

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420892

研究課題名(和文)最適化手法に基づく複数住宅での温水需要予測技術とマネジメント技術の開発

研究課題名(英文) Development of hot water demand prediction and management technology with optimization a method for multiple residential dwellings

研究代表者

安芸 裕久 (Aki, Hirohisa)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・安全科学研究部門・主任研究員

研究者番号：70356343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、温水の融通・共有により高効率給湯器をより効果的に活用し、経済性、省エネルギー、環境負荷低減といった導入効果を最大化するためのマネジメントシステムの開発を行った。エネルギー需要予測手法を開発し、それを組み込んだ予測モデル、最適化モデル、逐次運用モデルの3つから構成されるエネルギーマネジメントシステムを開発した。需要予測手法としては、ボトムアップアプローチによる手法とサポートベクター回帰による手法とを開発した。実際の住宅のエネルギー需要を用いて運用シミュレーションを行い、性能を評価・検証した。

研究成果の概要(英文)：A management system was developed to maximize the introduction effects of high efficient water heaters such as economy, energy saving, and environmental impact mitigation by efficient utilization with hot water interchange or sharing. Energy demand prediction methods have been developed, and an energy management system that consists of the developed methods, an optimization model, and a real-time operation model has been also developed. Two prediction methods based on a bottom-up approach and support vector regression were developed. The performance of the developed management system was evaluated by operational simulations with actual energy demand data.

研究分野：エネルギーシステム工学

キーワード：エネルギーシステム エネルギーマネジメント エネルギー融通 エネルギー需要予測 サポートベクターマシン 最適化

### 1. 研究開始当初の背景

近年、普及が進んでいる家庭用燃料電池コージェネレーションシステム (FC-CHP) や CO<sub>2</sub> ヒートポンプ給湯機 (CO<sub>2</sub>HP) といった高効率給湯器は、省エネルギーや二酸化炭素排出削減といった導入効果が期待されているが、課題もある。貯湯式給湯器であるため、翌日の温水消費量を予測し、予め温水を沸かし上げて貯湯槽に貯めて利用する。貯湯槽の温水がなくなる「湯切れ」防止のために、余分に沸かし上げておく必要があり、大きなエネルギー損失が生じる。FC-CHP は発電の際の熱を温水として活用することで高い総合効率を得られる。しかし、例えば夏期は温水消費が少なく、温水を活用できず、しばしば運転を止めざるを得ない。

貯湯式給湯器の温水沸かし上げ量や FC-CHP の運転最適化に関する研究は多く行われているが、そもそも、個々の住宅の温水消費は、季節や日々の変化が大きく、精度高い予測は現実的に不可能である。多くの世帯では入浴パターン (入浴時間帯や浴槽使用の有無など) の規則性は小さく、日々のばらつきが大きいことが、研究代表者らによる 4 年間に渡る実際の住宅での詳細な温水消費計測の結果より明らかになっている。

複数の住宅で温水を融通・共有することで、上の問題を解決できる。翌日の温水消費予測の際、複数住宅の消費量合計値を予測する方が、各戸の消費量を予測するよりも精度が高く予測できる。湯切れの際に他の住宅から融通を受けられるため、余分な沸かし上げも不要となる。また、給湯器の種類は住宅によって様々であり、温水の融通・共有により、異なった給湯器の特徴を生かした運用が可能となる。

温水の融通・共有を実現するためには、複数の住宅における計画的かつ最適な機器運用が必要となる。予め複数の住宅の温水消費を予測し、その上でそれらの住宅の温水消費を賄う最適な機器運用計画を立案する。さらに当日は実際の温水消費に合わせて、リアルタイムに機器の制御を行いながら、逐次運用計画を修正していく。それらの機能をもったエネルギーマネジメントシステムが必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、温水の融通・共有により高効率給湯器をより効果的に活用し、経済性、省エネルギー、環境負荷低減といった導入効果を最大化するためのエネルギーマネジメントシステムの開発を行った。具体的には、エネルギー需要予測手法の開発およびそれを組み込んだ予測モデル、最適化モデル、逐次運用モデルの 3 つから構成されるエネルギーマネジメントシステムを開発した。

