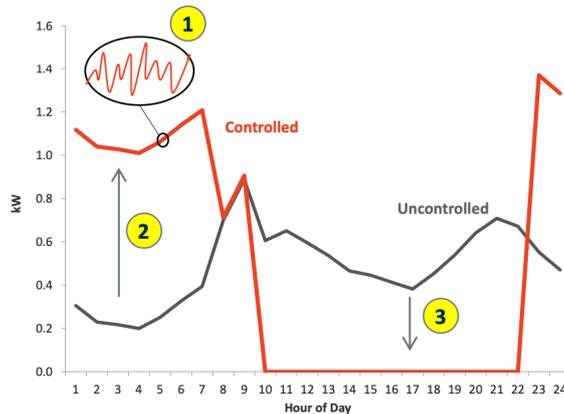


図 1.4: 可制御負荷を活用した DR[5]

図 1.5 によると、“Shimmy”DR の可制御負荷はこうした二種類の調整力として系統に導入した場合、元々これらの調整力を負担していた BESS を、昼間における PV の出力抑制緩和するのに利用することができる。また、このレポートによると、2025 年まで、合計 1200MW の DR の調整力が調達でき、カリフォルニア州独立系統運用機関 (CAISO : California Independent System Operator) に 4 億ドル以上の利益をもたらすことができると予想される。

VPP や DR が電力市場に参入しやすい環境を構築するため諸外国が多くの促進策を講じている。従来、提供できる容量が少ない需要家が電力市場に参加するのは難しいが、イギリスやドイツなどの欧米諸国は最小入札単位を下げることで、小規模な電源でも市場に参入できるようにした [7]。また、各 DR プログラムは応用されるシチュエーションが異なることにより、異なる情報通信プロトコルや情報セキュリティ要件を備えているそのため、DR を連携することが非常に難しい。アメリカでは Open ADR(Open Automated Demand Response) という規格が策定され、電力会社や ISO と需要家の間の通信モデル・通信プロトコルが規定されている [8]。DR 抑制量・時間、電力価格、メーター情報など様々な情報が Open ADR を通じて、交換可能となる。結果として、より多くの DR の連携が可能となり、DR の電力市場への参入を大きく推進した。

日本では、VPP、DR の事業者や新電力等の市場参加拡大にあたり、より安定的な電力を供給し、より効率的に調整力を調達し、また調整力コストを低減するため、2021 年 4 月から需給調整

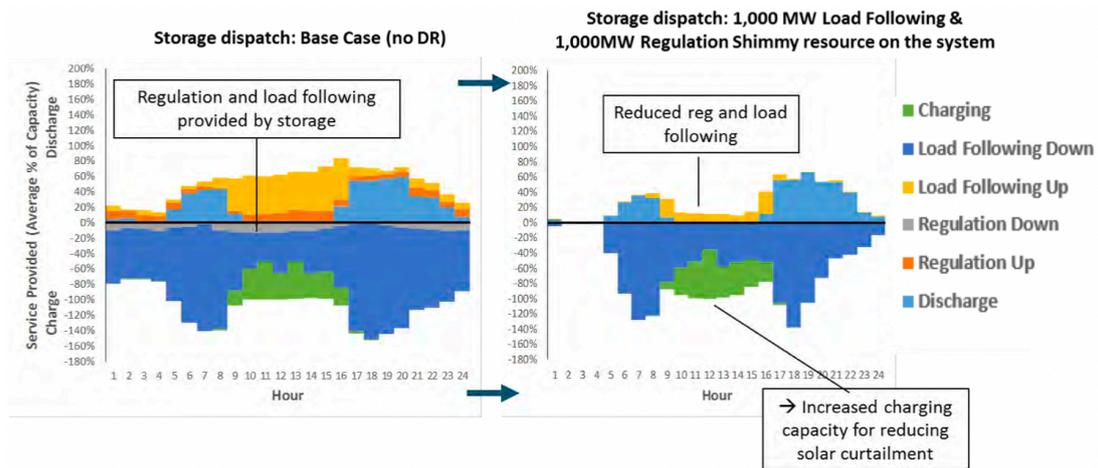


図 1.5: Shimmy DR なしとありの場合の BESS の利用率

市場が開設された。需給調整市場での取引は図 1.6 に示される。三次調整力②は既に運用開始となり、他の調整力は 2022 年から順次に運用開始する予定である。また、需要家側の PV の余剰電力や BESS による逆潮流をアグリゲーターすることで調整力としての活用について ERAB 検討会において検討されている [9]。逆潮流アグリゲーションを調整力として活用するためには、事前に各需要家の提供できる逆潮流電力、すなわち受電点電力の基準値を予測する必要がある。しかし、気象条件に影響されやすい PV や需要家側の実際の操作等により、精度良く基準値を予測するのは困難となる。そのため、いかに需要家側の需要を調整することで受電点電力の変動幅を小さくし、安定な逆潮流電力を提供できるのは大変重要である。

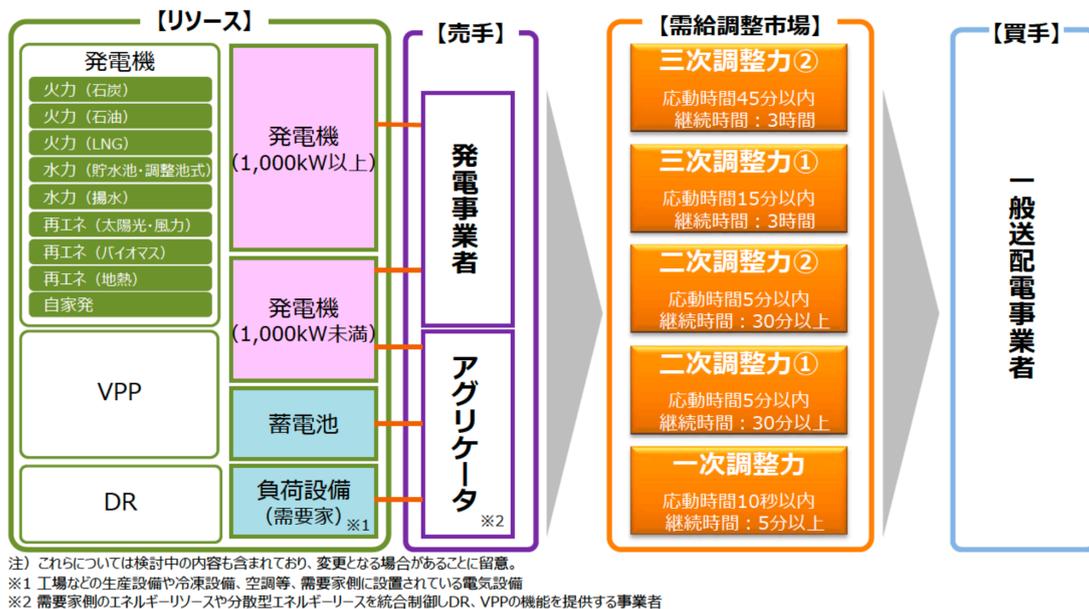


図 1.6: 需給調整市場での取引

1.2 研究の目的

本研究では、PV と HPWH を備えている一つの需要家を検討対象とし、HPWH の消費電力を制御することで、受電点電力変動を小さくする調整手法について検討する。給湯需要のデータがある業務用 HPWH を一例として、適切な HPWH の運用方法について検討する。PV の出力が主に昼に発生し、夜間になると出力がなくなる。一方、多くの需要家は給湯需要が夕刻から夜間に発

生するときが多いため、PV の出力と HPWH の給湯需要は時間的に一致しない場合が多い。本検討では、太陽光を最大限に利用するため、給湯需要の時間特性と HPWH の運転の割り付けを行うことを考慮し、時間分割給湯需要解析を行う。また、先行研究 [10] [11] では、HPWH を PV に合わせて運転することで、PV の出力変動を緩和する手法を検討したが、実際の PV の出力を考慮しないため、提案された手法が PV の出力変動に対してどの程度有効なのかを確認できなかった。本研究では、実際の PV の出力変動と前述した時間分割給湯解析の結果等を制約条件とし、最適化することで、HPWH の運転計画を決定し、PV の出力変動による受電で電力変動を有効に抑制できるかを検討する。また、天気急変による PV の出力予測が外れが発生した場合、HPWH の運転計画の再計画について検討する。

1.3 研究の構成

本論文の構成は図 1.7 に示される構成となっている。

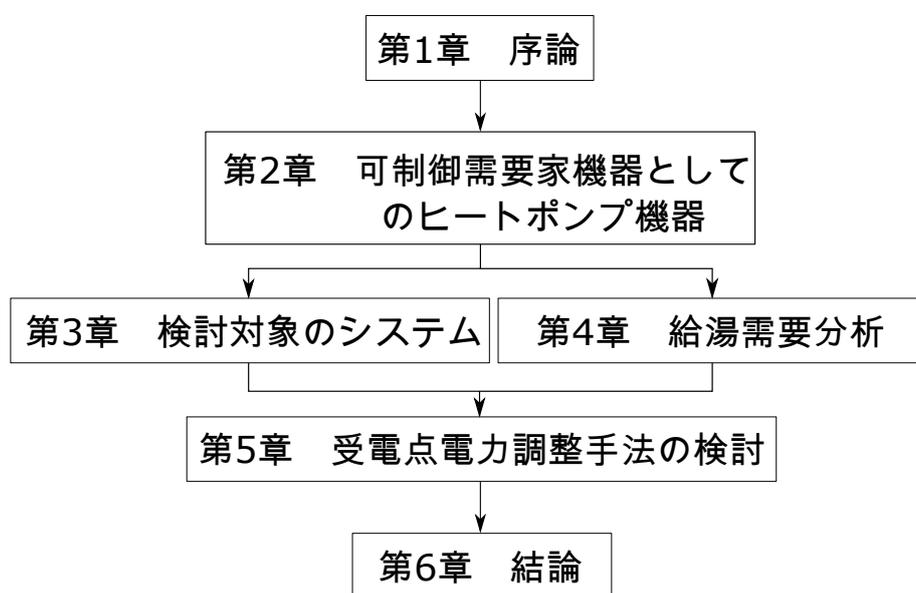


図 1.7: 本論文の流れ

まず「第1章 序論」では PV の普及状況と調整力不足という現状を述べ、DR や VPP などの新技術についての近年の実証事例と電力市場の参入を挙げ、本研究の目的を述べる。「第2章 可制御需要家機器としてのヒートポンプ機器」代表的な可制御需要家機器の現状と研究動向を整理し、ヒートポンプ機器の原理を述べ、本研究で使用された業務用 HPWH の有用性について論じる。「第3章 検討対象のシステム」では検討対象のシステムの構成を述べ、先行研究による業務用 HPWH のモデルと本研究の PV のモデルを説明する。「第4章 給湯需要分析」では業務用 HPWH の運転計画を策定するために必要となる給湯需要を予測するため、対象の給湯需要の解析を行う。「第5章 受電点電力調整手法」では、受電点電力変動を抑制するため、第3章のモデルと第4章の解析結果を用いて、業務用 HPWH が PV の出力と合せるような運転計画の最適化を行い、天気急変による HPWH の運転計画の再計画についても検討する。最後に「第6章 結論」にて、本論文を総括する。

第2章 可制御需要家機器としてのヒートポンプ機器

本章では、代表的な可制御需要家機器について説明する。その上、本研究で扱うヒートポンプ機器の原理を述べ、HPWHの調整力としての有用性について検討する。

2.1 可制御需要家機器

前章に述べたように、電力系統のICT化とDERの普及が進めている中、需要家可制御機器を活用したDRは調整力として期待されている。しかしながら、調整力として利用するためには、可制御機器は以下の三つの条件を備える必要がある。

- 電力変動をカバーできる機器容量があること
- 系統運用者またアグリゲータの指令に十分な応答速度があること
- 可制御機器を所用した需要家の利便性を損なわないこと

HVAC、EV、HPWHという三つの可制御機器は以上の条件を満たす例として挙げられる。様々なシチュエーションに合わせて、需要家可制御機器を制御するという類の研究は多く行っている。

- 暖房、換気、及び空調 (HVAC : Heating, Ventilation, and Air Conditioning)
多くの国ではHVACのエネルギー消費量はエネルギー消費量の40%以上に占める。近年、最適制御などの性能の導入により、省エネの効果は大幅に上がり、高精度な制御も可能となる。そのため、文献[12]、HVACを可制御機器としてBESSと合わせて最適運転について検討され、文献[13]ではHVACが群制御DRとしての効果が評価され、このようなDRにおけるHVACに関する研究は多く行われた。図2.1に示したように、日本でもは冷房と暖房を合わせて27%となるということから、HVACの割合は相当高いと推計できる。しかし、HVACの制御は需要家利便性に繋がり、また蓄電池あるいはHPWHのようにエネルギーを貯蔵装置がないため、制御可能な時間帯が限られており、フレキシビリティに欠けるという課題がある。
- EV
日本は国内において乗用車の新車販売に占めるEVの割合を20~30%までに拡大することを目指している[14]。また、EVに搭載された蓄電池の容量増加により、近年BESSのように電力の調整役として期待される。車載蓄電池を活用し、電力系統に繋がることで、必要な時に電力を供給するという技術であるV2Gは世界中に実証されている。文献[15]では、EVの車載蓄電池がDRにおけるポテンシャルについて検討され、文献[16]では、マイクログリッドにおける需給バランスの維持するため、ゲーム理論を利用するEVとBESSの運転を最適化する手法が提案された。しかし、EVは移動手段でもあり、昼間に場所が変わる時が多いため、PVの余剰電力を活用することと安定な調整力の提供することが非常に難しいとされる。
- HPWH
HPWHはHVACと同じヒートポンプ機器であり、本研究で検討される可制御機器である。

2.1 に示すように、給湯の割合は 28.8%であるため、今後 HPWH の普及とともに、大きな機器容量を提供することできると予想される。エネルギー貯蔵装置として、同じ容量の場合では、BESS よりコストが少ないことも HPWH のメリットである。ヒートポンプ機器はと HPWH の詳細は次節から述べる。

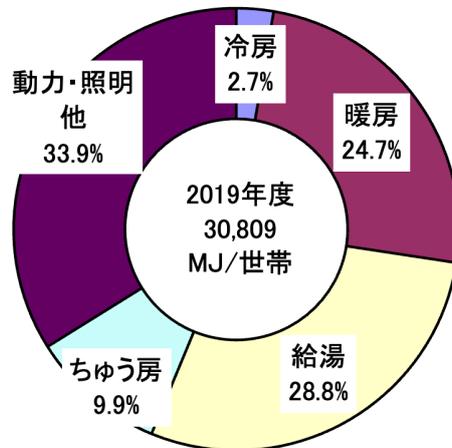


図 2.1: 日本の世帯当たりのエネルギー消費原単位 [17]

これらの可制御機器、BESS、PV など BTM (Behind-the-meter) の DER を統合することで、監視、予測また制御を行うシステムとして、分散型エネルギー資源管理システム (DERMS : Distributed Energy Resources Management System) はアメリカを中心に開発されている。図 2.2 に、DERMS の構成が示される (DMS: Distribution Management System)。文献 [18] では、DERMS は需要家に対して BESS の使用の抑制、更なる経済的なインセンティブなどのメリットを提供できると示した。文献 [19] と [20] では、系統側に対して DERMS で受電点電圧上昇の問題の改善と配電系統における DER 導入可能容量の増大について検討された。

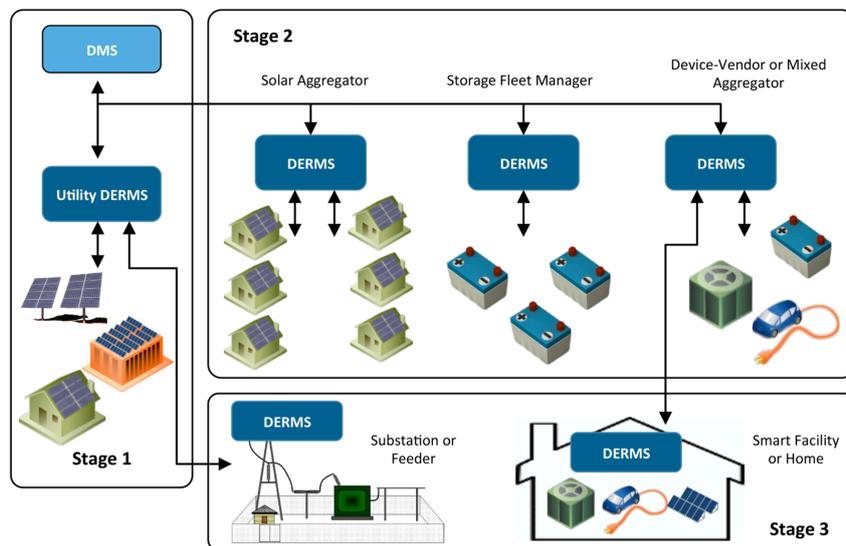


図 2.2: DERMS の構成 [21]

2.2 ヒートポンプ機器の原理

省エネと脱炭素化の観念により、ヒートポンプ技術は一次エネルギー消費量の削減、CO₂ 排出の削減を達成するための重要な技術と認識されている。日本では、ヒートポンプの導入を推進す

るため、ヒートポンプの新設や増設に対して政策的な支援を行っている。経産省の令和2年度第3次補正予算の事業概要において、産業・業務部門における高効率ヒートポンプ導入促進事の予算額は46.5億円となる[22]。今後ヒートポンプ機器の更なる導入が予想される。

図2.3に示すように、ヒートポンプは圧縮機、蒸発器、凝縮器、膨張弁の四つの基本機器により構成され、低い温度でも蒸発可能となる冷媒の熱力学サイクルを利用し、空気中の熱を集めて運ぶシステムである。図2.4には、ヒートポンプにおける冷媒であるCO₂変化のP-h線図を示す。蒸発、圧縮、凝縮、膨張という四つの過程により冷媒の一連のサイクルを完成する。

- 過程1（蒸発）：冷媒は蒸発器で空気や水から吸熱し、低温低圧のまま、気液混合状態から気体状態に変化する
- 過程2（圧縮）：冷媒は圧縮機で圧縮され、高温高压の気体状態に変化する
- 過程3（凝縮）：冷媒は凝縮器で凝縮され、外部へ放熱し、高压の液体状態に変化する
- 過程4（膨張）：冷媒は膨張弁で減圧され、低温低圧の気液混合状態に戻る

ヒートポンプは外部から熱を利用するため、ほとんど圧縮過程で消費された電力量以上の熱量を生成することが可能となる。ヒートポンプの冷媒サイクルには放熱・吸熱両方があるため、冷熱源や温熱源として、利用されることができる。単位消費電力当たりの加熱・冷却能力は成績係数(COP: Coefficient of Performance)で評価する。図2.4に示すように、圧縮機に消費された電力を Q_1 とし、蒸発において吸収した熱量を Q_2 とし、凝縮において放出した熱量を Q_3 (Q_1+Q_2)とする。冷熱源と温熱源のCOPは式(2.1)と式(2.2)で表す。

$$COP = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2.1)$$

$$COP = \frac{Q_3}{Q_1} \quad (2.2)$$

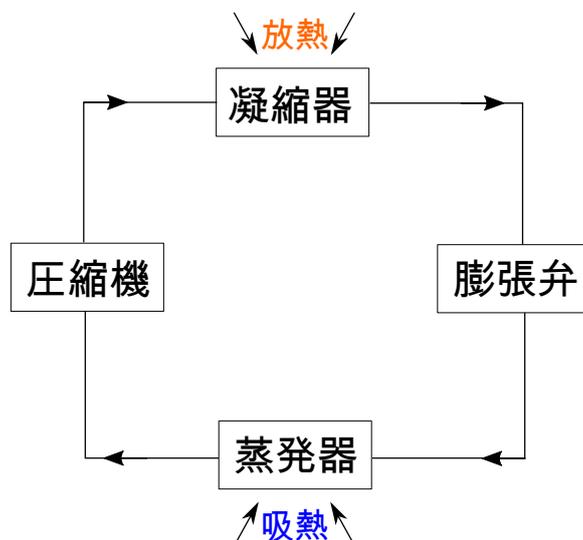


図 2.3: ヒートポンプの構成

COPは大きいほど省エネ効果は大きくなる。文献[23]により、受電端効率が異なるため、欧州ではCOPが1.7以上で省エネとなり、日本では2.4以上で省エネとなる。また、ヒートポンプは外部から吸熱するため、外気温によりCOPが大きく変動してしまう。そこでその代わりとして、通年エネルギー消費効率(APF: Annual Performance Factor)が用いられている。ヒートポンプの通年の消費電力量を P_{annual} とし、通年の吸収・放出熱量を Q_{annual} とした場合、APFは式(2.3)

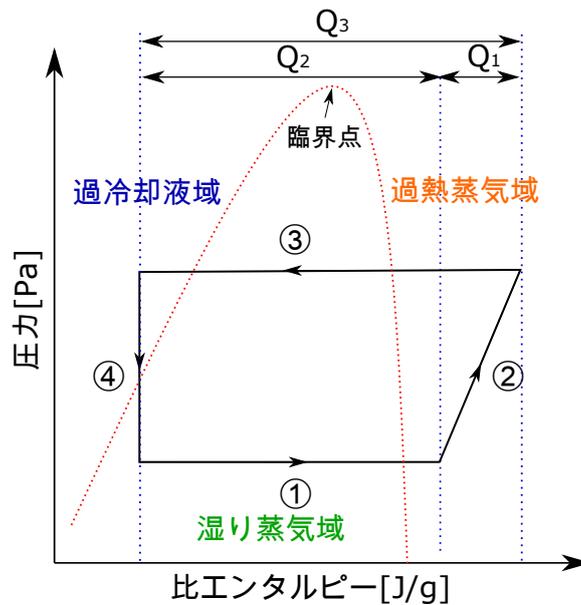


図 2.4: ヒートポンプの P-h 線図

に示す。近年、業務用 HPWH の中間期 COP は 4.5 までとなり、家庭用エアコンの COP は 8.0 以上に伸ばした [24]。

$$APF = \frac{Q_{annual}}{P_{annual}} \quad (2.3)$$

2.3 ヒートポンプ給湯機

HPWH の構成は図 2.5 に示すように、前節に紹介されたヒートポンプユニットと貯湯ユニットより構成される。ヒートポンプユニット内で冷媒を圧縮加熱することで沸かしたお湯を貯湯タンクに貯めておき、必要となる際に、水と混ぜ合わせて任意な温度で給湯を行う。貯湯タンクを備えているのは、HPWH が開発された際に電力需要少なく、電気料金比較的安い夜時間帯に運転させることでピークシフト効果を想定されたためである。事前に生成されたお湯を貯湯槽に貯めることは、多少熱量の損失があるが、エネルギーを熱量の形で貯蔵できる。このような時間的なフレキシビリティがあるため、ピークシフト以外のアンシラリーサービスにも期待できる。

