

消費電力予測に基づく家庭内機器制御技術の開発および実証

Development and Demonstration of Home Energy Device and Appliances Control Technology Based on Prediction of Power Consumption

寺内 真恒* 北浦 嘉浩* 伊藤 彰規* 佐々木 崇水* 長谷川 隆生*

Masatsune Terauchi Yoshihiro Kitaura Akinori Itoh Takamizu Sasaki Takao Hasegawa

大谷 昌弘* 海木 延佳* 金森 謙* 梅本 哲正* 福島 隆史*

Yoshihiro Ohtani Nobuyoshi Kaiki Yuzuru Kanemori Akimasa Umemoto Takashi Fukushima

有限な化石燃料の利用を控え、持続可能な再生可能エネルギー源に切り替えていく動きがある一方で、不安定な自然エネルギー源が大量に導入されると電気事業者だけで電力需給バランスを取ることが困難となる問題がある。そこで電気事業者が各家庭に対して電力消費に関する要求を出し、各家庭においてHEMSが蓄電池や家電を自動制御する仕組みを構築してゆく必要がある。シャープは、電気事業者やユーザ自身により要求される電力・電力量・電気料金等の目標を達成するために、家庭内消費電力予測に基づいて家庭内機器（蓄電池・家電）を自動制御する実証を米国ニューメキシコ州および愛知県豊田市において行ったので報告する。

Electric utilities will face a difficulty in balancing supply and demand due to unstableness of renewable sources to which they are shifting away from fossil fuels, when they are introduced in large volume, in a move towards a sustainable society. Thus, a mechanism is required where HEMS automatically controls household power storage and home appliances in individual houses in response to requests sent from electric utilities.

This paper reports on Sharp's demonstration projects in New Mexico, U.S. and Toyota city, where HEMS automatically controls household equipment based on the prediction of power consumption of the house to meet target values for power and energy, or monthly electricity bill in accordance with electric utilities' and the consumers' requests.

1. はじめに

先進国の経済や生活は成熟度が高まり、途上国においても経済拡大が進んでいるため、世界レベルで見たエネルギー消費量は年々増加している。現在の世界のエネルギー源は、石油、石炭、天然ガス等の化石燃料に大きく依存しているが、これらはいずれも何億年もかかって作られた有限の資源であり、いずれは枯渇すると考えられている¹⁾。またこれらの化石燃料は使用時に二酸化炭素を排出するため、地球温暖化を進行させ、異常気象・海面上昇・洪水・食糧不足等の問題を引き起こすことも懸念されている。このような課題を解決するために、化石燃料由来のエネルギーの利用を抑え、太陽光や風力などの再生可能な自然エネルギー源に順次切り替えてゆく試みが世界各国で行われている。

シャープは1959年より太陽電池の開発を始め、1994年には住宅用太陽光発電システムの商品化を行った。近

年では蓄電池・省エネ家電等のエネルギー関連商品とともに、これらの家庭内機器を統合管理するHEMS (Home Energy Management System) の開発も進めている。

2009年度の経済産業省のスマートハウス実証プロジェクト²⁾においては各家電機器から消費電力などの情報を収集・蓄積してテレビへ表示するとともに、エアコン・照明などの遠隔制御が可能なシステムを開発し、電力の見える化による節電効果について確認した。また、2011年度に堺エコハウス³⁾を建設し、センサ機器から得た情報に基づいて家電の自動制御を行う技術の実証実験に着手した。並行して2010年～2012年度に、けいはんなエコシティ⁴⁾における実証に参画し、人が居住する住宅の家電機器から収集した情報を分析。エネルギーを効率良く活用する家電の使用方法を検討した。そして2012年には個々の家電の消費電力をタップで測定することでユーザの節電行動に結びつける「電力見える化システム⁵⁾」の商品化を行った。

* エネルギーシステムソリューション事業本部 新規事業開発推進センター

しかし太陽光などの自然エネルギー源による発電は化石燃料と比べて安定した電力を作りにくいいため、電気事業者は発電と消費の需給バランス調整を従来よりも緻密に行う必要が生じる。これらの不安定な自然エネルギー源が大量に導入された場合には、電気事業者は自らの調整だけで電力需給バランスの調整を行うことが難しくなるため、各家庭のHEMSによる家庭内蓄電池制御や家電制御の助けを借りることで、うまく地域の電力需給バランスを取る仕組みを構築してゆく必要がある。