### 3. 研究の方法

本研究では、エネルギー需要予測手法の開

発と、それを組み込んだ予測モデル、最適化モデル、逐次運用モデルの 3 つから構成されるエネルギーマネジメントシステムのモデルを、電計算機上に構築し、実際のエネルギー需要を用いて検証を行った。

エネルギー需要予測手法の開発では、研究代表者が保有する住宅のエネルギー需要データ (電気・温水、6 戸、2 秒間隔、4 年間) を解析し、温水消費行動の頻度や発生時刻、過去のエネルギー消費実績とエネルギー消費行動や各種環境要因との相関を調べた。実際の手法の開発に当たっては、温水消費行動を積み上げていく方式と統計分析を用いる方式の 2 つのアプローチを用いた。

エネルギーマネジメントシステムのモデルについては、予測手法をベースにした予測モデル、エネルギーシステムを機器特性等の制約を考慮して数理計画問題として定式化した最適化モデル、および最適化モデルの計算結果やエネルギー需要を入力としてロジックに従って機器の制御やエネルギー需給を計算する逐次運用モデルを構築した。実際のエネルギー需要を用いて運用シミュレーションを行って、予測手法やシステムの性能を評価した。

実際の住宅のエネルギー消費を再現する実験設備に、CO<sub>2</sub>HP 実機や FC-CHP の熱回収を模擬する装置を組み込んだ実験設備を構築し、エネルギーマネジメントシステムの動作と効果の検証を試みた。

### 4. 研究成果

本研究では、住宅のエネルギー需要予測技術と、それを実装した、予測モデル、最適化モデル、逐次運用モデルの 3 つから構成されるエネルギーマネジメントシステムを開発した。

#### (1) 住宅のエネルギー需要予測技術

本研究課題で想定しているエネルギーマネジメントシステムでは、前日に、翌日のエネルギー需要予測を行うことから、まず、電気と温水の需要予測技術を開発した。当初は、温水需要のみの予測技術を開発する予定であったが、研究が順調に進んだため、電気についても対象に含めた。

温水については、温水消費行動分析に基づくボトムアップ予測手法と、サポートベクター回帰 (SVR) を用いた手法の、2 つの手法を構築した。いずれについても、研究代表者が保有する住宅のエネルギー需要データ (電気・温水、6 戸、2 秒間隔、4 年間) を解析し、過去のエネルギー消費実績と、エネルギー消費行動や各種環境要因との相関を調べた。

ボトムアップ予測手法は、主要な温水消費行動である、湯張り (浴槽への湯の注入)、追炊 (浴槽の湯の加温)、その他 (シャワー、台所など、「一般給湯」と呼ぶ) について、各行動の湯無・発生時刻および行動一回当たりの消費量を予測することで、温水需要を予測するものである。湯張りは、世帯や季節に

よって頻度自体が大きく異なるが、一回当たりの温水消費量は予め決められている。追炊は、湯張りが行われた場合のみ発生し、湯張り後の発生タイミングや温水消費量は過去データから予測がしやすい。一般給湯は、過去2週間程度のデータから一日の合計需要と時刻別発生割合とを用いて予測値を算出することとした。

サポートベクター回帰 (SVR) による予測モデルでは、過去データを解析し、気温、平日/休日などと温水消費量やその時系列変化特性との相関を調べ、予測のための影響因子の抽出を図った。その結果、過去の同時刻の温水消費実績、気温、平日/休日、在宅/不在宅が、比較的影響が大きいことがわかったため、それらを変数とした予測モデルを開発した。