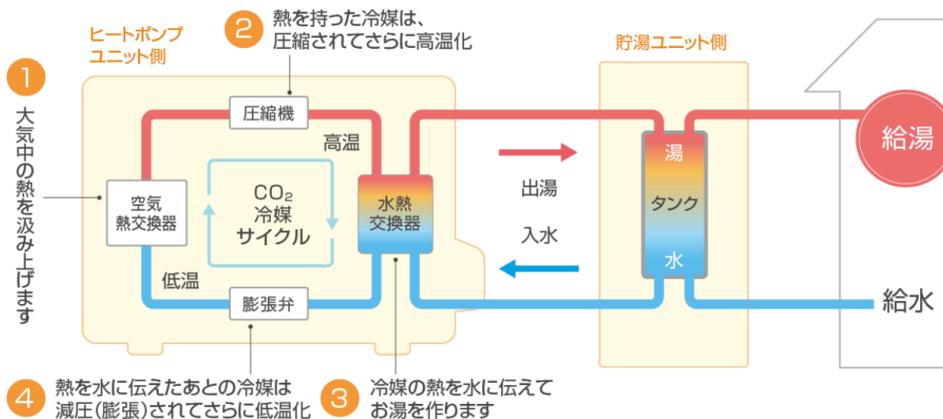


図 2.5: HPWH の構成 [25]

HPWHは2001年商品化されて以来、様々なシチュエーションを想定し、他種な製品が開発されており、大別すると、家庭用HPWHと業務用HPWHという二種類に分けられる。図2.6に家庭用の累積出荷台数と年別出荷台数を示し、図2.7に業務用の累積出荷台数と年別出荷台数が示されている。紫線、緑縦棒はそれぞれ累積出荷台数と年別出荷台数を意味する。家庭用HPWHは既に700万台を超え、業務用HPWHは5万台以上に伸びてきて、今後更なる普及を期待される。

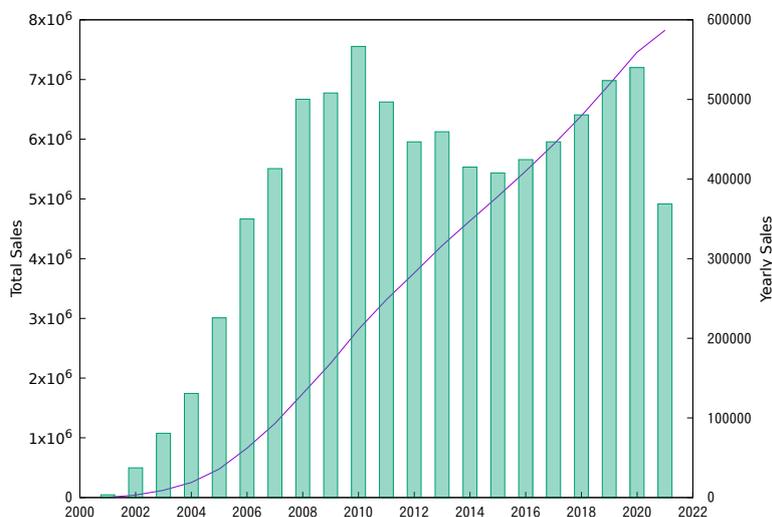


図 2.6: 家庭用 HPWH の累積出荷台数と年別出荷台数 [26]

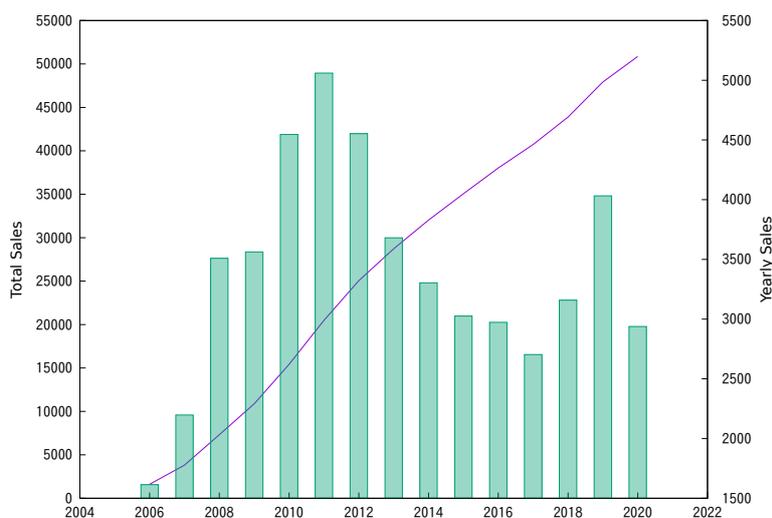


図 2.7: 業務用 HPWH の累積出荷台数と年別出荷台数 [26]

業務用HPWHは家庭用HPWHより給湯需要が多く、消費電力が多いため、アンシラリーサービスを行う際の電力系統へ貢献度が大きい。群制御の形で、最低入札量が要求された需給調整市場へ参入しやすいという利点も考えられる。また、業務用HPWHの給湯需要はランダム性が多い家庭用HPWHより予測しやすいため、本研究での検討対象を業務用HPWHとする。

また、同じエネルギーを提供できるBESSと比べ、コストがかなり低いのは一つの利点である。460Lの家庭用HPWHを例として、お湯を20°から70°まで加熱し、貯湯タンクが満タンになる際に、式(2.4)によると、26.7kWhの熱エネルギーを貯蔵することができる。文献[27]によると、現在日本での家庭用BESSの価格は工事費を除いて、14.0万円/kWh程度となる。そのため、26.7kWhのエネルギーを貯蔵できる家庭用BESSを備えるためには373.8万円が必要となる。また、460Lの家庭用HPWHの価格はメーカーにより、多くのが95万~110万円になるが[28][29][30]、実勢価格は20万~35万円になる。家庭用BESSのコストが家庭用HPWHより10倍以上になることが分

かる。

$$Q[\text{kWh}] = \frac{V \times (70 - 20) \times 1.0 \times 4.18}{3600} \quad (2.4)$$

文献 [31] に、業務用 HPWH で最大業務用の給湯需要の 60% 賄う場合、2025 年に総計約 1800MW、2030 年に総計約 4000MW、2050 年総計約 14000MW の機器容量を提供できることが示されている。需給調整市場の最低入札容量 10MW であるため、調整力として利用する可制御機器に十分な機器容量であることがわかる。

先行研究 [10] では、本研究で利用した HPWH に対して、起動指令や停止指令、運転モード切替指令を送信してからの無駄時間と応答特性について実機実験で測定された。起動指令と運転モード切替しれに対して、消費電力の応答の無駄時間は 63 秒と 187 秒である。対象 HPWH は省エネモードと最大負荷運転モードという二つのモードを備えており、省エネモードの消費電力の応答は 40 秒の一次遅れ、最大負荷運転モードは 228 秒の一次遅れで近似できる。二次調調整力と三次調整力どちらとして応答速度が十分であることがわかる。

HPWH は貯湯タンクを備えており、所用者がお湯を使用する際に十分なお湯がなく、湯切れが発生すると生成したお湯が貯湯タンクの容量上限を超えるようなことが起きなければ、需要家の利便性へ特に影響が出ないと言える。

業務用 HPWH は主に温泉施設などの場所に利用され、給湯需要が家庭用のと比べて規則性があるものの、カレンダーにより利用客数が変化するため、給湯需要もある程度の変化がある。PV も出力変動に対して HPWH はどの程度の消費電力を提供するのか、その給湯需要の把握は必要である。本研究では、業務用 HPWH を対象とし、先行研究 [10] で需要家の利便性を考慮し提案された給湯需要分析手法を改善することで、より精度良く給湯需要を予測し、さらにより有効な湯切れ対策を提案する。

2.4 本章のまとめ

本章では、まず代表的な需要家可制御機器の研究動向を整理し、調整力としての応用に関する課題について述べた。その後、ヒートポンプ機器の原理について述べた最後に、本研究の検討対象の HPWH の構成と普及状況を説明した上で、調整力としての有用性を検討した。

第3章 検討対象のシステム

3.1 システムの概要

本研究で検討対象は自家消費型 PV と業務用 HPWH を備えている一つの需要家となり、図 3.1 に示されているシステムである。業務用 HPWH は 2 台があり、制御対象として PV から発電した電力を消費する。PV の発電した電力は HPWH だけに消費されると仮定するため、余剰電力は全部逆潮流の形で受電点を通じ、電力系統に流れる。また、PV の出力が HPWH の消費電力に足りない場合、電力系統はその足りない分の電力を提供する。

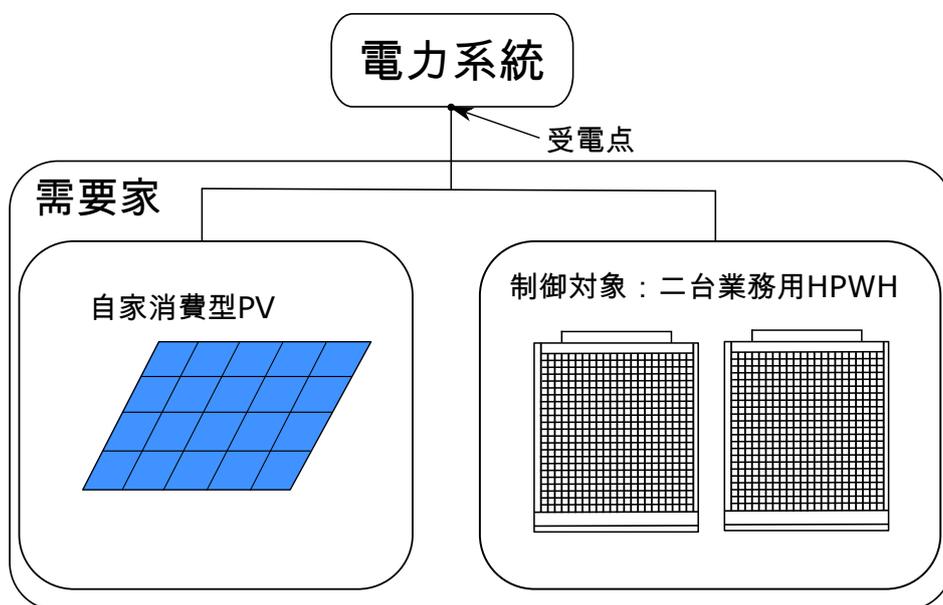


図 3.1: 検討対象のシステム図

3.2 ヒートポンプ給湯機のモデル

本研究で使用した業務用 HPWH のモデルは先行研究 [10] と [11] で取得されたものを利用する。二台の HPWH のモデルは同じと仮定する。本検討で使用した HPWH は省エネ運転モードと最大負荷運転モードという二つのモードがある。また、HPWH の運転の途中に二つのモードが互いに切り替えることが可能であるため、消費電力の制御が可能となる。二台の HPWH は合わせて運転することで、図 3.2 に示すように、停止を含め合計 6 パターンで制御可能となる。 P_{eco} と P_{max} はそれぞれ省エネ運転モードと最大負荷運転モードの消費電力を意味する。HPWH の消費電力及び加熱能力の定格カタログ値を表 3.1 に示す。

先行研究 [11] では、消費電力 P_{hpwh} と加熱能力 Q_{hpwh} は外気温 T_{amp} による一次近似で推定することが示された。省エネ運転モードにおいて、HPWH 内部の制御が異なるため、 P_{hpwh} と Q_{hpwh} は図 3.3 と図 3.4 に示されたように、 9°C で分けられ、折線の形と近い。そのため折線近似を行った。線形回帰式を式 (3.1)~(3.4) に示す。最大負荷運転モードにおける P_{hpwh} と Q_{hpwh} は図 3.5

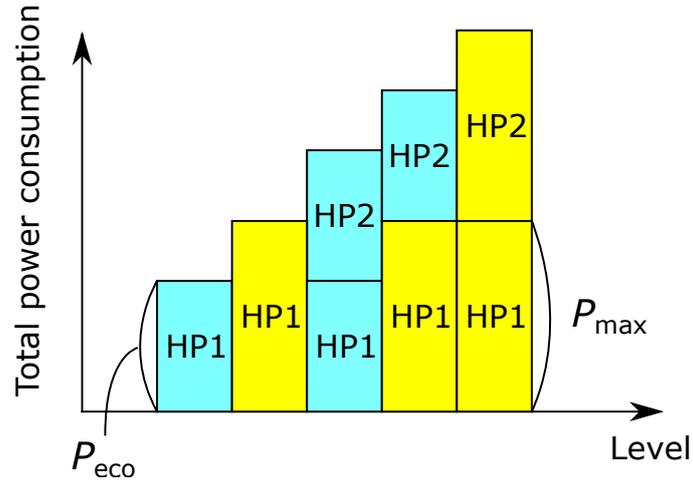


図 3.2: 二台の HPWH の消費電力の制御パターン

表 3.1: HPWH の定格カタログ値

		省エネ運転モード	最大負荷運転モード
定格消費電力 [kW]	中間期	9.43	16.0
	夏期	9.46	14.0
	冬期	10.6	16.2
定格加熱能力 [kW]	中間期	40.0	56.0
	夏期	40.0	51.9
	冬期	40.0	46.8

と図 3.6 のように線形回帰で推定可能となる。 P_{hpwh} と Q_{hpwh} の線形回帰式は式 (3.5) と (3.6) で表す。

$$P_{hpwh}[\text{kW}] = -0.652 \times T_{amp} + 1.60, T_{amp} < 9^{\circ}\text{C} \quad (3.1)$$

$$P_{hpwh}[\text{kW}] = -0.0708 \times T_{amp} + 1.08, T_{amp} \geq 9^{\circ}\text{C} \quad (3.2)$$

$$Q_{hpwh}[\text{kJ}] = -1.93 \times T_{amp} + 4.96, T_{amp} < 9^{\circ}\text{C} \quad (3.3)$$

$$Q_{hpwh}[\text{kJ}] = 0.314 \times T_{amp} + 2.94, T_{amp} \geq 9^{\circ}\text{C} \quad (3.4)$$

$$P_{hpwh}[\text{kW}] = -0.108 \times T_{amp} + 1.69 \quad (3.5)$$

$$Q_{hpwh}[\text{kJ}] = 0.472 \times T_{amp} + 4.50 \quad (3.6)$$

[10] に推定された HPWH の入口水温 T_{in} と外気温 T_{amp} の一次近似式は (3.7) で表す。なお、水の定圧比熱を $4.18\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、密度を 1.0 kg/L 、出口水温を 70°C とする場合、 Q_{hpwh} と生成湯量 V_{prod} の関係は式 (3.8) で表す。こうして、外気温と HPWH の運転モードだけが分かれば、消費電力と生成湯量を推定可能となった。本研究で用いた外気温データが [32] に示された月別の平均気温である。

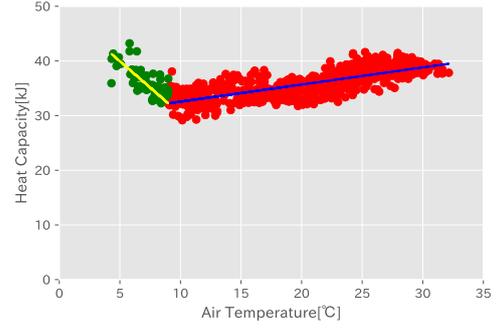
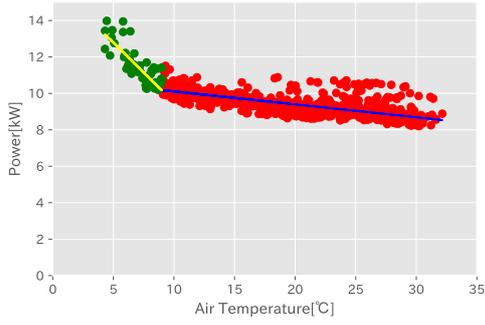


図 3.3: 省エネ運転モードの消費電力の定常特性 図 3.4: 省エネ運転モードの加熱能力の定常特性

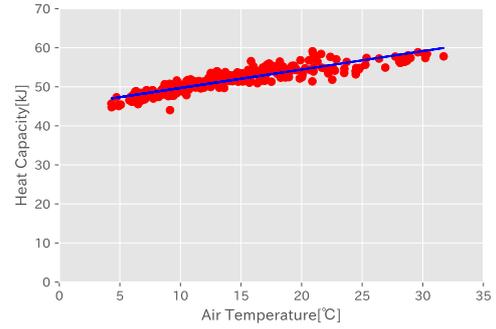
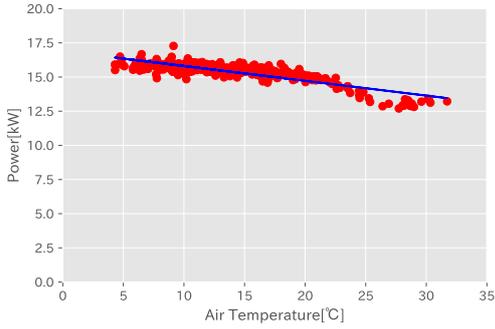


図 3.5: 最大負荷運転モードの消費電力の定常特性 図 3.6: 最大負荷運転モードの加熱能力の定常特性

$$T_{in} [^{\circ}\text{C}] = 0.222 \times T_{amb} + 1.48 \quad (3.7)$$

$$V_{prod} [\text{L}] = \frac{Q_{hpwh}}{(70 - T_{in}) \times 1.0 \times 4.18} \quad (3.8)$$

3.3 太陽光発電のモデル

受電点電力を計算するために PV の出力が必要となる。本研究で NEDO の日射量データベースによる日射量データ [33] に基づき、PV の出力電力 P_{pv} の計算を行った。式 (3.9) で日射量データは斜面へ入射する直達成分、天空散乱成分、地面反射成分を個々に計算し、それらを合成した斜面日射量であるため、式 (3.9) で PV 出力を計算することが可能になる。 R 、 P_{cap} 、 η はそれぞれ日射量、PV の発電容量、損失係数を意味する。

$$P_{pv} [\text{kW}] = R \times P_{cap} \times \eta \quad (3.9)$$

また、 P_{cap} 、 η を 20kW、0.85 としている。20kW は PV の一年の発電量が実際の HPWH の一年の消費電力量の 2 倍とした際に得られた値である。

NEDO の日射量データベースの年間時別日射量データベースでは日本国内 837 地点の 20 年間の日射量データを用いて各地点の平均年間日射量、多照年間日射量、寡照年間日射量を備えており、1 時間毎の方位角別、傾斜角別の日射量も推定可能となる。平均年間日射量は各地点における長期間の観測資料から月毎に最も平均的な年を抽出し、それらを 1 年間分つなぎ合わせた人工的なデータにより、スムージングされたものである。多照年間日射量と寡照年間日射量は月別に選定された日射量が多かった月と少なかった月を 1 年間分組み合わせたものである。本研究で使用

した HPWH の給湯需要データは新島にある温泉施設 [34] のもののため、新島の平均年間日射量データベースを元に計算を行った。

太陽光パネルの方位角と傾斜角は図 3.7 に示すように表す。太陽光パネルが受ける年間日射量を最大化するため、傾斜角を緯度に等しい角度で南向きにパネルを設定する必要がある。新島の緯度 34°N であるため、傾斜角を 30° とした。また、真南に設置するため、方位角を 0° とした。

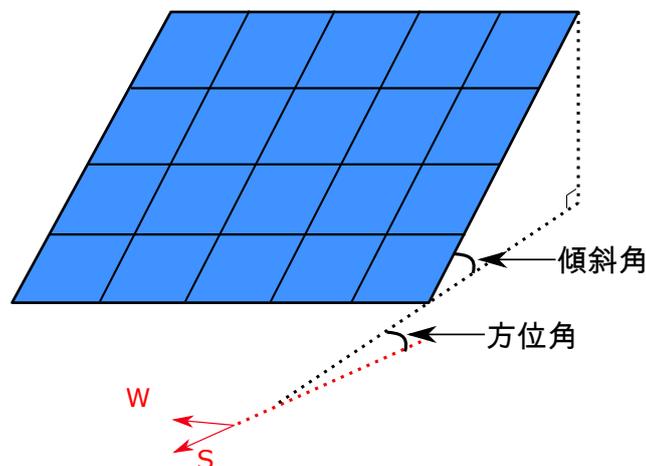


図 3.7: 太陽光パネルの方位角と傾斜角

3.4 本章のまとめ

本章では、まず、本研究の検討対象システムのシステムの構成について述べた。その後 HPWH の各モードの消費電力と加熱能力の外気温による一次近似式について述べた。また、生成湯量は加熱能力と水の定圧比熱により求められるため、外気温と HPWH の運転モードで、生成湯量と消費電力が推測可能となる。最後に、受電点電力の計算と HPWH の運転計画策定に必要な PV のモデルについて述べた。

第4章 給湯需要分析

PV の出力変動を補償し、受電点の電力を激しく変動させないため、HPWH をなるべく PV の出力と合わせて昼間に運転させ、夜に使う予定のお湯を昼間に生成させる。しかし、夜にお湯を使い切ってしまう場合、HPWH は追い焚きを行うため、受電点電力は大きく変動する。そのため、給湯需要を事前に予測することは大変重要である。本章では、先行研究 [10] の給湯需要分析手法を参考しつつ、PV の出力と HPWH の給湯需要が時間的に一致しないということを考慮し、新たな分析手法を提案する。また、その分析の結果をもとに、より精度良く予測できるタンク内累積湯量範囲を示す。

4.1 太陽光発電の出力とヒートポンプ給湯機の給湯需要の時間特性

図 4.1 は、本研究で使用した日射量データにより作成した PV の各時刻での平均出力の図である。PV の出力は天気の変化や雲の動きにより大きく変動するが、基本的に昼に最大となり、夜間になると、出力がなくなる。本研究で使用した HPWH は温泉施設に所有された業務用のものであるため、家庭用 HPWH と比べて、昼間の運転はかなり多くなる。図 4.2 は 2016 年から 2019 年まで合計 1231 日の HPWH の実データにより算出した、1 日 30 分おきの平均給湯需要である。対象 HPWH は、午前中から需要が発生し始め、15 時から顕著に増加する。給湯需要は朝から発生するが、主に 15 時以降に発生すると言える。

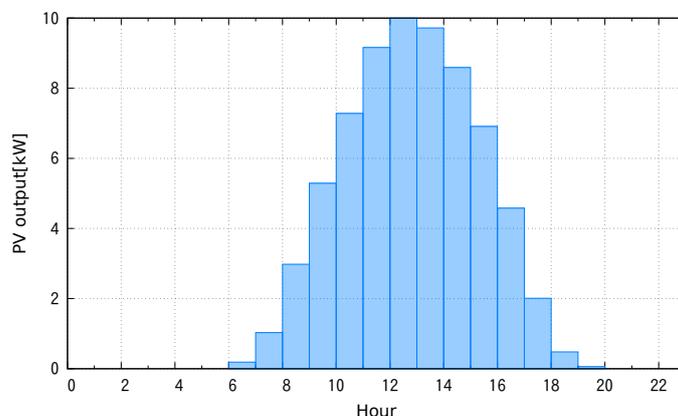


図 4.1: 一時間おきの PV の平均出力

4.2 時間分割クラスタリング

先行研究 [10] では、給湯需要を予測するため、k-means 法によるクラスタリングを行うことで、給湯需要の分類を定量的に行った。

k-means 法は、データの大きさで事前に指定したクラスター数にデータを分類するアルゴリズムであり、クラスターの平均値を用いてクラスター内のデータを調整するため、k 点平均法とも呼ばれる。k-means 法は下記のような手順を行う。

1. 最初に各データを何個のクラスターに割り振るのかを決める

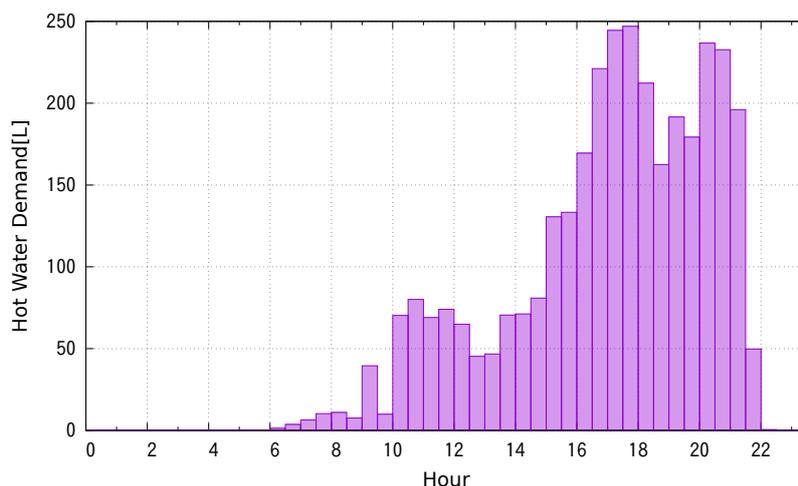


図 4.2: 30 分おきの平均給湯需要

2. 次に各クラスターにデータをランダムに割り振る
3. 各クラスターに割り当てられたデータについて平均値を計算し、クラスターの平均値とする
4. 各データについて上記で計算されたクラスターの平均値との距離を計算し、距離の一番近いクラスターに割り振り直す
5. 3 と 4 をクラスター内のデータが変化しなくなるまで繰り返す

1日の秒ごとの累積給湯需要の推移を式 (4.1) のようなベクトルで表示し、このベクトルを対象として、クラスタリングを行った。

$$V(date) = \left(V_{dem}(0) \quad V_{dem}(1) \quad \cdots \quad V_{dem}(86398) \quad V_{dem}(86399) \right) \quad (4.1)$$

クラスター内のデータのカレンダーとの関連性を調べることで、カレンダー情報から累積給湯需要の推移を事前に概ね予測可能となる。クラスター数を事前に決める必要があるため、先行研究 [11] では、Dunn Index(DI) を用い、クラスター数が2~8までの妥当性の評価を行った。DIは高い程良い指標であり、実際にクラスター数を増やすと、DIが殆ど変化しなかった。また、クラスター数が多くなると、データの分類が細かくなってしまい、クラスターごとのラベリングが困難になる。そのため、クラスター数が3~5個の結果から、クラスターの区別しやすい4個を選んで、1日当たりの給湯需要を施設定休日、平日、土日という4つのクラスターに分けた。

この手法においては秒ごとの累積給湯需要のベクトルでクラスタリングを行ったのは、各時点の給湯需要を十分把握する必要があるという考え方であったが、図 4.2 に示されたように、昼間の給湯需要はそこまで多くなく、HPWH を昼間にある程度運転させれば、湯切れが発生する確率はかなり低いと考えられる。なお、先行研究のクラスタリングの結果では、各時点の累積給湯需要の大きさより大きく影響される。夜間の給湯需要は同じだとしても、昼間の給湯需要の差により、その1日が属するクラスターが変わってしまう可能性がある。昼間の給湯需要が小さく夜間の給湯需要が多い日が、平均給湯需要が少ないクラスターに振り当てられた場合に、予測が外れることになり、夜間に湯切れが発生する恐れがある。例えば、図 4.3 は異なるクラスターに属する二日の1日の累積給湯需要のプロファイルである。青線の属するクラスターの平均値は赤線の日より大きい、1日の最終累積需要では、赤線の方が大きい。赤線の日は青線の日より開始時刻が早く、終了時刻が遅いが、10時~20時の累積給湯需要が少ないため、最終累積給湯需要が多くても、式 (4.1) のベクトルの大きさが小さくなる。精度良く予測できるクラスタリングの結果としては青線と赤線が同じクラスターに分類され、あるいは赤線の日の方は平均値が大きいクラスターに振り

当てられる。そのため、最も夜間に湯切れ発生するかどうかに関連する最終累積給湯需要を精度よく予測できない可能性がある。

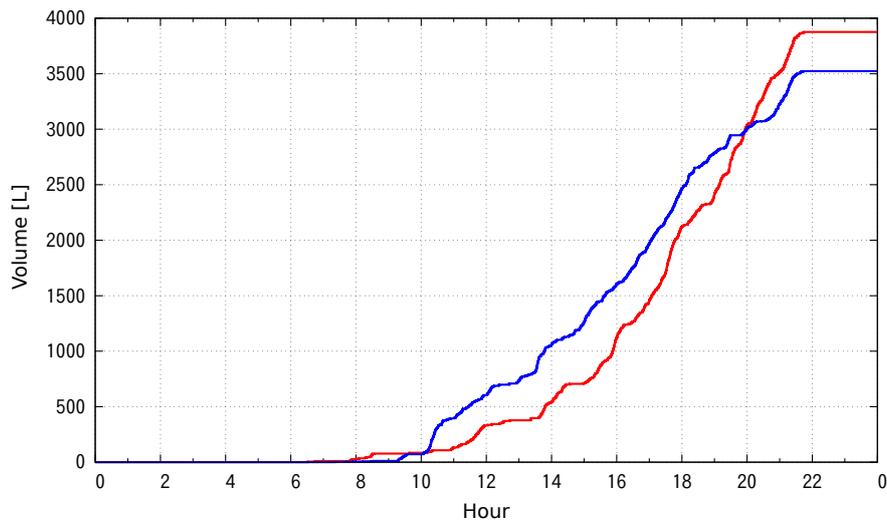


図 4.3: 異なるクラスターに属する二日の累積給湯需要

そのため、1日を給湯需要が多い時間帯と少ない時間帯に分け、それぞれ給湯需要を分析することは、給湯需要をより精度よく予測でき、湯切れを避けることができると考えられる。

前節に述べたように、給湯需要は15時から顕著に増加するため、分離時刻を15時とした。15時以前と15時以降という二つの時間帯の給湯需要に対して、それぞれ給湯需要分析を行った。手法は先行研究と同じくk-means法によるクラスタリングであるが、対象は先行研究のような秒ごとの累積給湯需要のベクトルではなく、各時間帯の最終累積給湯需要(00:00~14:59の累積給湯需要と15:00~23:59の累積給湯需要)とした。こうすることで、計算の時間を大幅に短縮でき、他の時点の給湯需要に影響されることがなく、より正確に各時間帯の累積給湯需要を分類できる。図4.3の比較として、図4.4は後述のクラスタリングの結果より作成した分布図である。二つの時間帯の累積給湯需要のデータをそれぞれ4つのクラスターに分類し、クラスターの平均値を大きい順にA₁、B₁、C₁、D₁とA₂、B₂、C₂、D₂とする。図4.4から、各クラスターに属するデータがはっきり分けられ、先行研究のように最終累積給湯需要の多い日が平均値が小さいクラスターに振り当てられたようなことがないことが分かった。

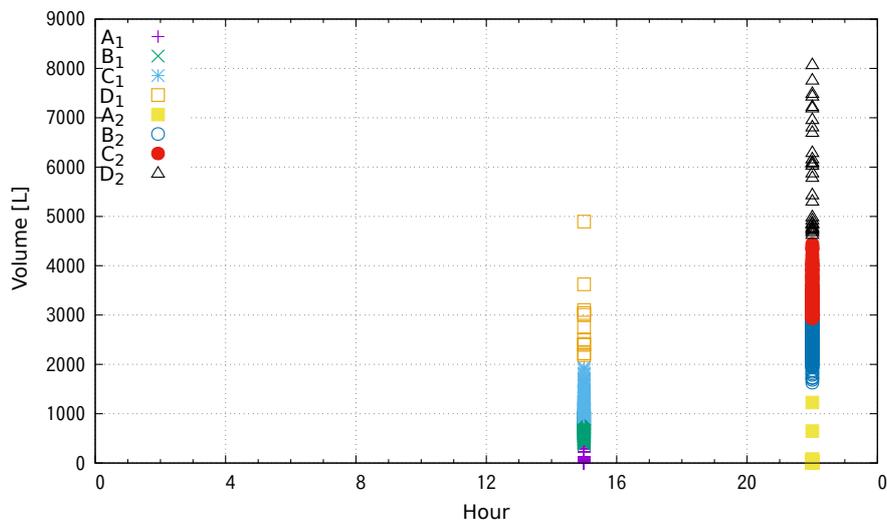


図 4.4: 後述のクラスタリングの結果における各クラスターの分布図

前述したように、k-means法はクラスター数が変われば、結果が大きく異なるため、まず最適

なクラスター数を決める必要がある。本研究におけるクラスタリングに使用されたデータは対象温泉施設の2016年、2018年、2019年合計871日の実際の給湯需要データとなる。クラスター数を変化させながら、15時以前と15時以降二つの時間帯をそれぞれクラスタリングし、クラスター数とクラスターの内偏差を調べた。内偏差は式(4.2)により計算する。 m 、 n_j 、 \bar{x}_j はそれぞれクラスター数、 j 番目のクラスター内のデータ数、 j 番目のクラスターの平均値を意味する。図4.5、図4.6に15時以前と15時以降の各クラスター数の場合の内偏差を示す。横軸はクラスター数、縦軸はクラスターの内偏差である。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{871} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} (x_i - \bar{x}_j)^2} \quad (4.2)$$

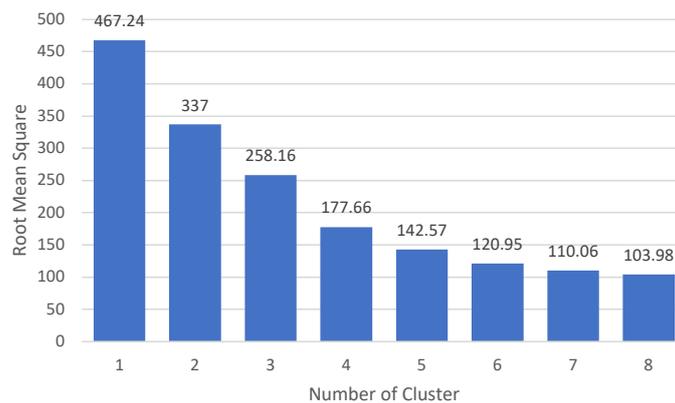


図 4.5: 15 時以前のクラスター数とクラスター内偏差の関係

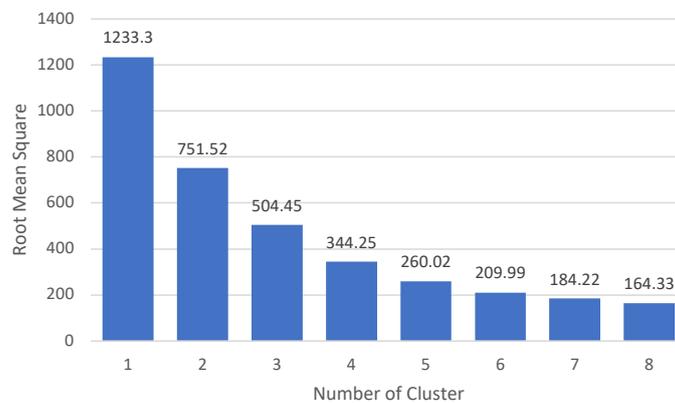


図 4.6: 15 時以降のクラスター数とクラスター内偏差の関係

先行研究と同様、クラスター数を増加すると、クラスター内偏差が減少するが、減少幅は段々小さくなっていくことがわかる。そこで、15時以前と15時以降のデータをそれぞれクラスター数3~5個でクラスタリングし、異なるクラスター数における各クラスターのデータとカレンダー要素との関連性を調べた。4.1~4.3に調べた結果を示す。15時以前の各クラスターは平均累積給湯需要が大きい順に A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 とし15時以降の各クラスターは平均累積給湯需要が大きい順に A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 、 E_2 とする。

表 4.1: クラスター数が3の時のクラスター分析

月	15時以前		
	A_1	B_1	C_1
1	水曜日	平日 (水曜日を除く)	部分平日、土日祝
2	水曜日	平日 (水曜日を除く)	部分平日、土日祝
3	水曜日	平日 (水曜日を除く)	土日祝
4	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
5	水曜日	一週 (水曜日を除く)	部分土日、GW
6	水曜日	一週 (水曜日を除く)	部分土日
7	水曜日	一週 (水曜日を除く)	部分土日祝
8	水曜日	平日 (水曜日を除く)	部分平日、土日、盆休み
9	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
10	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
11	水曜日	一週 (水曜日を除く)	部分日曜日
12	水曜日	一週 (水曜日を除く)	部分土日祝

月	15時以降		
	A_2	B_2	C_2
1	水曜日	一週 (水曜日を除く)	GW 盆休み
2	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
3	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
4	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
5	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
6	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
7	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
8	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
9	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
10	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
11	水曜日	一週 (水曜日を除く)	
12	水曜日	一週 (水曜日を除く)	

表 4.2: クラスター数が4の時のクラスター分析

月	15 時以前			
	A_1	B_1	C_1	D_1
1	水曜日	平日（水曜日を除く）	土日祝	GW 盆休み
2	水曜日		一週（水曜日を除く）	
3	水曜日		一週（水曜日を除く）	
4	水曜日	一週（水曜日を除く）		
5	水曜日	平日（水曜日を除く）	土日	
6	水曜日	平日（水曜日を除く）	土日	
7	水曜日	一週（水曜日を除く）		
8	水曜日		一週（水曜日を除く）	
9	水曜日	一週（水曜日を除く）		
10	水曜日	一週（水曜日を除く）		
11	水曜日	平日（水曜日を除く）	土日祝	
12	水曜日	平日（水曜日を除く）	土日祝	
月	15 時以降			
	A_2	B_2	C_2	D_2
1	水曜日		一週（水曜日を除く）	GW 盆休み
2	水曜日		一週（水曜日を除く）	
3	水曜日		一週（水曜日を除く）	
4	水曜日	一週（水曜日を除く）		
5	水曜日	一週（水曜日を除く）		
6	水曜日	一週（水曜日を除く）		
7	水曜日	一週（水曜日を除く）		
8	水曜日		一週（水曜日を除く）	
9	水曜日	一週（水曜日を除く）		
10	水曜日	平日（水曜日を除く）	土日祝	
11	水曜日	平日（水曜日を除く）	土日祝	
12	水曜日	平日（水曜日を除く）	土日祝	

クラスター数が3個の場合は、15時以前においては B_1 と C_1 にまたがって分類された日があるため、予測の精度が下がる可能性がある。15時以降においては、各クラスターが異なるカレンダー特徴があるが、 B_2 に属するデータ多くて、区別がつかないため、予測に誤差が生じる。クラスター数5個の場合は、15時以前と15時以降のどちらの時間帯においては異なるクラスターにまたがって分類された日が多く、精度よく予測することが難しい。そのため、最もカレンダー情報で分類しやすいクラスター数である4個を本研究のクラスター数とした。4.2から15時以前と15時以降の給湯需要は月ごとに異なり、同じ曜日でも違う場合が多いことが分かった。水曜日は温泉施設の定休日のため、給湯需要が最も小さい A_1 、 A_2 に振り当てられ、ゴールデンウィークと盆休みは連休のため、給湯需要が最も多い D_1 、 D_2 に振り当てられた。また、15時以前と15時以降のどちらの時間帯でも、基本的に人出が夏に少なく冬に多いというパターンに合致しているが、8月は休みの日が多くなるため、盆休み以外の日は殆ど給湯需要が二番目多い C_1 、 C_2 に属する。

表 4.4 と 4.5 に、15時以前と15時以降の二つの時間帯をクラスター数4個でクラスタリングし、得られた各クラスターの最大値、最小値、平均値、標準偏差を示す。

表 4.3: クラスタ数が5の時のクラスター分析

月	15 時以前				
	A_1	B_1	C_1	D_1	E_1
1	水曜日	平日	土日	土日祝	GW 盆休み
2	水曜日	平日	平日、土日	土日祝	
3	水曜日	平日	平日、土日	土日祝	
4	水曜日	平日	平日、土日	土日祝	
5	水曜日	平日	平日、土日	土日	
6	水曜日	平日	平日、土日	土日	
7	水曜日	平日	平日、土日	土日	
8	水曜日	平日	土日	土日祝	
9	水曜日	平日	平日、土日	土日祝	
10	水曜日	平日、土日	土日祝		
11	水曜日	平日	土日		
12	水曜日	平日	平日、土日	土日祝	

月	15 時以降				
	A_1	B_1	C_1	D_1	E_2
1	水曜日		平日、土日	土日祝	GW 盆休み
2	水曜日		一週	一週	
3	水曜日		平日、土日	土日祝	
4	水曜日	平日	平日、土日祝		
5	水曜日	一週	一週		
6	水曜日	平日、土日	土日		
7	水曜日	一週	一週		
8	水曜日		一週	一週	
9	水曜日	一週	一週		
10	水曜日	平日	平日、土日	土日祝	
11	水曜日	平日	平日、土日	土日祝	
12	水曜日		平日、土日	土日祝	

表 4.4: 15 時以前の各クラスターの情報

クラスター	日数	最大値 [L]	最小値 [L]	平均値 [L]	標準偏差 [L]
A_1	135	362.5	0	51.1	99.3
B_1	469	931.5	381.8	700.9	141.1
C_1	256	1943.9	933.0	1164.1	202.4
D_1	11	4895.5	2188.3	2921.8	751.1

表 4.5: 15 時以降の各クラスターの情報

クラスター	日数	最大値 [L]	最小値 [L]	平均値 [L]	標準偏差 [L]
A_2	112	1227.7	0	22.6	130.2
B_2	457	2927.8	1627.8	2510.5	273.3
C_2	273	4444.0	2923.2	3353.1	351.7
D_2	29	8080.0	4640.1	5921.8	1073.6

4.3 クラスタリングにより給湯需要の予測

前節で検討したクラスタリングの結果を活用することで、1日各時点の累積給湯需要の予測が可能となる。

HPWHにより生成されたお湯は貯湯タンクに貯められるため、タンク内の湯量が容量の上限と下限の間に収まる必要がある。予測には必ず誤差や外れが生じるため、給湯需要の予測においては、予測値が実測値より少ない場合でも湯量がタンク容量の下限より湯切れが発生しなく、予測値が実測値より多い場合でも貯湯タンクの容量上限に超えないように、誤差範囲を設定する必要がある。

先行研究では、クラスターの平均値を予測値とし、±標準偏差を予測誤差とした。図4.7に、灰色の上限を $V_{up-lim} + \mu - \sigma$ とし、下限を $V_{lo-lim} + \mu + \sigma$ とする。 μ は属するクラスターの累積給湯需要の平均値、 σ は標準偏差、 V_{up} と V_{low} は貯湯槽の上下限值となる。灰色部分は各時点のタンク内の累積湯量の許容範囲である。累積給湯需要が予測値 μ より多い場合でも、 $\mu + \sigma$ を超えないなら、湯切れが発生しなく、累積給湯需要が予測値 μ より少ない場合でも、 $\mu - \sigma$ を超えるなら、タンクからお湯が溢れない。そのため、1日において、HPWHの初期湯量と各時点の累積生成湯量との和が灰色部分に収まるのは望ましい。

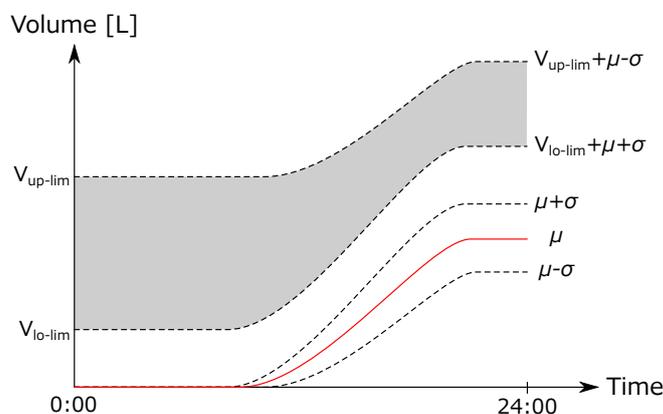


図 4.7: タンク内累積湯量の許容範囲と累積給湯需要の予測範囲

本研究では、先行研究と同じ考え方をした。表4.6と表4.7は15時以前と15時以降の二つの時間帯の各クラスターが $\mu \pm \sigma$ と比較し、各範囲に収まる割合である。15時以前において、データの数が最も多い A_1 でも、 $\mu \pm \sigma$ の範囲を用いた予測が精度が62.9%になり、他のクラスターの精度がより上回る。また、15時以降において、 D_2 のデータがかなり離散しているため、精度が55.2%に下がった。しかし、後述する原因により、 D_2 の予測が行わないため、15時以降の予測精度は15時以前の予測精度と同じ程度に達すると言える。結果として、3割の確率で予測外れが発生する恐れがあることが分かった。予測外れは湯切れなどの受電点変動の問題に関連するため、次章にその対策について述べる。

表 4.6: 15時以前の各範囲に収まる割合

クラスター	$<\mu - \sigma$	$>\mu + \sigma$	$\mu - \sigma$ と $\mu + \sigma$ の間
A_1	0	11.9%	88.1%
B_1	16.5%	19.6%	62.9%
C_1	11.3%	14.5%	74.2%
D_1	0	9.1%	90.9%

15時以前の4つのクラスター A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 と15時以降の4つのクラスター A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 のそれぞれのタンク内累積湯量許容範囲を図4.8に示す。

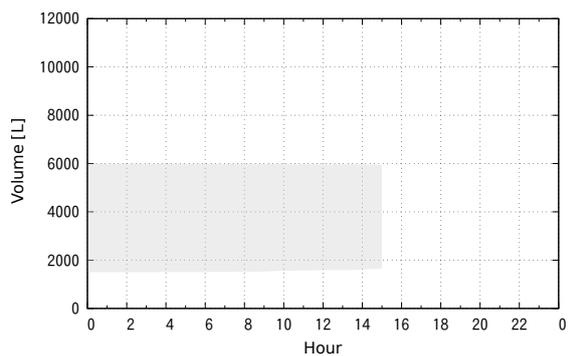
表 4.7: 15 時以降の各範囲に収まる割合

クラスター	$<\mu-\sigma$	$>\mu+\sigma$	$\mu-\sigma$ と $\mu+\sigma$ の間
A_2	0	1.8%	98.2%
B_2	18.2%	18.3%	63.4%
C_2	9.9%	17.2%	72.9%
D_2	24.1%	20.7%	55.2%

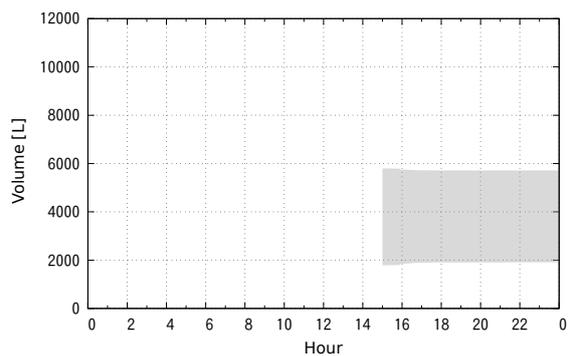
カレンダーの情報（月と曜日）により、15 時以前と 15 時以降の二つの時間帯のクラスターをそれぞれ取得し、それぞれのタンク内の累積湯量許容範囲が得られる。二つのタンク内の累積湯量許容範囲を組み合わせることで、1 日各時点のタンク内累積容量の許容範囲が得られる。