## (2) エネルギーマネジメントシステム

予測モデルのほかに、最適化モデルと逐次運用モデルとを構築し、図1に示すエネルギーマネジメントシステムのモデルを構築した。

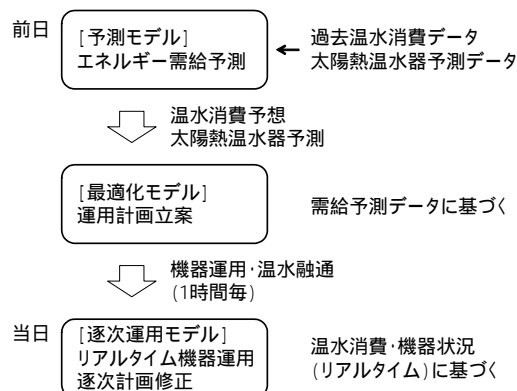


図1 エネルギーマネジメントのフロー

需要家のエネルギーシステムとしては、4戸の需要家にFC-CHP (固体高分子型 [PEFC] または固体酸化物型 [SOFC]) および/またはCO2HPを設置した場合を想定した。住戸間における電気・温水の融通や共同利用も想定した。具体的には、4戸すべてにFC-CHPを設置した場合 (図2)、2戸にのみFC-CHPを設置して残りの2戸にはガス給湯器のみを設置した場合、FC-CHPとCO2HPを2戸ずつ設置した場合、4戸に対して大型の貯湯槽を1台とFC-CHPを4台設置した場合や1台をCO2HPに換えた場合、さらにはFC-CHPとして、PEFCとSOFCのいずれかを用了場合の他に、両者を組み合わせた場合、など多様な場合を想定した。住戸間における温水融通の有無や貯湯槽の容量についても、様々な異なった想定を行った。逆流制約については、FC-CHPを設置した住戸からの逆流を不可とした場合、4戸の中では融通が自由であって4戸から外への逆流を不可とした場合、全く制限がない場合の3ケースを想定した。

需要家の経済性に影響を与えるエネルギー

一価格 (電気料金とガス料金) についても売買価格を含めて多様な想定を行った。電気料金については時間帯別料金の想定も行った。

最適化モデルでは、予測に基づいて機器運用計画を立案する。一時間毎の機器運用、住宅間の温水融通量、貯湯式給湯器が沸かし上げるべき温水量を決定する。モデルは混合整数計画問題とし、住民の意思を反映した最適化を行えるよう、多目的最適化モデル (経済性と省エネルギー性) とした。制約条件としては、FC-CHPやCO2HP給湯器の運転制約 (起動停止頻度、運転時間) や部分負荷効率、温水融通時や貯湯槽における放熱特性を考慮した。

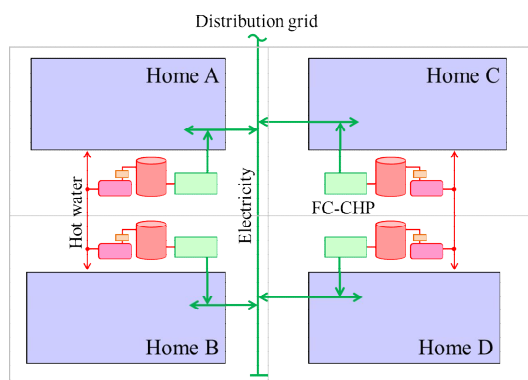


図2 エネルギーシステム構成の例

逐次運用モデルでは、運用計画に従って運用を行いながら、状況の変化に応じて運用計画を修正していく。具体的には、最適化モデルで求められた一時間毎のFC-CHPの発電量、CO2HPの沸かし上げ量 (貯湯槽における温水貯湯量) および温水融通量を満たすように、機器を運転し温水を融通するものとした。本研究では、実際のエネルギー需要を10分単位に変換したものを用了。また、時々刻々、変化していく貯湯量など機器の状況や温水消費状況により、需要予測や運用計画を見直す機能も実装した。

運用シミュレーションによる評価結果の例として、住宅4戸に対し、FC-CHPを2または4台設置した場合における、FC-CHP台数と温水融通可否の違いによる、年間エネルギー費 (4住戸合計) の違いを示したものを図3に示す。FC-CHPを2台設置し、温水融通を不可とした場合を基準とし、そこからのエネルギー費削減率を示している。NONはエネルギーマネジメントシステムを不用に成り行きで運用した場合、STDはエネルギーマネジメントシステムにより需要予測や運用計画を用了場合、OPTは需要が予め全てわかっているとした場合、である。この結果より、STDとOPTはNONよりエネルギー費が大きく削減されており、かつSTDとOPTには明確な差がないことから、開発したエネルギーマネジメントシステムはエネルギー費削減に寄与し、またほぼ最適な運用を実現したことがわかる。