表 4.2 により、二つの時間帯を 4 個クラスターでクラスタリングを行った場合には、 $A_1 \rightarrow A_2$ 、 $B_1 \rightarrow B_2$ 、 $B_1 \rightarrow C_2$ 、 $C_1 \rightarrow B_2$ 、 $C_1 \rightarrow C_2$ 、 $D_1 \rightarrow D_2$ という 6 つの過程があり、各過程により組み合わせたタンク内累積湯量の許容範囲は図 4.9～4.14 で表す。淡い灰色部分は 15 時以前で、濃い灰色部分は 15 時以降の許容範囲である。また、貯湯タンクの容量範囲を 1500～6000L とする。

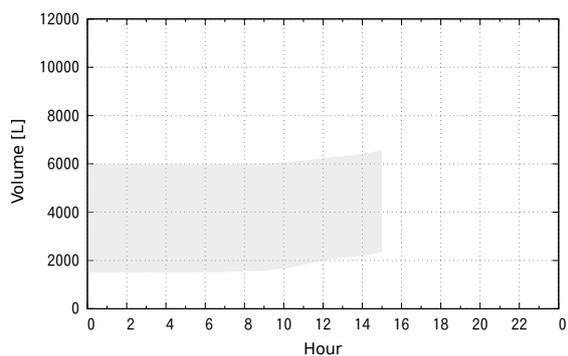
図 4.9 では、施設が定休日のため、許容範囲は 1 日に特に変わりがないことが分かる。図 4.10 と図 4.11 から、15 時以降の許容範囲を上シフトすることで、湯切れを発生する恐れを避けることができることが分かる。図 4.12 と図 4.13 では、15 時以降の許容範囲を下シフトすることで、HPWH の生成湯量を減少させる。これは、湯切れが発生しない限り、1 日の最終湯量をなるべく小さくし、次の日の運転計画に影響しないためである。（運転計画の詳細は次章に述べる。）図 4.14 はゴールデンウィークや盆休みなどの大型連休のタンク内累積湯量の許容範囲であり、不自然な形となった。これは大型連休では、給湯需要がかなり多く、二台の HPWH は常に最大負荷運転モードで運転しているためである。そのため、大型連休においては給湯需要の予測は必要なく、HPWH を一定のモードで運転させることで、湯切れとタンクの容量超過をある程度抑えられると考えられる。



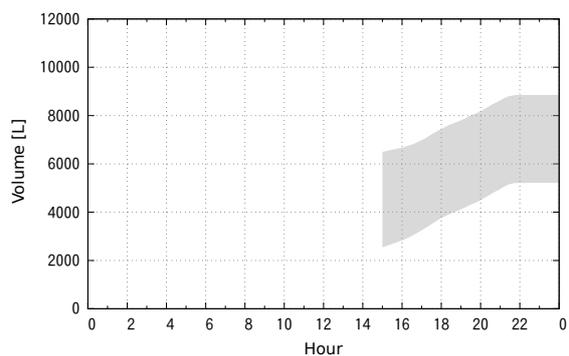
(a) A_1 のタンク内累積湯量許容範囲



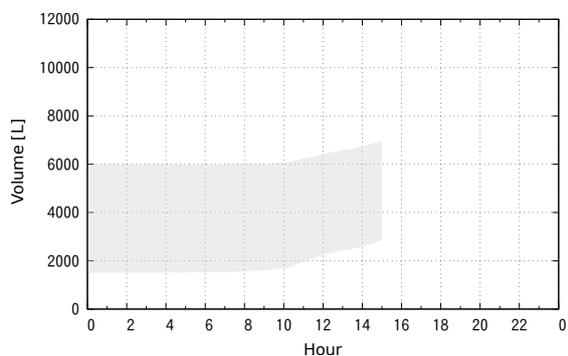
(b) A_2 のタンク内累積湯量許容範囲



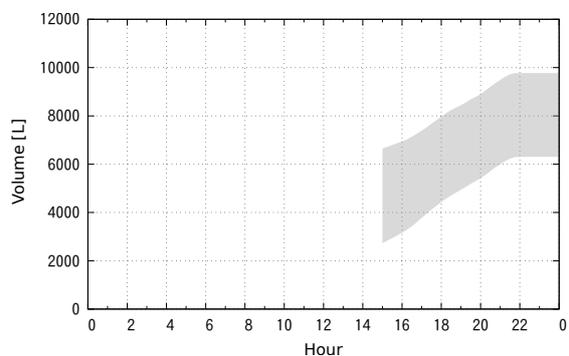
(c) B_1 のタンク内累積湯量許容範囲



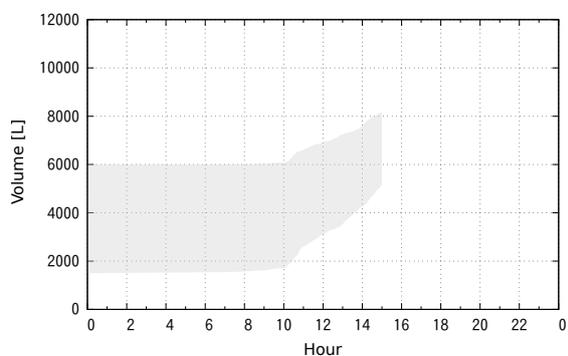
(d) B_2 のタンク内累積湯量許容範囲



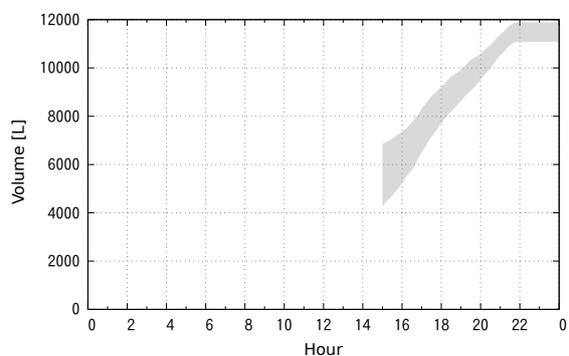
(e) C_1 のタンク内累積湯量許容範囲



(f) C_2 のタンク内累積湯量許容範囲



(g) D_1 のタンク内累積湯量許容範囲



(h) D_2 のタンク内累積湯量許容範囲

図 4.8: 各クタスターのタンク内累積湯量許容範囲

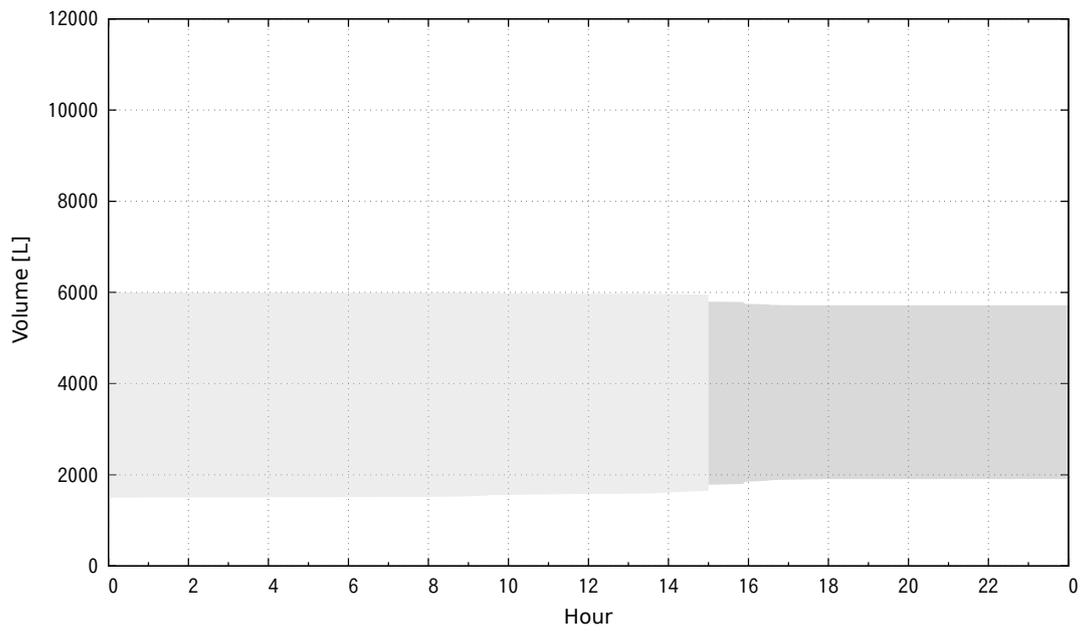


図 4.9: $A_1 \rightarrow A_2$ のタンク内累積湯量の許容範囲

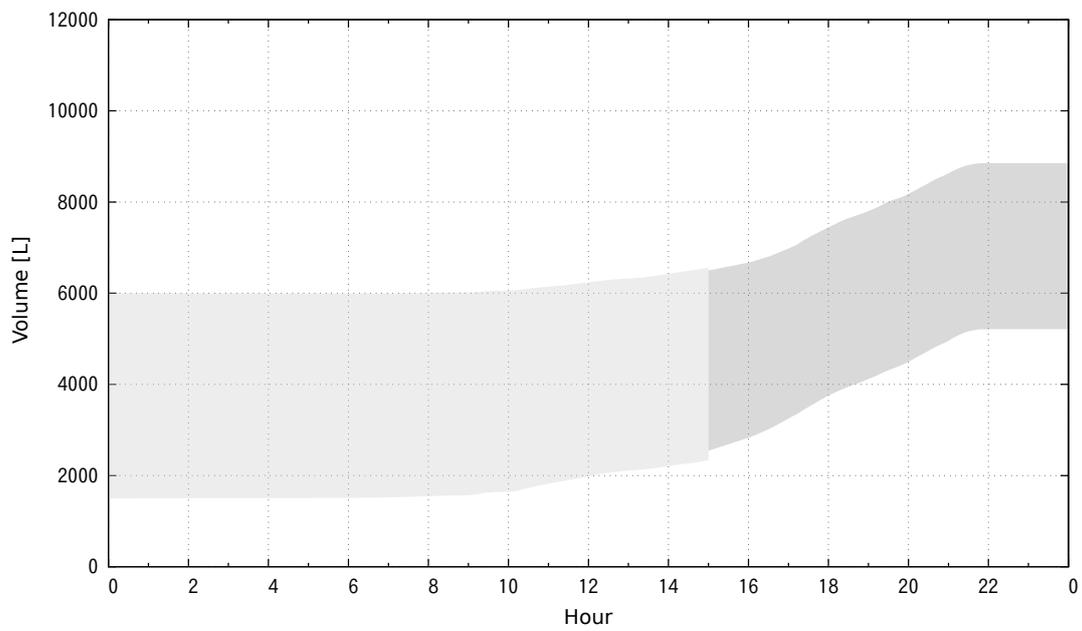


図 4.10: $B_1 \rightarrow B_2$ のタンク内累積湯量の許容範囲

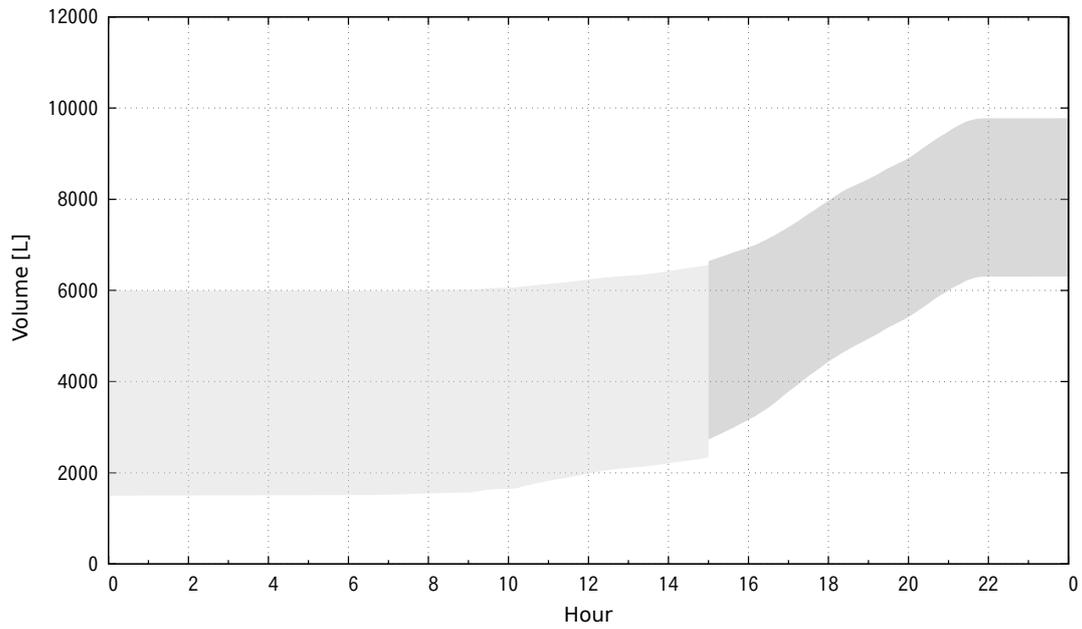


図 4.11: $B_1 \rightarrow C_2$ のタンク内累積湯量の許容範囲

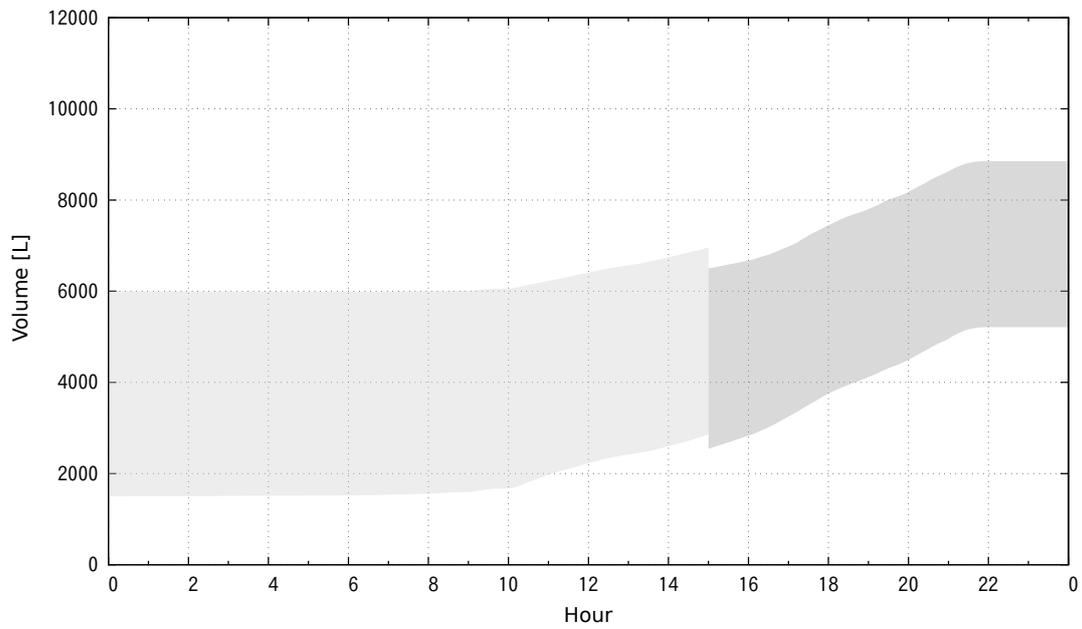


図 4.12: $C_1 \rightarrow B_2$ のタンク内累積湯量の許容範囲

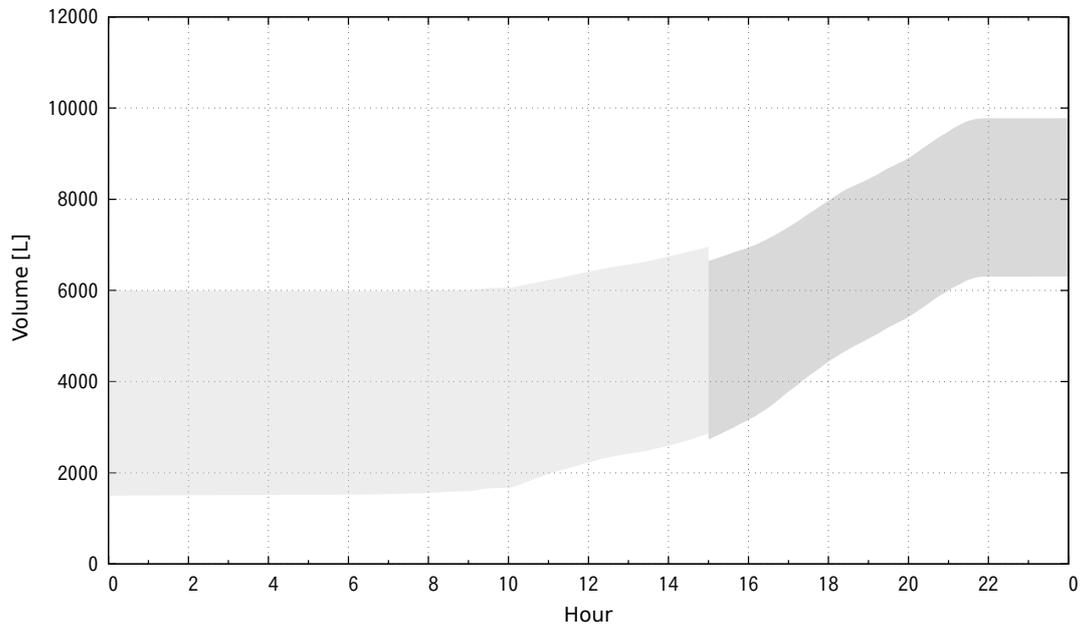


図 4.13: $C_1 \rightarrow C_2$ のタンク内累積湯量の許容範囲

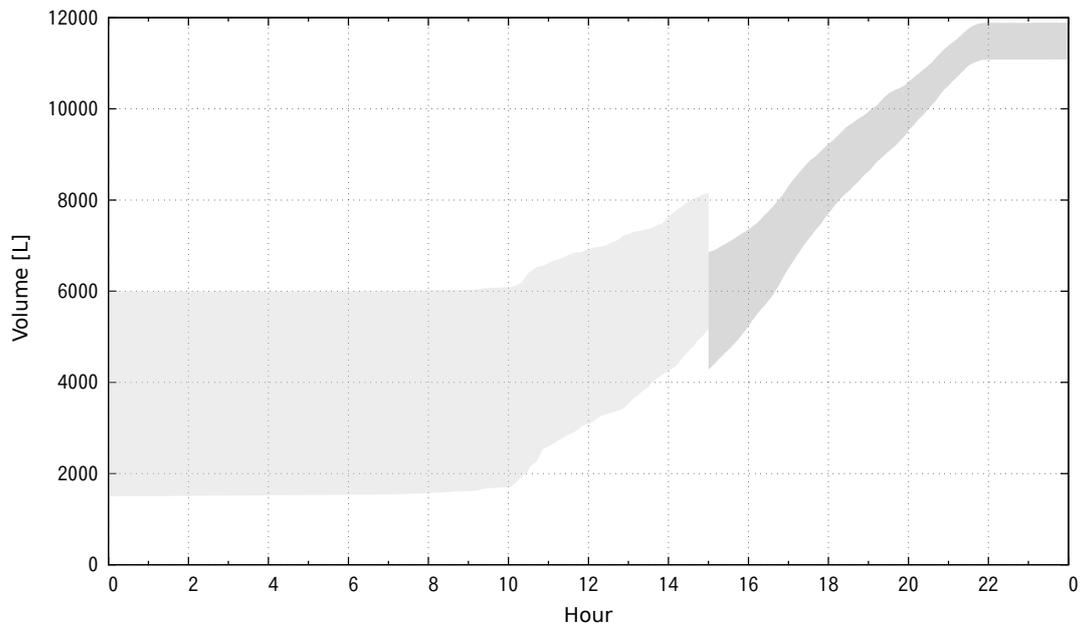


図 4.14: $D_1 \rightarrow D_2$ のタンク内累積湯量の許容範囲

4.4 本章のまとめ

本章では、給湯需要を事前に予測するため、新たな HPWH の給湯需要分析と予測手法を提案した。従来手法では、HPWH の給湯需要が昼に少なく、夜間に急増するという時間特性を考えなかったため、夜間になると予測が外れとなり、湯切れが発生しやすかった。そこで、HPWH の給湯需要の時間特性の分析を行った。給湯需要が 15 時から急増するため、時間分割という形で 1 日を 15 時を境に二つの時間帯を分けた。k-mean 法を用い、15 時以前の累積給湯需要 (14:59:59 という時点) と 15 時以降の給湯需要 (23:59:59 という時点) にそれぞれクラスタリングを行った。先行研究と同じように、各クラスターとカレンダー情報を関連しやすいため、二つの時間帯のクラスター数を 4 つと決定した。クラスタリングの結果をもとに、各クラスターの平均値 ± 標準偏差を予測誤差として、各クラスターの各時点の累積給湯需要の範囲を計算した。そのため、対象日の月と曜日が分かれば、二つの時間帯の各時点の給湯需要を概ね予測することが可能となった。また、貯湯タンクの容量制限を考慮し、二つの時間帯の各クラスターの累積給湯需要とタンクの上下限と合わせることで、タンク内累積湯量の許容範囲の推移が得られた。

第5章 受電点電力調整手法

本章では、第3章に述べた検討対象システムにおける受電点の電力を変動を抑制するため、制御対象のHPWHの最適運転を検討する。第3章に述べた各モデルと第4章で示したタンク内累積許容範囲を用いて、多くの制約条件をかけることで、HPWHの運転計画の最適化を行い、受電点電力変動の改善効果を示す。その上で、前章に言及した湯切れ対策について述べる。最後に、天気急変による予測外れが発生する際のHPWHの運転計画の再計画について述べる。

5.1 ヒートポンプ給湯機の運転計画の最適化

本研究では、glpsolを用い、混合整数線形計画問題(MIP)を計算することで、HPWHの運転計画の最適化を行う。MIPは線形計画問題において整数制約が追加された問題である。glpsol(あるいはGLPK)はオープンソースの最適化計算のソルバーであり、MIPの計算にも扱えるため、本研究のソルバーとして用いた。

頻繁な起動・停止は機器寿命に低下させる可能性があるため、本研究でのHPWHの運転周期を30分とする。そのため、30分を1コマとし、1日48コマとなる。

下記の目的関数と制約条件によるMIPを解くことで、HPWHの30分おきの運転パターンを計算し、最適な運転計画を決定する。MIPの目的関数は受電点電力、すなわちPVの余剰電力の変動を抑えるため、1日のその変動の和の絶対値を式(5.1)で定義し、最小化する。制約条件を式(5.2)～式(5.12)に示す。 P 、 V と M^i は電力、湯量とHPWHの制御パターンを意味する。式(5.2)はPVの出力と運転パターン i の消費電力 P_{hpwh} の差を余剰電力として定義する式である。式(5.3)は運転パターン i の生成湯量を加えて累積生成湯量を求める式である。式(5.4)は累積生成湯量が最初になしであると規定する式である。式(5.5)は初期湯量と累積生成湯量の和を前章に述べたタンク内累積湯量範囲に収めるための式であり、式(5.6)は翌日の運転計画に影響しないよう、貯湯タンク内の1日最終湯量を事前に設定した許容範囲に収める式である。式(5.7)は運転パターン i の有無を表示する式であり、0の時がHPWHがこのパターンで運転、1の時他のパターンで運転を意味する。式(5.8)は1コマの中に一つの運転モードだけで運転することを規定する式である。式(5.9)はHPWHの運転可能時間を規定する式であり、式(5.12)に示すように、HPWHは0時～9時と5時半～24時の二つの時間帯に運転停止状態となる。式(5.10)は第二章に述べたHPWHの6つの運転パターンを意味する。表5.1に、各 i の際の2台のHPWHの状態を示す。MIPの目的関数と制約条件における各変数の解釈が表5.2にまとめた。

[目的関数]

$$\min \sum_{t=1}^{47} |P_{sur}^{t+1} - P_{sur}^t| \quad (5.1)$$

[制約条件]

$$P_{sur}^t = P_{pv}^t - \sum_{i=0}^5 (M^{i,t} \times P_{hpwh}^i), t \in T \quad (5.2)$$

$$V_{prod}^t = V_{prod}^{t-1} + \sum_{i=0}^5 (M^{i,t} \times V_{hpwh}^i), t \in T \quad (5.3)$$

$$V_{prod}^0 = 0 \quad (5.4)$$

$$V_{low}^t \leq V_{init} + V_{prod}^t \leq V_{up}^t, t \in T \quad (5.5)$$

$$V_{l.set} \leq V_{init} - \mu^{48} + V_{prod}^{48} \leq V_{u.set} \quad (5.6)$$

$$M^{i,t} \in \{0, 1\} \quad (5.7)$$

$$\sum_{i=0}^5 M^{i,t} = 1, t \in T \quad (5.8)$$

$$M^{0,t} = 1, t \in K \quad (5.9)$$

$$i = \{0, \dots, 5\} \quad (5.10)$$

$$T = \{1, \dots, 48\} \quad (5.11)$$

$$K = \{k = \mathbb{Z} | 1 \leq k \leq 18, 36 \leq k \leq 48\} \quad (5.12)$$

表 5.1: HPWH の運転パターン

i	HPWH 1	HPWH 2
0	停止状態	停止状態
1	省エネ運転モード	停止状態
2	最大負荷運転モード	停止状態
3	省エネ運転モード	省エネ運転モード
4	省エネ運転モード	最大負荷運転モード
5	最大負荷運転モード	最大負荷運転モード

表 5.2: MIP における変数の解釈

変数	解釈
P_{sur}^t	t での PV の余剰電力 (受電点電力) [kW]
P_{pv}^t	t での PV の出力電力 [kW]
$M^{i,t}$	t における各 HPWH 運転パターン i の有無状況 (0 or 1)
P_{hpwh}^i	HPWH 運転パターン i の消費電力 [kW]
V_{hpwh}^i	HPWH 運転パターン i の生成湯量 [L]
V_{prod}^t	t での累積生成湯量 [L]
V_{low}^t	t でのタンク内累積湯量範囲の下限 [L]
V_{up}^t	t でのタンク内累積湯量範囲の上限 [L]
$V_{.set}$	事前に設定した 1 日の最終湯量の許容範囲の下限 [L]
$V_{u.set}$	事前に設定した 1 日の最終湯量の許容範囲の上限 [L]
V_{init}	1 日の初期湯量 [L]
μ^{48}	t=48 の際の属するクラスターの平均給湯需要 [L]
i	HPWH の 6 つの運転パターン
T	1 日 48 コマ
K	運転停止時間

図 5.1 は上記 MIP による HPWH の運転計画最適化の概要である。HPWH の運転は夜間に追い焚きが発生するという最悪の場合でも、夜 10 時以降基本的に運転しないため、貯湯タンク内の湯量が翌日の朝まで一定になると言える。そのため、夜 10 時から翌日の HPWH の運転計画を策定し始める。翌日の天気予報から翌日の天気情報 (外気温、各時点の PV 予測) が得られる。外気温を HPWH のモデルに導入することで、その外気温の場合の HPWH の六つのパターンの消費電力と生成湯量が得られる。翌日の日付により属するクラスターを調べ、そのクラスターのタンク内累積湯量の許容範囲 (生成湯量の標準偏差を含む) を得る。夜 10 時から翌日の朝までタンク内の湯量が変わらないため、当日の最終湯量を翌日の初期湯量とする。翌日の最終湯量の許容範囲と HPWH の運転可能時間は変数を変更することで自ら設定可能である。最後に、HPWH の各パターンの消費電力と生成湯量、タンク内許容範囲、翌日の PV 予測、設定した翌日最終湯量の許容範囲と運転可能時間、当日の最終湯量を MIP の変数として、最適化を行うことで、翌日の HPWH の運転計画 (48 コマの HPWH の運転パターン) が得られる。

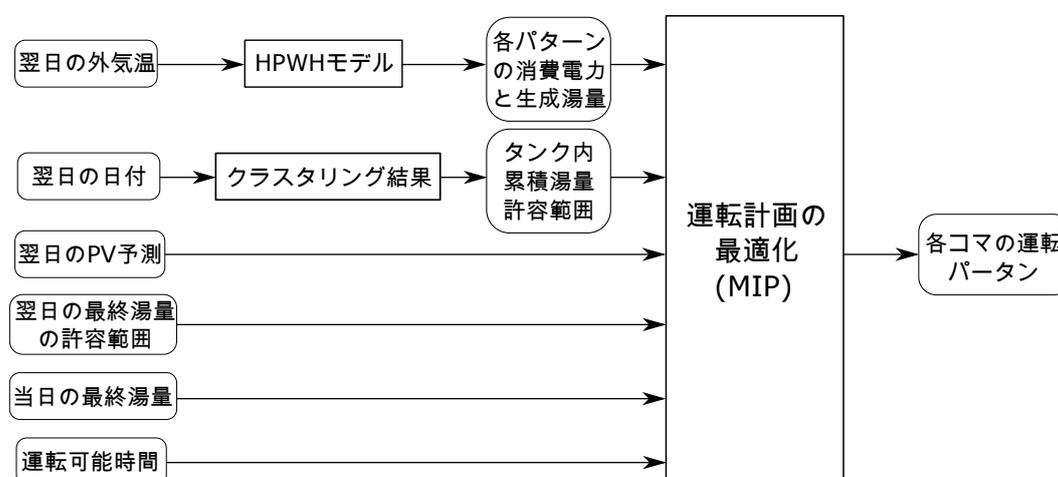


図 5.1: MIP による運転計画最適化

5.2 湯切れ対策

前章に述べたように、時間分割クラスタリングによる給湯需要予測では、3割の確率で予測外れが発生する恐れがある。本節では、時間分割クラスタリングの結果をもとに、予測外れが発生した場合に最も好ましくない湯切れへの対策を提案した。

実データを用いて、15時以前の累積給湯需要と属するクラスターの平均給湯需要との比率と15時以降の比率との関連性を調べた。図5.2～図5.5に、 $B_1 \rightarrow B_2$ 、 $B_1 \rightarrow C_2$ 、 $C_1 \rightarrow B_2$ 、 $C_1 \rightarrow C_2$ という4つの過程の比率の関連性を示す。

二つの時間帯の比率について、一次式による近似を試みた。近似式を式(5.13)とし、各過程のパラメータは表5.3に示す。 P_{after} 、 P_{before} はそれぞれ15時以前と15時以降の累積給湯需要と属するクラスターの平均給湯需要との比率を意味する。

$$P_{after} = a \times P_{before} + b \quad (5.13)$$

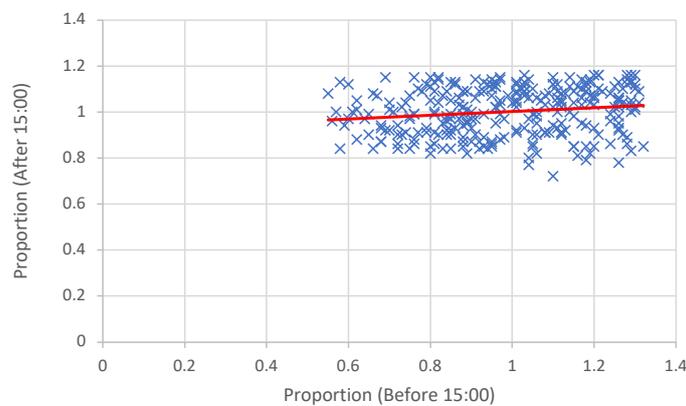


図 5.2: $B_1 \rightarrow B_2$ の比率の関連性

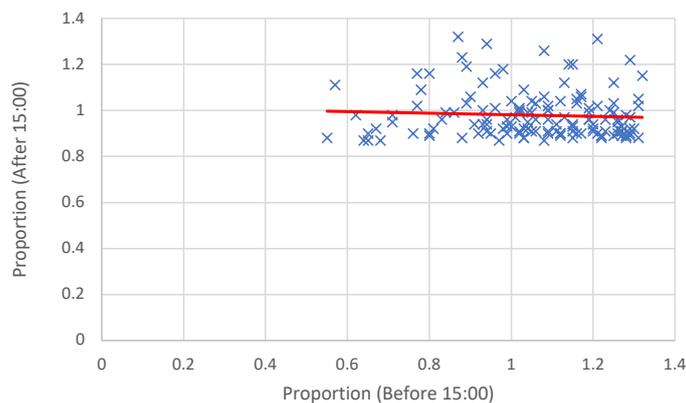


図 5.3: $B_1 \rightarrow C_2$ の比率の関連性

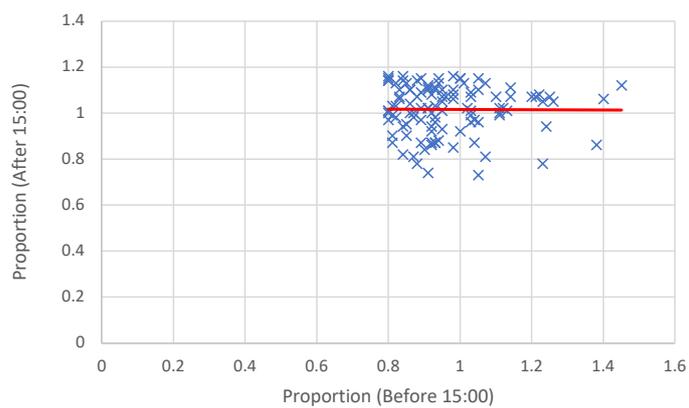


図 5.4: $C_1 \rightarrow B_2$ の比率関連性

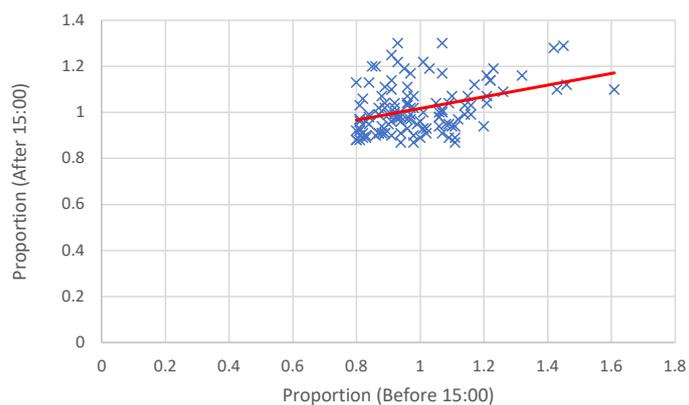


図 5.5: $C_1 \rightarrow C_2$ の比率関連性

表 5.3: 各過程の一次近似式のパラメータ

過程	a	b
$B_1 \rightarrow B_2$	0.082	0.92
$B_1 \rightarrow C_2$	-0.033	1.014
$C_1 \rightarrow B_2$	-0.006	1.021
$C_1 \rightarrow C_2$	0.252	0.765

湯切れ対策では、15時まで HPWH を運転計画通りに運転させ、15時という時点で、15時までの累積給湯需要の実測値 $V_{before-real}$ を上記の属する過程の一次近似式による式 (5.14) に代入することで、15時以降の累積給湯需要 $V_{after-predict}$ を予測する。 μ_{before} と μ_{after} はそれぞれ対象日の二つの時間帯が属するのクラスターの平均値を表す。

$$V_{after-predict} = (a \times \frac{V_{before-real}}{\mu_{before}} + b) \times \mu_{after} \quad (5.14)$$

15時以前の累積給湯需要の実測値と15時以降の累積給湯需要の予測値の和を運転計画通りに運転する場合の最終タンク内累積湯量と比較することで HPWH を運転計画のままに運転させれば湯切れが発生するかどうかを判断する。図 5.6 のように、湯切れが発生しないと判断した場合、HPWH を元の運転計画で運転させ、図 5.7 のように、湯切れが発生する恐れがある場合、下記のような新たな MIP で15時以降の運転を再計画する。

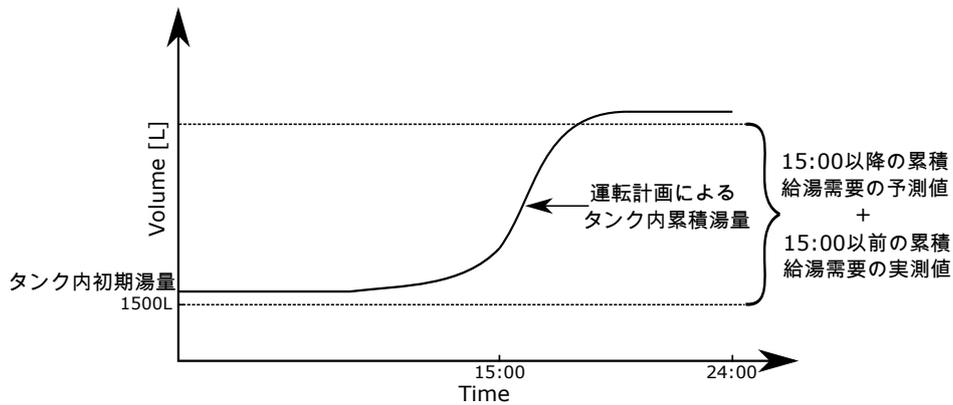


図 5.6: 最終タンク内累積湯量が15時以前の累積給湯需要の実測値と15時以降の累積給湯需要の予測値の和より多い場合

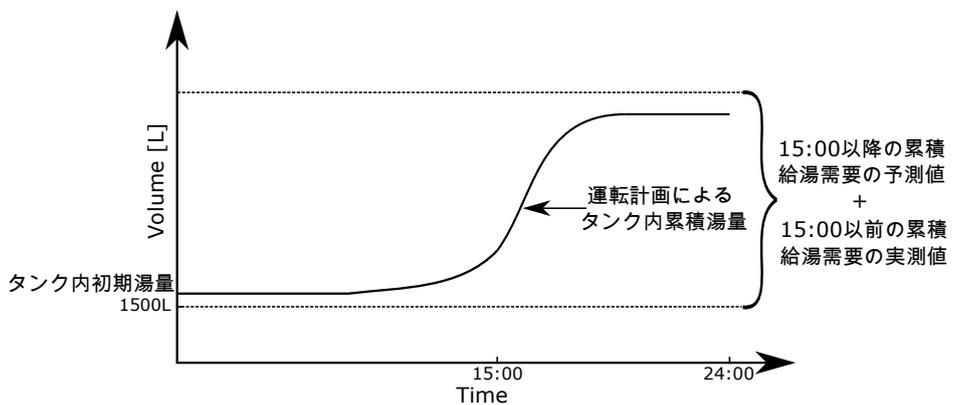


図 5.7: 最終タンク内累積湯量が15時以前の累積給湯需要の実測値と15時以降の累積給湯需要の予測値の和より少ない場合

新たな MIP の目的関数と制約条件を式 (5.15) ～式 (5.26) に示す。前節の MIP と異なる式について説明する。式 (5.19) は 5 時から～22 時まで各コマの給湯需要が等しいと仮定し、115 時以降累積給湯需要の予測値を平均し、得られた値を各コマの給湯需要とし、湯切れと容量超過を発生させないための式である。式 (5.20) は予測値を給湯重要とし、1 日の最終湯量を設定範囲に収める式である。式 (5.25) は時間範囲を 15 時以降に設定した式である。また、追加した変数は V_{tank}^t が t での貯湯タンク内の湯量、 V_{pre} が 15 時以降の累積給湯需要の予測値である。

[目的関数]

$$\min \sum_{t=31}^{47} |P_{sur}^{t+1} - P_{sur}^t| \quad (5.15)$$

[制約条件]

$$P_{sur}^t = P_{pv}^t - \sum_{i=0}^5 (M^{i,t} \times P_{hpwh}^i), t \in T \quad (5.16)$$

$$V_{prod}^t = V_{prod}^{t-1} + \sum_{i=0}^5 (M^{i,t} \times V_{hpwh}^i), t \in T \quad (5.17)$$

$$V_{prod}^{30} = 0 \quad (5.18)$$

$$1500 \leq V_{tank}^{31} + V_{prod}^t - V_{pre} \times \frac{t-30}{14} \leq 6000, t \in T \quad (5.19)$$

$$V_{l.set} \leq V_{tank}^{31} - V_{pre} + V_{prod}^{48} \leq V_{u.set} \quad (5.20)$$

$$M^{i,t} \in \{0, 1\} \quad (5.21)$$

$$\sum_{i=0}^5 M^{i,t} = 1, t \in T \quad (5.22)$$

$$M^{0,t} = 1, t \in K \quad (5.23)$$

$$i = \{0, \dots, 5\} \quad (5.24)$$

$$T = \{31, \dots, 48\} \quad (5.25)$$

$$K = \{k = \mathbb{Z} | 36 \leq k \leq 48\} \quad (5.26)$$

5.3 シミュレーション

シミュレーションでは受電点電力変動を抑制できる HPWH の運転計画の策定のため、第二章に述べた一年分の PV の出力のデータを PV の出力の予測として使用した。本章に提案した手法の効果の評価するため、下記四つのケースで HPWH の運転の年間シミュレーションを行い、結果を比較した。

Case 1 HPWH を制御しない

貯湯タンク内の湯量が 2000L 以下になった場合、2 台の HPWH を最大負荷運転モードで運転させる。湯量が 5000L 以上になった場合、2 台の HPWH を運転停止させる。

Case 2 HPWH が昼間に同じ消費電力で運転

HPWH の運転最適化を行わず、単に毎日の 8:30~16:00 に一台の HPWH を省エネ運転モードで運転させる。湯切れが発生する恐れがある際に、2 台の HPWH を最大負荷運転モードで運転させる。

Case 3 HPWH が先行研究のクラスタリングによるタンク内累積湯量許容範囲を制約条件とし最適化による運転計画通りに運転

第 4 章に述べた先行研究のクラスタリングによるタンク内累積湯量許容範囲を本章に述べた MIP の一つの制約条件として、最適化することで、1 日の HPWH の運転計画を策定する。また水曜日は施設の定休日であるため、2 台の HPWH を停止状態にさせる。ゴールデンウィークと盆休みには前述したようにタンク内累積湯量許容範囲が制約条件として非常に厳しいため、一台の HPWH を最大負荷運転モードで運転させる。他の日には、HPWH を運転計画通りに運転させる。Case 1 と同じ、湯切れが発生する恐れがある際に、2 台の HPWH を最大負荷運転モードで運転させる。

Case 4 HPWH が本研究で提案したクラスター分析によるタンク内累積湯量許容範囲を制約条件とし最適化による運転計画通りに運転

第 4 章に提案した新たなクラスタリングによるタンク内累積湯量許容範囲を制約条件とする。他の条件は Case 2 と同じとする。

Case 5 HPWH が本研究で提案したクラスター分析によるタンク内累積湯量許容範囲を制約条件とし最適化による運転計画通りに運転+湯切れ対策

Case 3 の条件にさらに湯切れ対策を追加する。15 時に 15 時以降湯切れの発生する可能性を判断するステップがある。

HPWH の年間給湯需要は対象温泉施設の 2017 年度の年間給湯需要を用いた。Case 1 の受電点電力変動のヒストグラムは図 5.8 に示す。横軸は受電点電力変動 ($\Delta P_{sur} = P_{sur}^t - P_{sur}^{t-1}$)、縦軸はその区間にあるデータの数である。[0,1] にデータの数が非常に多いのは、夜間に PV の出力と HPWH の消費電力ないためである。受電点電力変動をより良く評価するため、 $\Delta P_{sur} = 0$ を外すことにした。 $\Delta P_{sur} = 0$ を外した後の Case 1~Case 5 のヒストグラムは図 5.9~図 5.13 に示されている。

Case 1 では、ベースケースとして、HPWH の運転時間は PV の出力時間と合致しないため、受電点電力変動は非常に激しいことが分かった。Case 2 と Case 3 の比較から、PV の出力と合わせ、MIP による HPWH 最適化を行った結果、受電点変動の分布が正規分布の形と類似することが分かった。夜間に湯切れが発生した場合、停止→最大負荷運転モード→停止という形で運転するた

め、ヒストグラムの左側と右側のデータの数から、湯切れの頻度が確認できる。Case 3~5 の比較は、湯切れ発生する頻度が新たに提案したクラスタリングと湯切れ対策により、減少していることを示した。