### (3) 検証実験

最後に、実際の給湯機器から構成される実験設備を用いて、構築したマネジメントシステムの動作と効果の検証を試みるべく、実験設備の構築を行った。CO2HP に関しては、沸かし上げ量を制御できるように改造を行った。FC-CHP については、温水供給量を模擬できるように、貯湯槽と加熱装置からなる模擬装置を構築した。なお、エネルギー需要予測手法とエネルギーマネジメントシステムの開発において、当初目標よりも高い水準を達成するよう資源を配分したため、実験については、今後実施予定となっている。

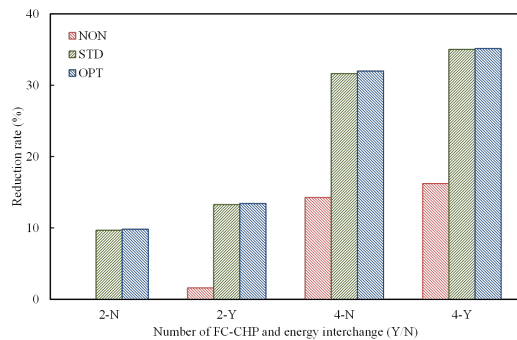


図3 運用シミュレーション結果の例

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

T. Wakui, H. Kawayoshi, R. Yokoyama, H. Aki, Operation management of residential energy-supplying networks based on optimization approaches, Applied Energy, 183, 340-357, 2016, DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.171, 査読有.

H. Aki, T. Wakui, R. Yokoyama, Development of an energy management system for optimal operation of fuel cell based residential energy systems International Journal of Hydrogen Energy, 41, 20314-20325, 2016, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.079, 査読有.

H. Aki, T. Wakui, R. Yokoyama, Development of a domestic hot water demand prediction model based on a bottom-up approach for residential energy management systems, Applied Thermal Engineering, 108, 697-708, 2016, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.07.094, 査読有.

[学会発表](計13件)

H. Aki, T. Wakui, R. Yokoyama, Optimum Management of Fuel Cells in a Residential area by Integrated-Distributed Energy Management System (IDEMS), Proceedings

of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conferences (ISGT 2016), Minneapolis(USA), 7 Sep. 2016.

T. Wakui, H. Kawayoshi, R. Yokoyama, H. Aki, Optimal Operational Management of Residential Energy Supply Networks with Power and Heat Interchanges. Proceedings of The 29<sup>th</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2016), Ljubljana(Slovenia), 22 Jun. 2016

H. Aki, I. Iitaka, T. Wakui, R. Yokoyama, H. Kawayoshi, Domestic hot water demand prediction by bottom-up approach for energy management systems, Proceedings of Microgen IV, University of Tokyo(Tokyo), 29 Oct. 2015

T. Wakui, R. Yokoyama, H. Kawayoshi, I. Iitaka, H. Aki, Operational Management of Residential Energy Supply Networks Based On Optimization Approaches, Proceedings of The 28<sup>th</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2015), Pau(France), 2 Jul. 2015

涌井 徹也, 沢田 健人, 横山 良平, 安芸 裕久, 最適化手法を用いたエネルギー供給ネットワークの運用マネジメント(2段階多目的最適化に基づく運用マネジメント), 第33回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, エネルギー・資源学会, 砂防会館(東京), 2017年2月2日.

安芸 裕久, 涌井 徹也, 横山 良平, エネルギー融通と時刻別電力料金適用下におけるエネルギーマネジメントシステムによる住宅エネルギー機器の最適な運用の実現, 第35回エネルギー・資源学会研究発表会, 大阪国際会議場(大阪), 2016年6月6日.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

安芸 裕久 (AKI, Hirohisa)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・安全科学研究部門・主任研究員

研究者番号: 70356343

(2)研究分担者

涌井 徹也 (WAKUI, Tetsuya)

大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 40339750

横山 良平 (YOKOYAMA, Ryohei)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70158385