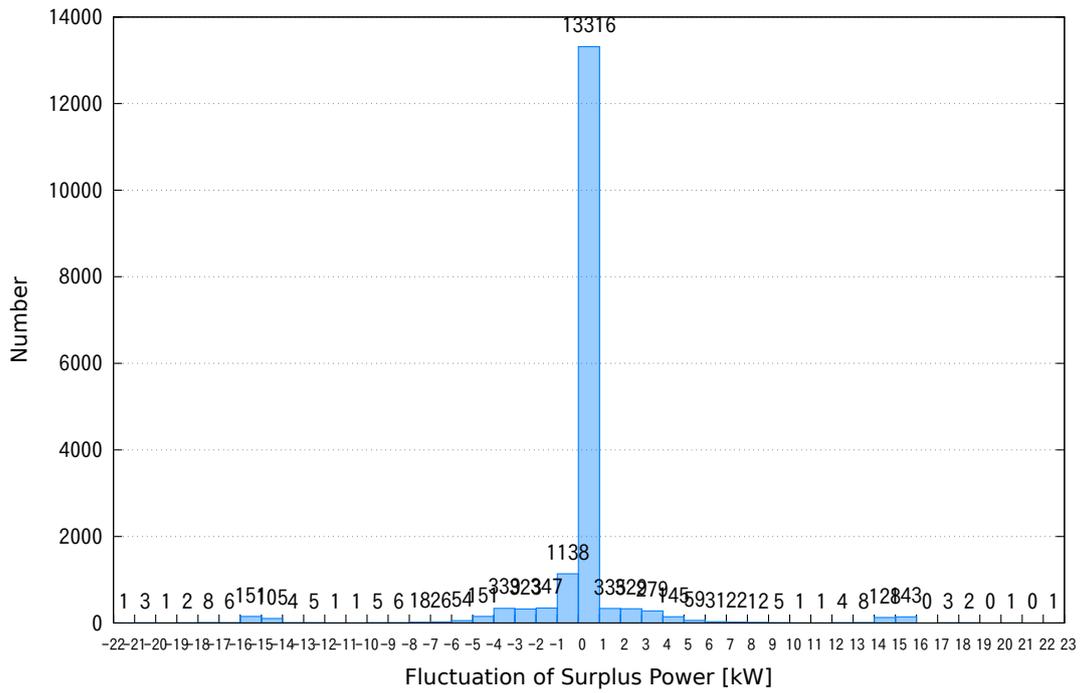


図 5.8: Case 1 の受電点電力変動のヒストグラム

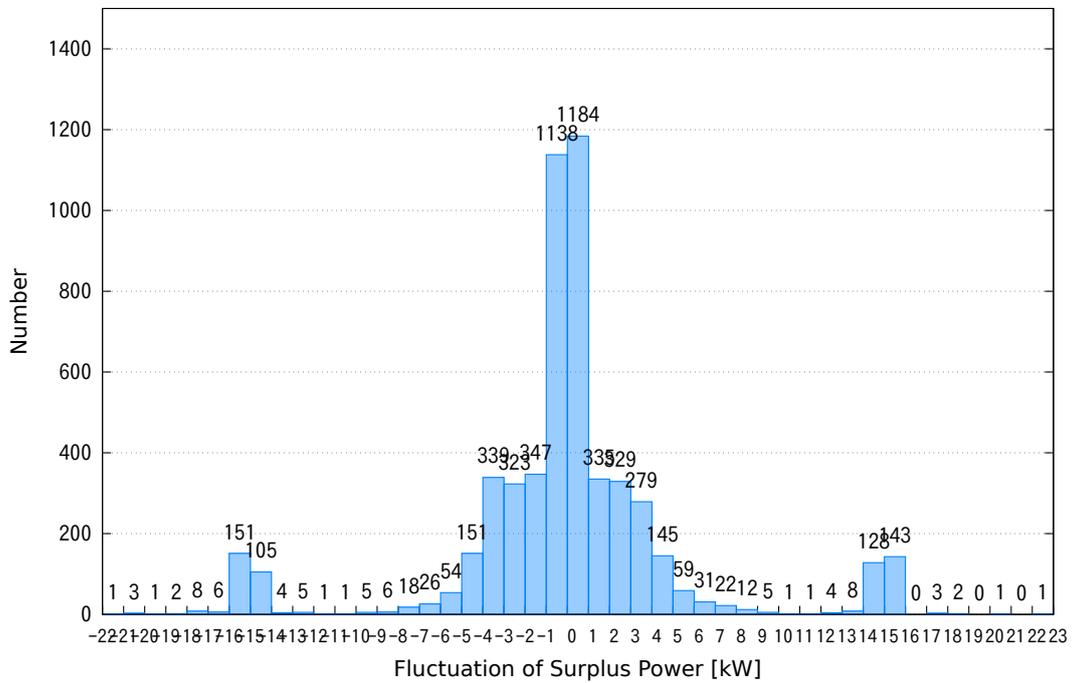


図 5.9: Case 1 の受電点電力変動のヒストグラム ($\Delta P_{sur} = 0$ 抜き)

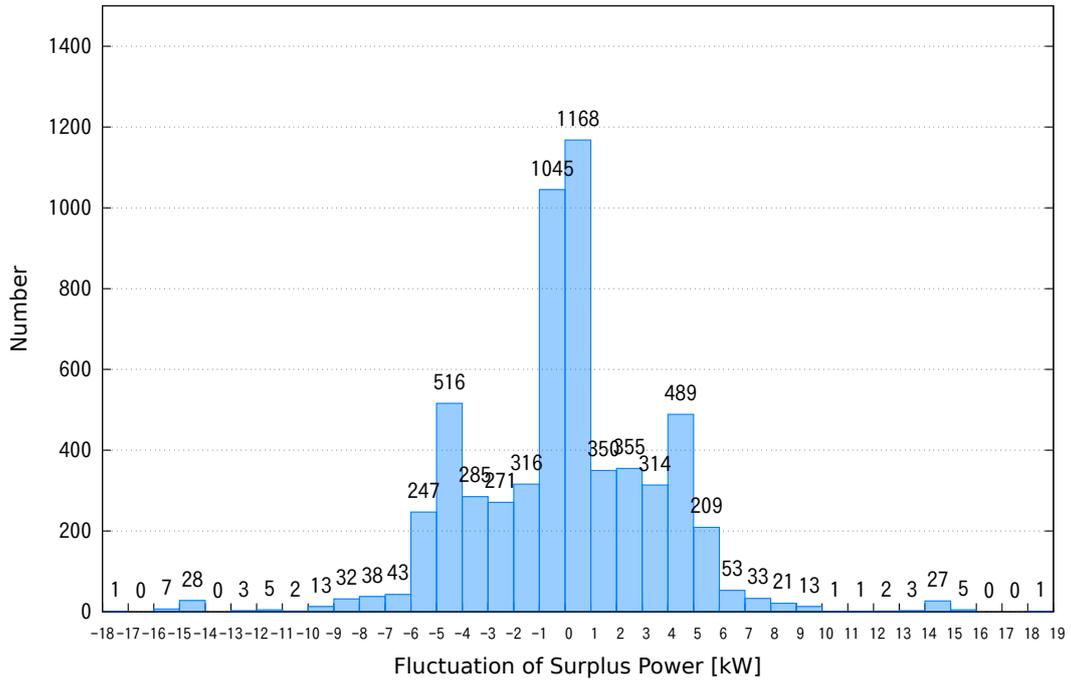


図 5.10: Case 2 の受電点電力変動のヒストグラム ($\Delta P_{sur} = 0$ 抜き)

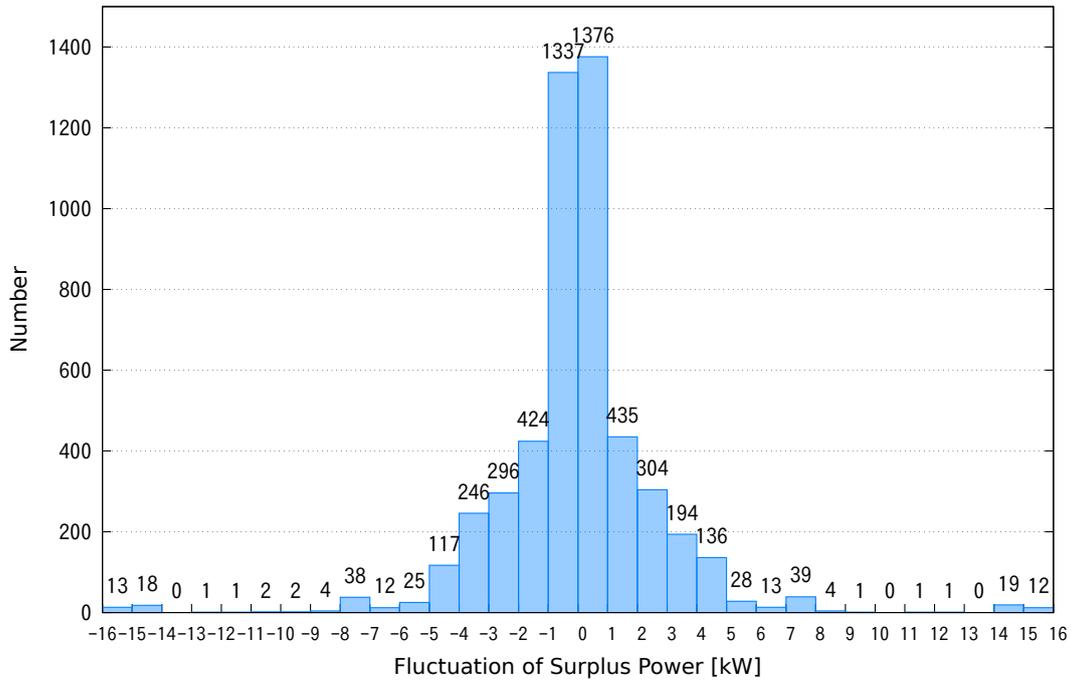


図 5.11: Case 3 の受電点電力変動のヒストグラム ($\Delta P_{sur} = 0$ 抜き)

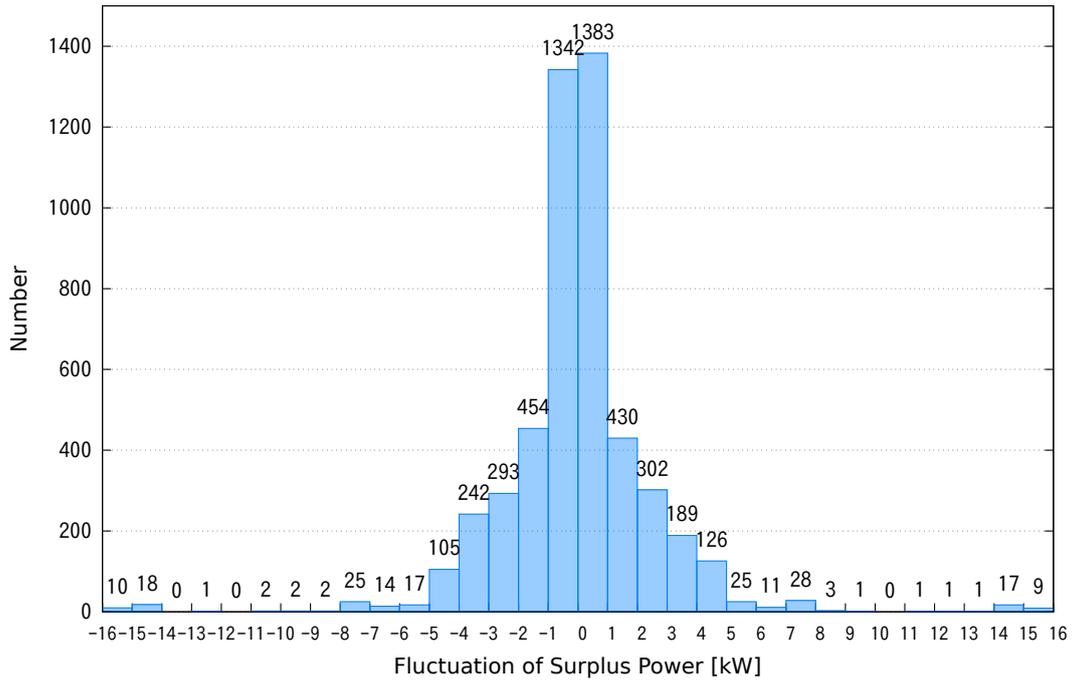


図 5.12: Case 4 の受電点電力変動のヒストグラム ($\Delta P_{sur} = 0$ 抜き)

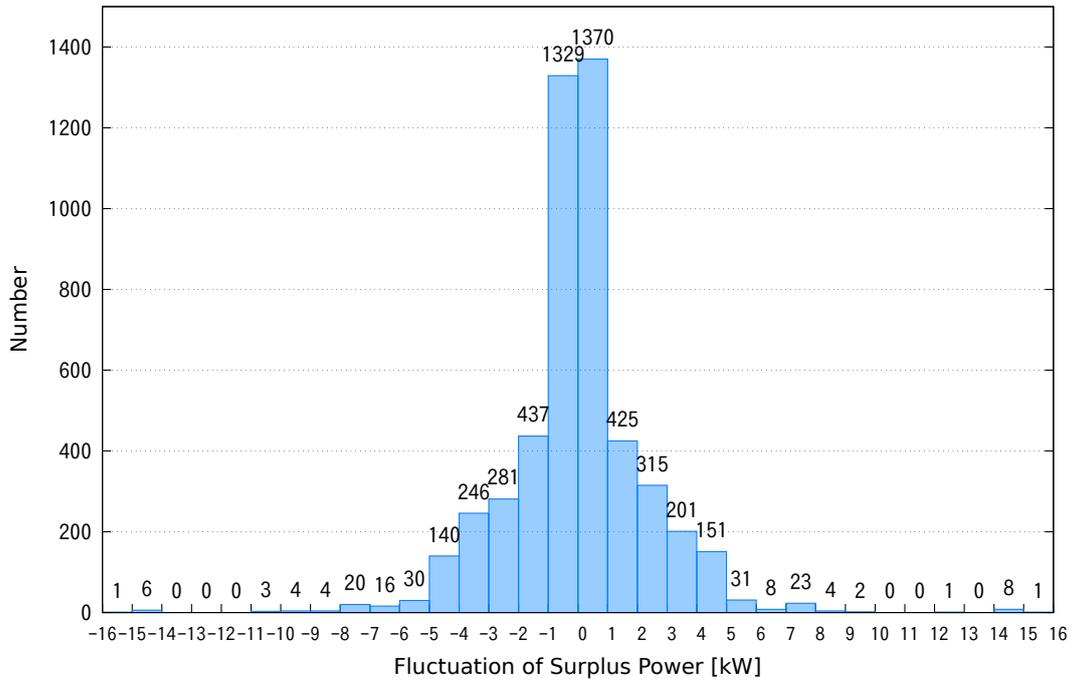


図 5.13: Case 5 の受電点電力変動のヒストグラム ($\Delta P_{sur} = 0$ 抜き)

5.4 天気急変によるヒートポンプ給湯機の運転計画の再計画の検討

前節に既知のPVの出力のデータをPVの出力予測とし、実際のPVの出力が予測と一致すると仮定し、年間シミュレーションを行った。しかしながら、PVの出力予測はかなり難しく、天気の急変により、実際のPVの出力が必ずしも予測と一致するわけではない。そのため、本節では、天気急変などの事態によりPVの出力が大きく変動した場合に、受電点電力をPVの出力とともに急激に変動させないためのHPWHの運転計画の再計画について検討した。

天気急変の状況をシミュレーションするため、既知の一年分のPVの出力のデータから代表的な天気がある1日のPVの出力のプロファイルを抽出した。

抽出された日の日付と天気を共に図5.14に示す。

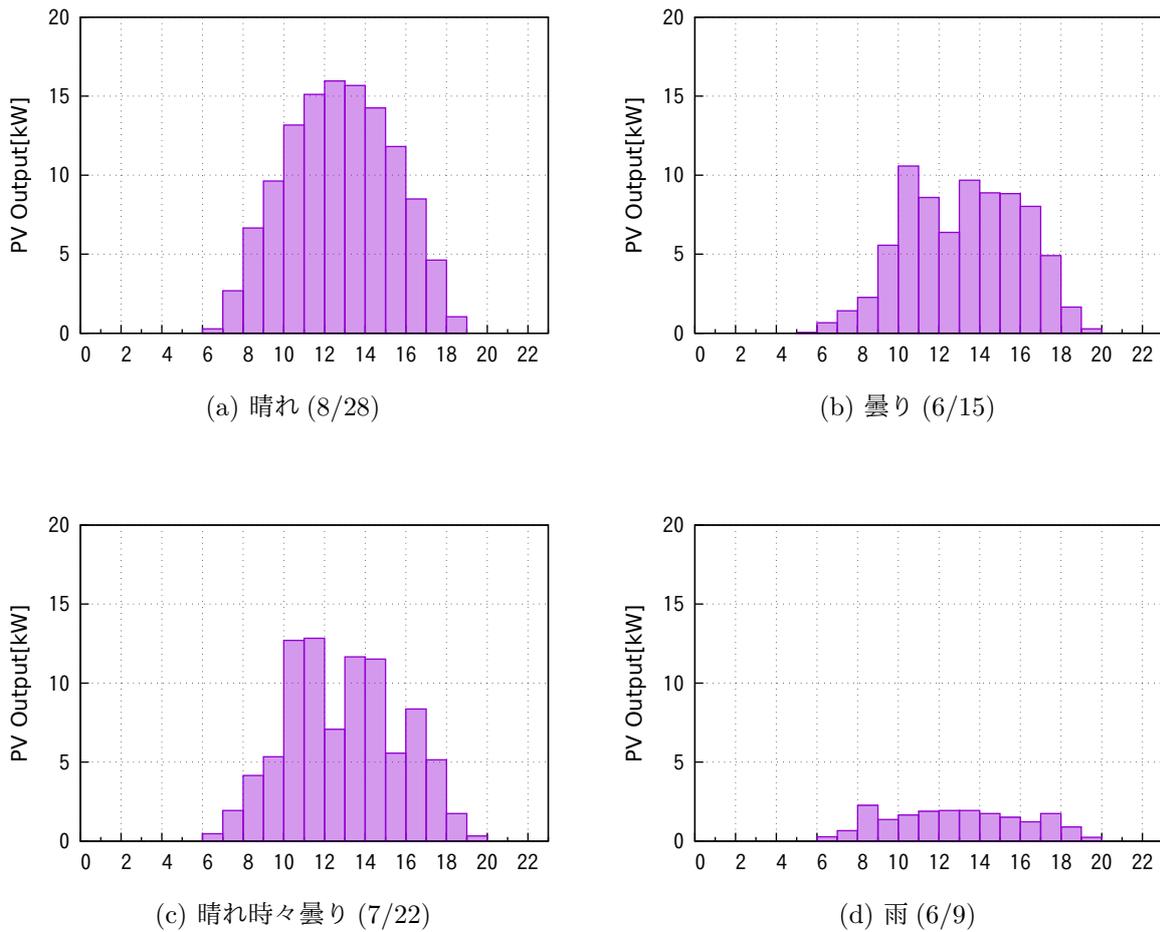


図 5.14: 代表的な天気の日々のPVの出力プロファイル

上記の代表的な PV の出力のプロファイルを組み合わせることで、天気急変が発生した 1 日の PV の出力のプロファイルを作成し、新たな PV の出力予測とする。PV の出力は前日の予測から外れてしまうため、HPWH の新たな運転計画を策定する必要がある。そこで、新たな PV へ出力予測を元に、天気急変が発生した時点で下記の MIP より運転計画の再計画を行う。 $t=m$ で、天気急変と仮定する。MIP の目的関数と制約条件を式 (5.29) ~ 式 (5.40) に示す。開始時間とタンク内累積湯量許容範囲だけは前述の MIP と異なる。 $t=m$ で、天気急変と仮定するため、開始時間とする。仮に 14 時に天気急変が発生する場合のタンク内累積湯量許容範囲の変化を図 5.15 に示す。淡い灰色部分は元の許容範囲であり、濃い方は変化した後の許容範囲を表す。許容範囲の上限と下限は式 (5.27) と式 (5.28) が表すように全体的に下にシフトする。

$$V_{low-after}^t = V_{low-before}^t - \mu^m \quad (5.27)$$

$$V_{up-after}^t = V_{up-before}^t - \mu^m \quad (5.28)$$

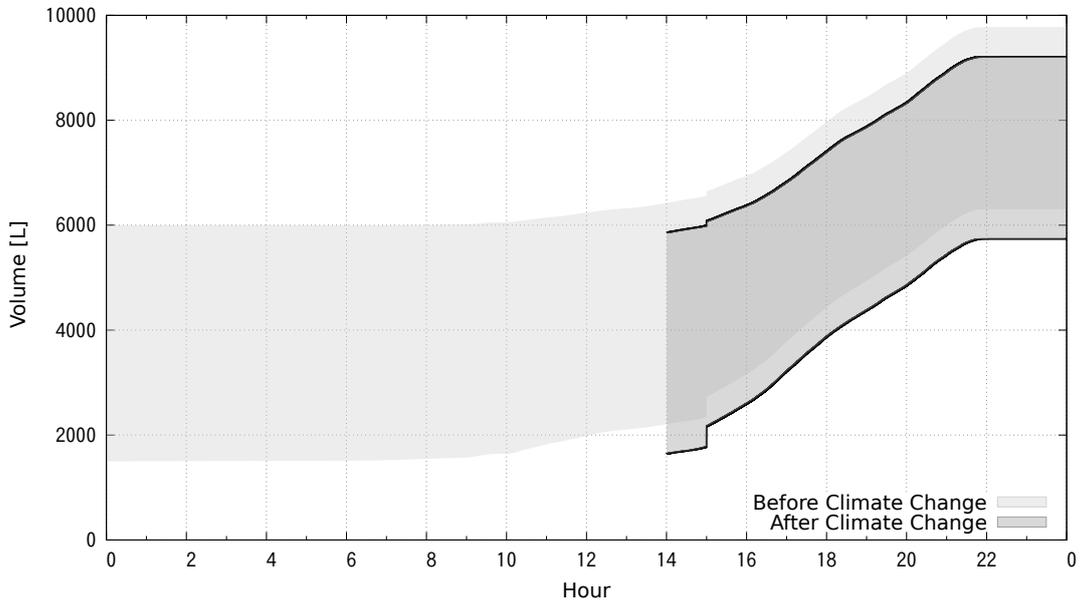


図 5.15: 天気急変によりタンク内累積湯量許容範囲の変化

[目的関数]

$$\min \sum_{t=m}^{47} |P_{sur}^{t+1} - P_{sur}^t| \quad (5.29)$$

[制約条件]

$$P_{sur}^t = P_{pv}^t - \sum_{i=0}^5 (M^{i,t} \times P_{hpwh}^i), t \in T \quad (5.30)$$

$$V_{prod}^t = V_{prod}^{t-1} + \sum_{i=0}^5 (M^{i,t} \times V_{hpwh}^i), t \in T \quad (5.31)$$

$$V_{prod}^m = 0 \quad (5.32)$$

$$V_{low}^t \leq V_{init} + V_{prod}^t \leq V_{up}^t, t \in T \quad (5.33)$$

$$V_{l.set} \leq V_{tank}^m - \mu^{48} + V_{prod}^{48} \leq V_{u.set} \quad (5.34)$$

$$M^{i,t} \in \{0, 1\} \quad (5.35)$$

$$\sum_{i=0}^5 M^{i,t} = 1, t \in T \quad (5.36)$$

$$M^{0,t} = 1, t \in K \quad (5.37)$$

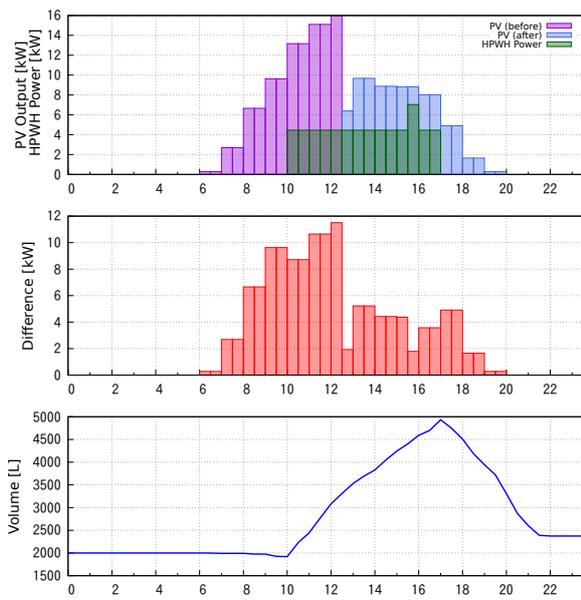
$$i = \{0, \dots, 5\} \quad (5.38)$$

$$T = \{m, \dots, 48\} \quad (5.39)$$

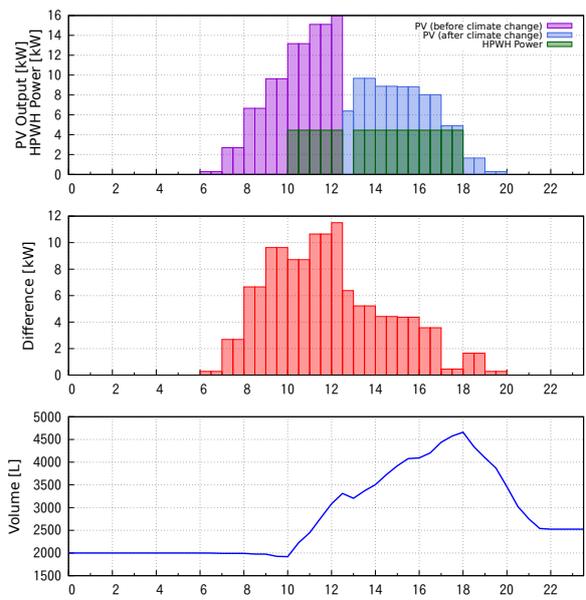
$$K = \{k = \mathbb{Z} | m \leq k \leq 18, 36 \leq k \leq 48\} \quad (5.40)$$

上記の MIP を用いて、各天気急変における HPWH の運転計画の再計画を行った。HPWH が再計画による運転計画通りに運転と元の運転計画通りに運転という二つの場合の 1 日中の受電点電力変動をシミュレーションし、結果を比較した。シミュレーションでは、初期湯量を 2000L とし、給湯需要が 2017 年のその日の給湯需要を使用した。また、9 時以前 PV の出力が少ないため、元の PV の出力による運転計画でも HPWH が稼働しない時が多い。そのため、本研究では天気急変が発生した際に最も PV の出力変動が激しい正午 (12 時半) を急変開始時間として検討した。晴れ→曇り、晴れ→雨、晴れ→晴れ時々曇り、曇り→晴れ、曇り→雨、雨→晴れ時々曇りの元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較を図 5.16～図 A.2 に示す。紫色の柱状図は元の PV の出力、青色のは天気急変の後の PV の出力、緑色のは HPWH の消費電力、赤色のは受電点電力である。線図にタンク内の湯量の変化を示す。なお、他の天気急変における HPWH 運転の比較については付録に収録した。

表 5.4 に各天気急変における運転計画の再計画の効果をまとめた。元の PV の出力が多い場合では、再計画による HPWH の運転は元の計画による HPWH の運転と比べて、かなり受電点電力変動を抑えられることが分かった。逆流の場合はもちろん、順潮流となった場合でも、受電点電力を一定範囲内に保持できたことを確認した。しかしながら、元の PV の出力が少なく、一台の HPWH の省エネ運転モードの消費電力より少ない場合、元の運転計画では、昼間に一台の HPWH を省エネ運転モードで運転させるという傾向がある。加えて、省エネ運転モードの生成湯量が少ないため、HPWH の運転開始時間も他の場合より早いという傾向もある。そのため、午後に天気急変が発生した際に、貯湯タンクの中にすでに多くのお湯が貯められ、再計画による運転計画でも、一台の HPWH が省エネ運転モードで運転という状態を保持するだけである。この場合、再計画による運転計画の効果が軽微であると言える。雨の日のような PV の出力が少ない日では、再計画する必要がない可能性があることが分かった。

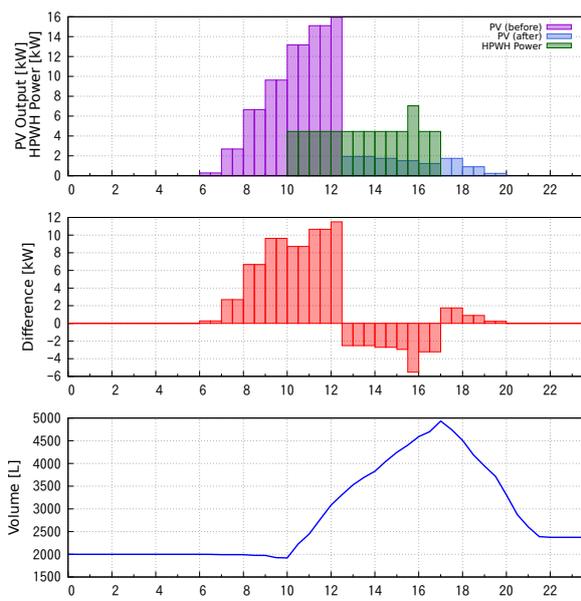


(a) 元の運転計画で運転する場合

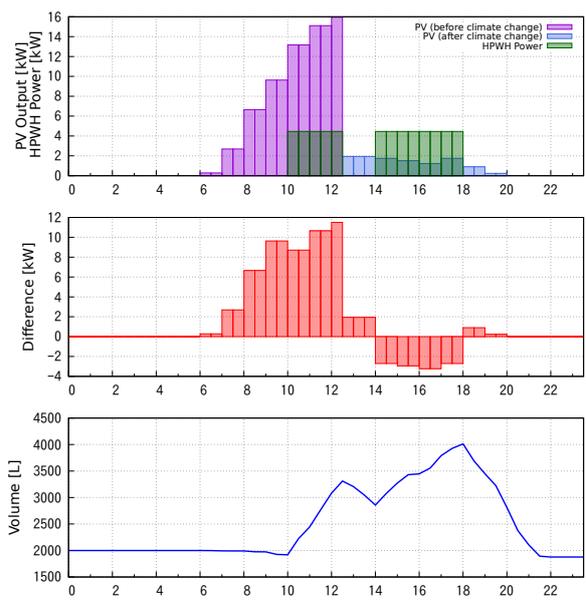


(b) 再計画の運転計画で運転する場合

図 5.16: 12 時半に晴れ→曇りにおける元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較

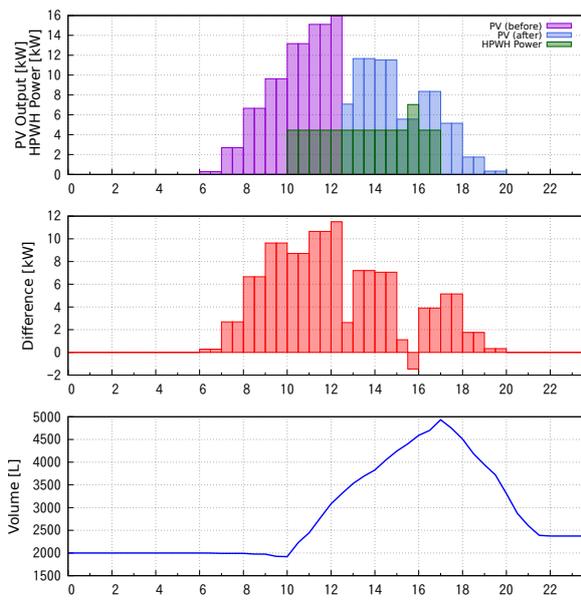


(a) 元の運転計画で運転する場合

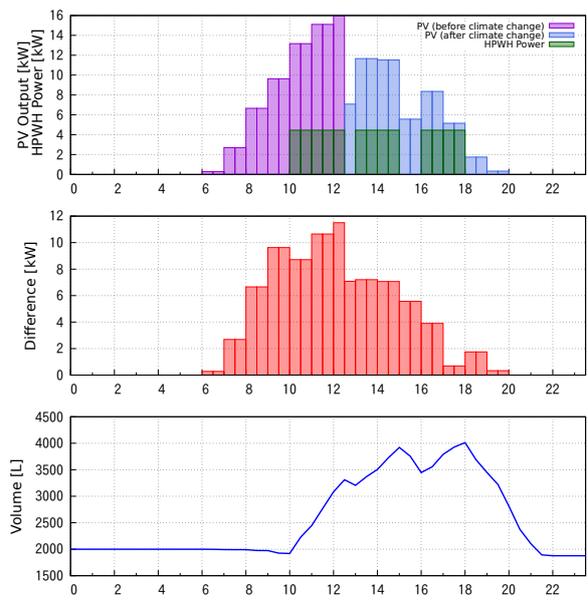


(b) 再計画の運転計画で運転する場合

図 5.17: 12 時半に晴れ→雨における元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較

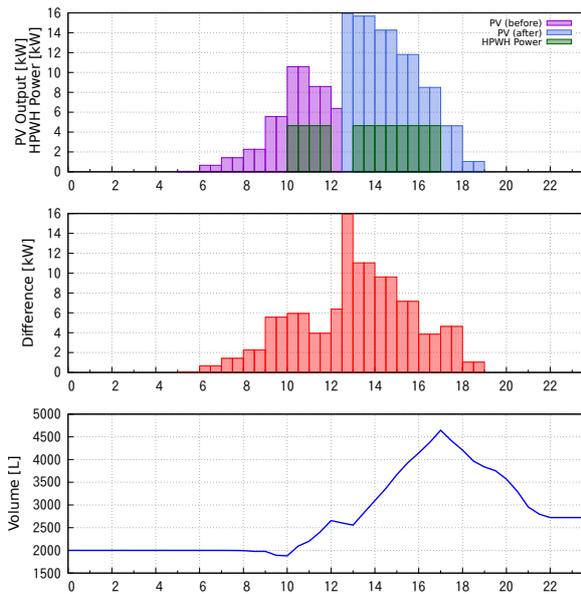


(a) 元の運転計画で運転する場合

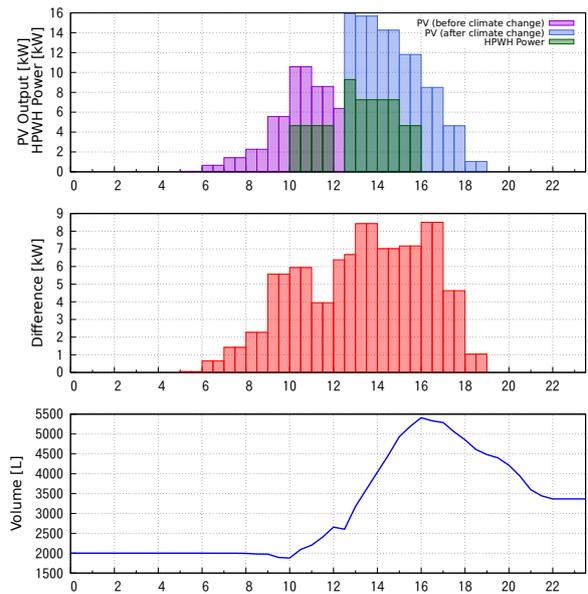


(b) 再計画の運転計画で運転する場合

図 5.18: 12 時半に晴れ→晴れ時々曇りにおける元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較

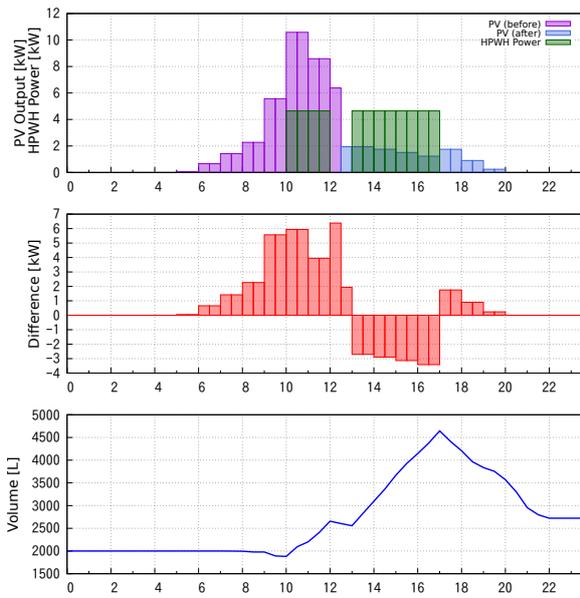


(a) 元の運転計画で運転する場合

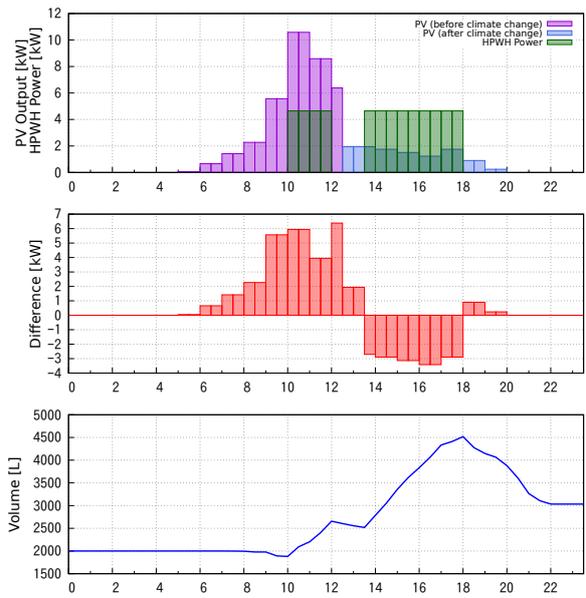


(b) 再計画の運転計画で運転する場合

図 5.19: 12 時半に曇り→晴れにおける元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較

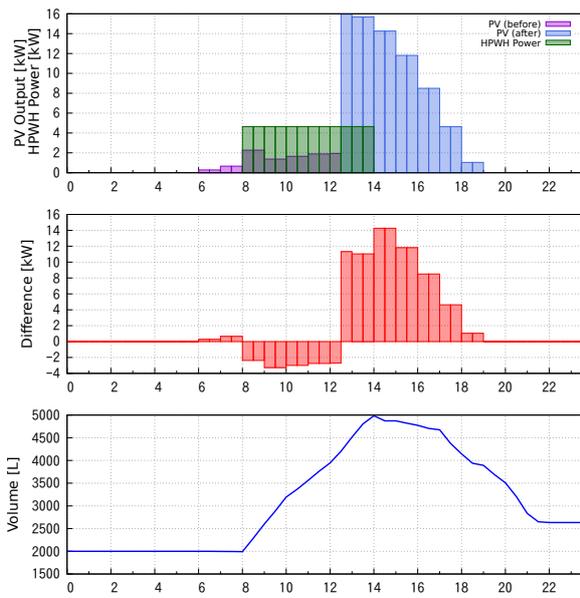


(a) 元の運転計画で運転する場合

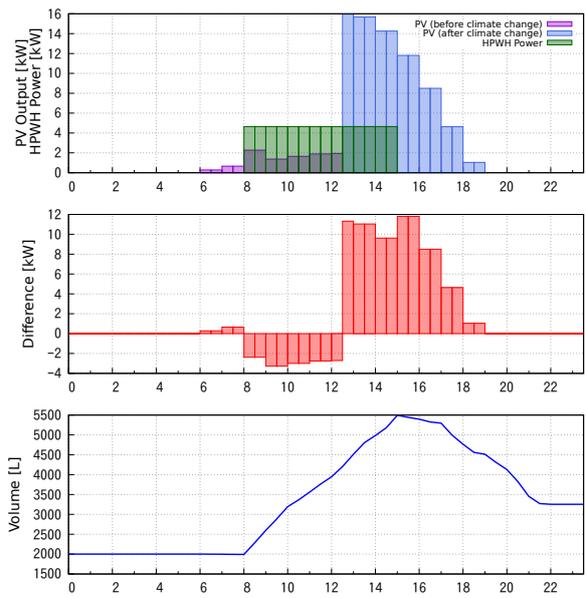


(b) 再計画の運転計画で運転する場合

図 5.20: 12 時半に曇り→雨における元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較



(a) 元の運転計画で運転する場合



(b) 再計画の運転計画で運転する場合

図 5.21: 12 時半に雨→晴れにおける元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較

表 5.4: 各天気急変における運転計画の再計画の効果

Before \ After	晴れ	曇り	雨	晴れ時々曇り
晴れ		効果あり	効果あり	効果あり
曇り	効果あり		効果あり	効果あり
雨	効果なし	効果なし		効果なし
晴れ時々曇り	効果あり	効果あり	効果あり	

5.5 本章のまとめ

本章では、受電点電力変調整手法について検討した。受電点電力変動を抑制するため、HPWHの運転をPVの出力変動に合わせることを考え、第4章で提案したクラスタリングの結果を用い、MIPによるHPWHの運転最適化手法を提案した。その上で、第4章に示した予測外れによる湯切れへの対策を提案した。ベースケースなどのケースと比較することで、受電点電力の変動と湯切れ対策の効果を示した。最後に、天気急変によりPVの出力が大きく変動してしまう場合に対して、HPWHの運転計画の再計画を行った。再計画の効果は晴れ、曇り、雨、晴れ時々曇りの四つの代表的天気による組合せの天気急変を通じ、評価を行った。元のPVの出力が多い場合では、効果が顕著であることが分かった。

第6章 結論

6.1 本研究の成果

本研究では、太陽光発電や風力発電などの変動型再生可能エネルギーの導入拡大と需給調整市場の開設という現状を踏まえ、太陽光発電と業務用ヒートポンプ機器を利用した受電点の電力調整手法について、検討を行った。需要家からの逆潮流が調整力として需給調整市場に参入するためには、受電点における電力の変動幅がなるべく小さいことが望ましい。受電点へ流れる太陽光発電の余剰電力の変動を抑制するため、本研究では業務用ヒートポンプ給湯機を太陽光発電の出力と合わせるような運転計画を策定手法を提案した。

まず、ヒートポンプ給湯機の運転計画を策定するため必要な給湯需要の分析について先行研究の手法を参考しつつ、時間分割クラスタリングという新たな分析手法を提案した。先行研究に1日の累積給湯需要のベクトルでクラスタリングを行ったが、結果がベクトルの大きさに影響されたため、この結果を用いた給湯需要の予測は外れる可能性がある。また、太陽光発電の出力は主に昼間に発生しており、一方、多くの需要家の給湯需要が夜間に発生するため、太陽光発電の出力とヒートポンプ給湯機の給湯需要は時間的に一致しない場合が多い。太陽光発電の出力と給湯需要の時間特性の分析を行い、給湯需要は15時から顕著に急増することが分かった。そのため、15時という時点を境に1日を15時以前と15時以降という二つの時間帯を分割し、各時間帯の最終累積給湯需要でそれぞれk-means法によるクラスタリングを行った。各クラスター数における結果を比較し、運用上の有用性からクラスター数を4個と決定した。クラスター数が4個の際のクラスタリング結果により、対象日は月と曜日が分かれば、属するクラスターの平均値±標準偏差という範囲で各時間帯の累積給湯需要を概ね予測可能となった。また、貯湯タンクの容量限界を考え、運転の際に湯切れあるいは容量超過などのことが起きないように、タンク内累積湯量の推移範囲を採用した。二つの時間帯のそれぞれのタンク内累積湯量の範囲を組み合わせることで、運転計画最適化の際に必要な1日のタンク内累積湯量の範囲を獲得できる。

次は、先行研究から獲得された業務用ヒートポンプ給湯機の消費電力と加熱能力モデルと以上の解析から得られたタンク内累積湯量の範囲を用い、運転計画最適化手法を提案した。既知の太陽光発電の出力データを予測として、一日中のその出力とヒートポンプ給湯機の消費電力との差である受電点電力変動の和の絶対値を最小することを目的関数とし、タンク内累積湯量の範囲、運転時間、最終湯量などの制約条件をかけ、MIPによる運転計画の最適化について検討した。なお、給湯容量の予測外れに対して湯切れ対策を提案した。15時以前と15以降の二つの時間帯の累積給湯需要の実データを用いて、二つ時間帯の給湯需要と属するクラスターとの比率の関連性を調べ、一次近似を行った。その一次近似式を用い、15時以降の累積給湯需要を予測し、夜間に湯切れが発生するかどうか判断し、湯切れの恐れがある場合では、再計画することで、湯切れを回避するという方式を提案した。多くのケースで年間シミュレーションを行い、結果を比較することで、提案した受電点電力調整手法と湯切れ対策の有効性を示した。

最後に、天気急変が発生する場合、業務用ヒートポンプ給湯機の運転計画の再計画について検討した。代表的な天気である晴れ、曇り、雨、晴れ時々曇りの太陽光発電のプロフィールを利用し、組み合わせることで、天気急変の状況をシミュレーションを行い、再計画の効果を評価した。元のPVの出力は多い場合では、効果が顕著であることが確認された。

6.2 今後の課題

本研究では、検討対象が一つの需要家であるため、提案した手法を用い、受電点電力変動に対してどの程度の効果を与えることが確認されたが、調整力として需給市場へ参入するに容量が足りないというのは現状である。そのため、各需要家をアグリゲータすることで、群制御として、提案した手法で各需要家の受電点電力を調整し、安定な調整力を提供できるかどうかを検討する必要がある。

また、提案した手法の一般性について検討する必要がある。本研究では、制御対象が2台の業務用ヒートポンプ給湯機だけのため、提案した手法を用いて、家庭用ヒートポンプ給湯機などの他の制御対象あるいは、他の制御対象と合わせて複数種の機器を利用することで、受電点電力調整への有効性について検討する必要がある。

参考文献

- [1] 電力中央研究所:「2030年における再生可能エネルギー導入量と買取総額の推計」, 2020年3月
- [2] 経済産業省 資源エネルギー庁:「再生可能エネルギー政策の直近の動向」,https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/035_01_00.pdf (2021年12月閲覧)
- [3] 経済産業省 資源エネルギー庁:「エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネスに関するガイドライン」,https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/files/20171129001-1.pdf (2021年12月閲覧)
- [4] Simply Energy VPPx - Stage 3 Knowledge Sharing Report, ARENA,2021
- [5] Hledik et al.,(2019).The National Potential for Load Flexibility-VALUE AND MARKET POTENTIAL THROUGH 2030https://brattlefiles.blob.core.windows.net/files/16639_national_potential_for_load_flexibility_-_final.pdf (2021年12月閲覧)
- [6] Alstone, P.; Potter, J.; Piette, M.; Schwartz, P.; Berger, M.; Dunn, L., et al. (2021). 2025 California Demand Response Potential Study - Charting California's Demand Response Future: Final Report on Phase 2 Results. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [7] 三菱総合研究所:「諸外国におけるバーチャルパワープラントの実態調査」,https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H28FY/000583.pdf (2021年12月閲覧)
- [8] OpenADR 2.0 Demand Response Program Implementation Guide,OpenADR Alliance,https://www.openadr.org/assets/openadr_drprogramguide_v1.0.pdf (2021年12月閲覧)
- [9] 経済産業省 資源エネルギー庁:「逆潮流アグリゲーションの調整力としての活用」,https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/energy_resource/pdf/014_03_00.pdf (2021年12月閲覧)
- [10] 竹内悠:「給湯需要を考慮した業務用ヒートポンプ給湯システムの系統貢献運用手法の検討」, 東京大学, 修士論文,2017年
- [11] 田中大幹:「アグリゲーターからの指令と需要家利便性を考慮した業務用ヒートポンプ給湯機の運転計画策定手法の検討」, 東京大学, 卒業論文,2018
- [12] Young M. Lee, Raya Horesh, Leo Liberti,Optimal HVAC Control as Demand Response with On-site Energy Storage and Generation System,Energy Procedia,Volume 78,2015,
- [13] 中垣 和歌, 吉谷 尚久, 寺井 良太, 小澤 太亮, 沖野 健太, 草野 吉雅, 需給調整市場に向けた空調制御型ディマンドリスポンスにおける成功確率の解析と実環境での検証, エネルギー・資源学会論文誌, 2018, 39 巻, 2 号
- [14] 経済産業省 資源エネルギー庁:「自動車新時代戦略会議 中間整理」https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jidosha_shinjidai/pdf/20180831_01.pdf (2021年12月閲覧)

- [15] C. Develder, N. Sadeghianpourhamami, M. Strobbe and N. Refa, "Quantifying flexibility in EV charging as DR potential: Analysis of two real-world data sets," 2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2016, pp. 600-605
- [16] M. H. K. Tushar, A. W. Zeineddine and C. Assi, "Demand-Side Management by Regulating Charging and Discharging of the EV, ESS, and Utilizing Renewable Energy," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 1, pp. 117-126, Jan. 2018
- [17] 経済産業省 資源エネルギー庁:「令和2年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2021)」, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/index.html> (2021年12月閲覧)
- [18] A. Magerko, A. Huque, T. Hubert, A. Cortes and R. May, "Enabling Behind-the-Meter Distributed Energy Resources to Provide Grid Services," 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Chicago, IL, USA, 2019, pp. 2064-2071
- [19] HY Park and DC Kim, "The Introduction of Voltage Stabilization System according to the Increased DERs in KOREA," 2019.
- [20] A. Renjit, A. O'Connell, Van Zandt and B. Seal, "Evaluating the Value of DERMS: Methods and Mitigation to Increase Feeder Hosting Capacity" , 2019.
- [21] "Understanding DERMS" EPRI, Palo Alto, CA: 2018. 3002013049
- [22] 経済産業省:「令和2年度第3次補正予算の事業概要(PR資料)」, https://www.meti.go.jp/main/yosan/yosan_fy2020/hosei/pdf/hosei3_yosan_pr.pdf (2022年1月閲覧)
- [23] 電力中央研究所:「欧州における産業用ヒートポンプの市場概観と開発動向」, 2021年1月
- [24] ヒートポンプ・蓄熱センター:「高効率による省エネの進展」, <https://www.hptcj.or.jp/study/tabid/104/Default.aspx> (2022年1月閲覧)
- [25] ダイキン工業株式会社:「エコキュートのしくみ」, <https://www.daikinaircon.com/sumai/alldenka/ecocute/structure/> (2022年1月閲覧)
- [26] 日本冷凍空調工業会:「統計最新情報」, <https://www.jraia.or.jp/statistic/index.html> (2022年1月閲覧)
- [27] 三菱総合研究所:「定置用蓄電システム普及拡大検討会の結果とりまとめ」, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/storage_system/pdf/004_04_00.pdf (2022年1月閲覧)
- [28] 三菱電機株式会社:「エコキュート ラインアップ」, <https://www.mitsubishielectric.co.jp/home/ecocute/product/s/index.html> (2022年1月閲覧)
- [29] パナソニック株式会社:「エコキュート ラインアップ」, <https://sumai.panasonic.jp/hp/lineup/> (2022年1月閲覧)
- [30] 日立製作所:「エコキュート ラインアップ」, <https://kadenfan.hitachi.co.jp/kyutou/> (2022年1月閲覧)
- [31] ヒートポンプ・蓄熱センター:「令和2年度ヒートポンプ普及見通し調査」, https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/data0/press_topics/2020NewsRelease/news_release_siryo.pdf (2022年1月閲覧)
- [32] 東京都新島の気候 <https://weather.time-j.net/Climate/Chart/niijima> (2022年1月閲覧)
- [33] 新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO):「日射に関するデータベース」, <https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html> (2022年1月閲覧)

- [34] 新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO):「2030年のエネルギーミックスを模擬した電力系統の実証試験を開始へ」, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100754.html (2022年1月閲覧)

付 録 A 天気急変における異なるヒートポンプ給湯機の運転の運転計画による受電点変動の比較

第5章では、天気急変が発生した際に、HPWHの運転計画の再計画について検討し、晴れ→曇り、晴れ→雨、晴れ→晴れ時々曇り、曇り→晴れ、曇り→雨、雨→晴れ時々曇りという6つの過程における元の運転計画と再計画の運転計画によるHPWH運転の比較を示した。ここに、残った曇り→晴れ時々曇り、雨→晴れ、雨→曇り、晴れ時々曇り→晴れ、晴れ時々曇り→曇り、晴れ時々曇り→雨という6つのHPWH運転の比較を図A.1～図A.6に示す。

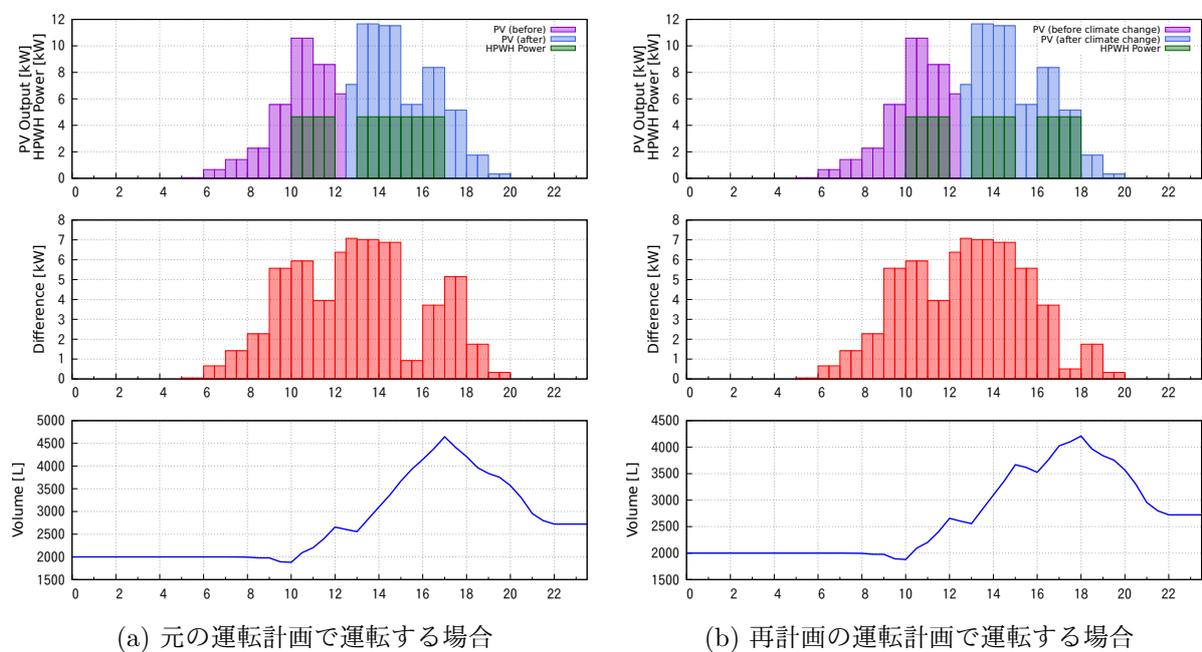
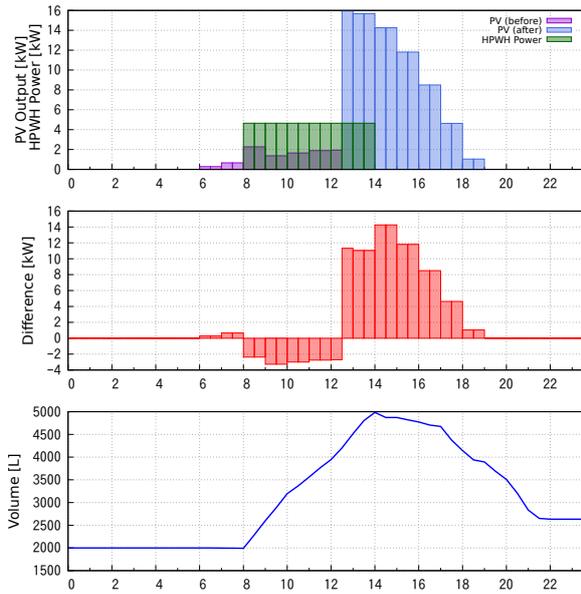
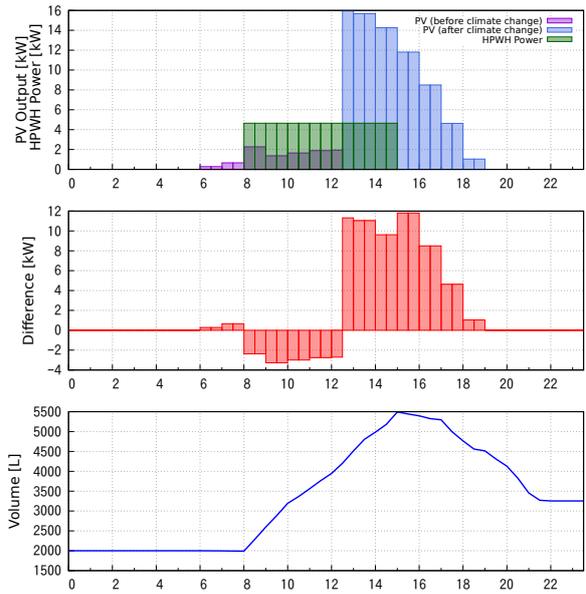


図 A.1: 12時半に曇り→晴れ時々曇りにおける元の運転計画と再計画の運転計画によるHPWH運転の比較

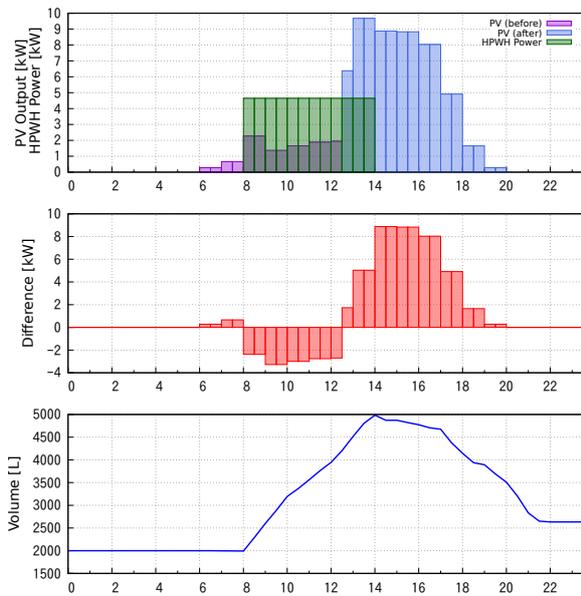


(a) 元の運転計画で運転する場合

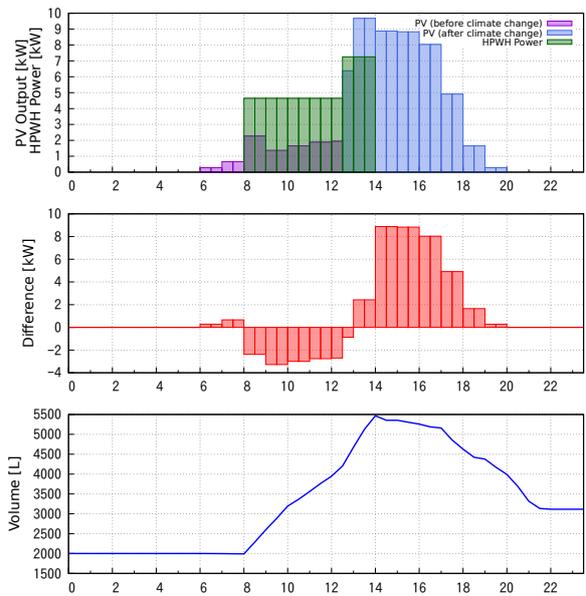


(b) 再計画の運転計画で運転する場合

図 A.2: 12時半に雨→晴れにおける元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較

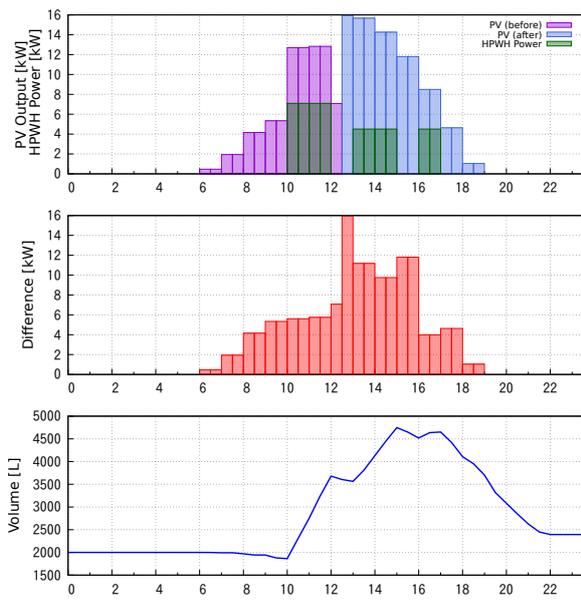


(a) 元の運転計画で運転する場合

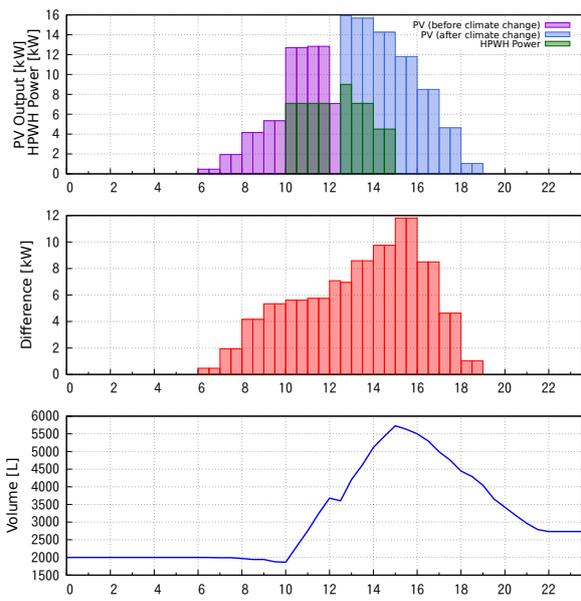


(b) 再計画の運転計画で運転する場合

図 A.3: 12時半に雨→曇りにおける元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較

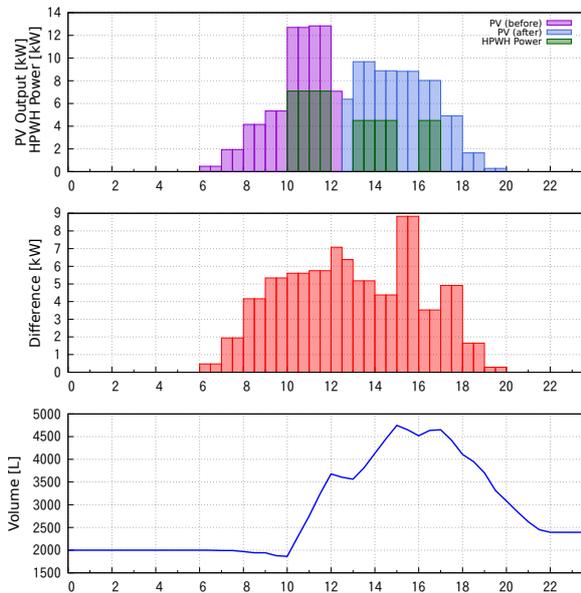


(a) 元の運転計画で運転する場合

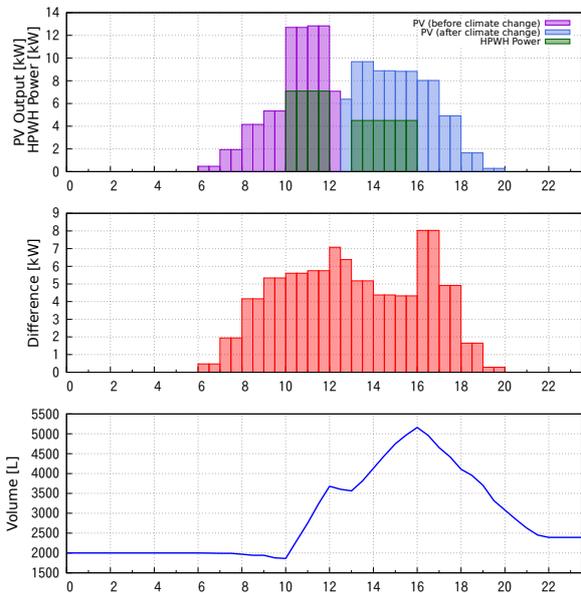


(b) 再計画の運転計画で運転する場合

図 A.4: 12時半に晴れ時々曇り→晴れにおける元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較

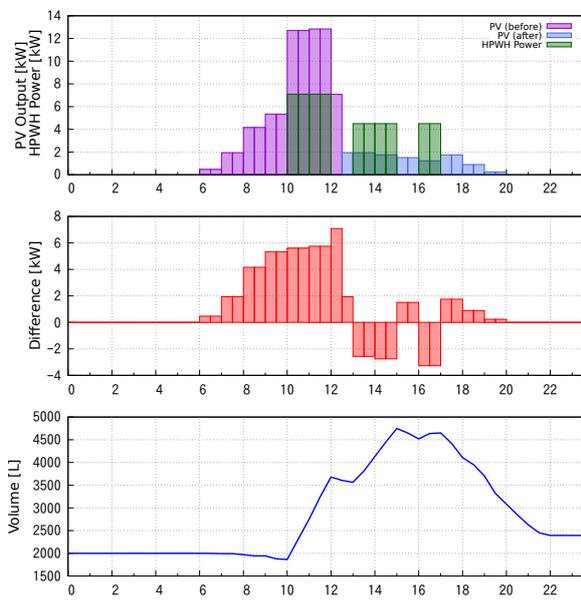


(a) 元の運転計画で運転する場合

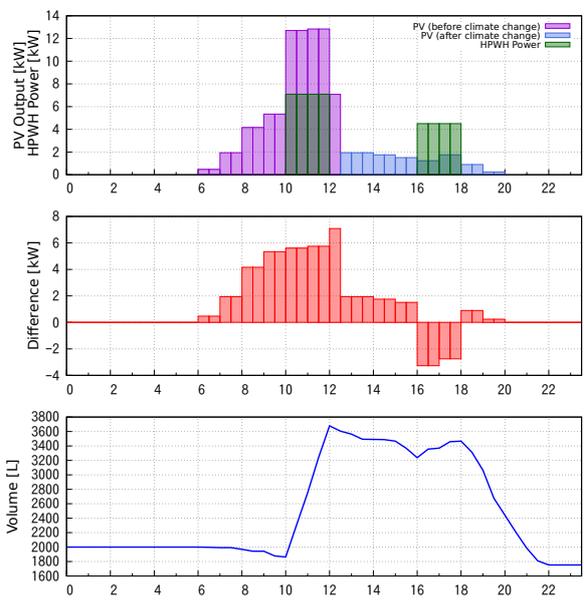


(b) 再計画の運転計画で運転する場合

図 A.5: 12時半に晴れ時々曇り→曇りにおける元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較



(a) 元の運転計画で運転する場合



(b) 再計画の運転計画で運転する場合

図 A.6: 12時半に晴れ時々曇り→雨における元の運転計画と再計画の運転計画による HPWH 運転の比較

発表文献

本論文に関する発表文献

1. 毛致森, 馬場旬平:「時間帯によりクラスターを分離した産業用ヒートポンプ機器を利用した太陽光発電出力変動補償手法の検討」, 令和4年電気学会全国大会, 令和4年3月(発表予定)

謝辞

本研究を行うにあたり、指導教員である馬場旬平教授には多大なるご指導いただき、大変お世話になりました。研究テーマの選定から本論文の作成に至るまで、お忙しい中でも研究の方向性を示していただいたり、懇切丁寧に多くの助言をくださったり、心より感謝しております。研究室の打ち合わせと日々の雑談において電力に関する多くのお話を伺い、不器用な私でも、様々の知見をいただき、電力について興味と理解がより深めることができました。就職後も馬場研究室にて学んだ知識と経験を活かしたいと思っています。改めて感謝申し上げます。

玉岡徳子氏には事務的なことから日々生活まで大変お世話になりました。片言の日本語しかできない私にでも、丁寧に接していただきました。おかげさまで鏡開きなどの日本の特有の行事を体験することができ、日本文化など様々なお話を伺えました。楽しい研究室生活を送り、日本語もうまく話せるようになりました。

博士課程の石川幸一郎氏、山田智之氏、箕津真一郎氏が社会人博士として仕事と学業を両立させる姿を敬服しております。また、打ち合わせで、研究に関するアドバイスを多くいただき、電力事業に関して色んな情報を提供していただき、異なる視点で研究を進めるようになりました。

卒業生の竹内悠氏と田中大幹氏に心より感謝しております。先輩方の論文における緻密な論理性から大変勉強になりました。先輩方の成果がなければ、私の研究も順調に進められなかったでしょう。

卒業生の榎谷大志氏、大淵崇弘氏、清水優孝氏、関野敬太氏には大変お世話になりました。榎谷氏は私のチュータであり、研究室に入った際、研究室について何もわからなかった私に丁寧に説明していただき、おかげさまで、じきに研究室に馴染みました。また、卒業後でも、私の就職活動のことを心配してくださって、何度も相談に乗ってくださった件に、心より感謝申し上げます。大淵氏は一緒に TA をやってくくださった際にも大変お世話になりました。うまく日本語で説明できなかった私にも、説明方法を教えてくださったり、休憩時間で就職についてもいろいろ教えてくださいました。清水氏は三菱電機の ES の添削の件にも大変お世話になりました。ご添削いただいた ES がなければ、自分の就職はさぞより困難だったでしょう。関野氏は席が隣だったこともあり、就職と研究に関して何度も貴重なアドバイスを下さいました。

修士2年の保坂将貴氏、曾希萌氏、劉曉熙氏にも大変お世話になりました。保坂氏はコロナ禍でなかなか会えなかったですが、オンラインで緻密な進捗報告から多くの刺激を受けました。曾氏の膨大な知識量に何度も驚きました。馬場研究室の同期ですが、留学の先輩として、電力からアイドル活動まで多くのことを教えていただき、非常に楽しい日々を過ごすようになりました。劉氏は同郷でもあり、馬場研究室に入ったばかりの際に何度も相談に乗って下さいました。コロナの中で美味しい料理を作っていただき、帰国できなくても、故郷の味を味わうことができたことに感謝しております。

修士1年の寺師彩俊氏、山口祐司氏、董昊坤氏にも大変お世話をしました。寺師氏、山口氏は TA の際にも、本論文の作成の際にも、何度もご助力いただき、大変感謝しております。日々非常に緻密な研究を行い、打ち合わせで発表していただいた内容についても、非常に勉強になりました。董氏には残念ながら、なかなか会えなかったですが、SNS で何度も面白いネタを提供していただいたり、研究の息抜きでも非常に楽しく過ごしました。また、ヒートポンプ組の同士として多くの知見をいただいた件も、感謝しております。早く日本へ入れるようにお祈り申し上げます。

卒論生の長坂英朗氏、松田響生氏は研究室の打ち合わせを通じて、多くのヒントを得ることができました。また、TA の際にお忙しい中ご助力いただき、ありがとうございました。

馬場研究室の皆様のおかげで、2年間楽しい生活を送ることができました。心より感謝申し上げます。

三年留学生生活を支えてくださった両親にも感謝申し上げます。コロナで二年帰国しなかった上で、日本で働くことを決めてしまったことに、この場を借りてお詫び申し上げます。

最後に私の留学生活と研究生活を支えてくださった全ての方々に改めて感謝の意を表し、皆様の今後のご発展とご活躍をお祈り申し上げます。