電気事業者が各家庭と協調して電力需給バランスを調整するための方法としては、各戸に対するデマンドレスポンス（以下DR）信号による消費電力抑制要求や、各戸の発電システムに対する発電抑制要求などの仕組みが考えられている。また電気料金単価を数時間ごとに切り変える多段階電気料金プランや、電力の需給状況に応じて電気料金単価をリアルタイムに切り替えるような電気料金プランなども将来的には出てくると考えられる。

一方、各家庭においてそのような複雑な仕組みのもとでユーザの手を介した家庭内エネルギー管理が行われることは期待できない。ユーザはHEMSに対して要求やポリシーのみを設定し、具体的な機器制御はHEMSに一任される形になっていくものと考えられる。

以上のような背景のもと、シャープは2010年から米国ニューメキシコ州における日米スマートグリッド実証（以下ニューメキシコ実証）および豊田市低炭素社会システム実証（以下、豊田市実証）に参画し、地域全体のエネルギー管理を統括するシステムからの要求に応じつつ、ユーザの快適性や利便性を考慮して家庭内機器の自動制御を行うHEMS技術の開発を行っている。本稿ではこれら2つの実証プロジェクトにおいて開発した家庭内機器制御技術の概要について説明する。

2. HEMSの制御指針

HEMSが家庭内の機器を自動制御する場合には具体的な指針が必要であり、HEMSはその指針に沿う形で機器制御を行う。一般的に考えられる具体的な指針としては以下のようなものが考えられる。

- (1) 短期的に電力を一定値以下に抑える制御
(例) 買電力を3kW以下に抑える
- (2) 長期に渡る電力量を一定値以下に抑える制御
(例) 1日の消費電力量を10kWh以下に抑える
- (3) 電気料金を最小化または一定値以下に抑制する制御
(例) 1ヶ月の電気料金を1万円以下に抑える

電気事業者等が地域全体のピーク電力需要の平準化を行う際には、各戸に対して(1)の電力抑制の形態でリ

クエストを出すのが一般的である。このようなリクエストに応じることでユーザは電気事業者等からインセンティブを得たり、リクエストに回答可能な設備を保有することで電気代の基本料金を抑えたりすることができるようになる。

いわゆる省エネ制御は(2)の電力量抑制に相当する。一般的な従量課金プランの場合には省エネを行うことがそのまま電気料金を削減することに繋がる。

電気料金の単価が時間帯によって変動するような場合は、1ヶ月の電力量が同じであってもどの時間帯で電気を使うかによって電気料金が変わるため、一般に(3)の制御は(2)の制御と一致しない。

ニューメキシコ実証と豊田市実証では以上の3つの制御について具体的な検討を行った。

3. 生活の快適性等を考慮した機器制御技術

前章で述べた電力・電力量・電気料金等の具体的な目標を達成するために家庭内機器（蓄電池・家電）を制御する具体的な方法は何通りも考えられる。しかし、例えば目標値を超えそうになってから全家電を停止するような制御方法はユーザの生活の快適性や利便性を著しく低下させてしまうため現実的では無い。そこで両実証では、過去の生活パターンから家庭内消費電力を予測し、先を見通した適切な家庭内機器制御を行うための技術開発を行った。

ニューメキシコ実証では1軒の実証宅において居住者の生活を想定したパターンに基づいて家電を擬似的に動作させた上で、電気料金最小化・DR（デマンドレスポンス）信号受信時の家庭内消費電力削減を実現するための蓄電池・家電の制御技術の開発に取り組んだ。一方、豊田市実証では実際に居住者が生活する複数の実証宅において、月間使用電力量の上限目標達成・DR信号受信時の家庭内消費電力削減を実現するための家電制御技術開発に取り組んだ。

4. ニューメキシコ実証

4.1 概要

当実証では、太陽光発電パネルと蓄電池、ヒートポンプ給湯器、スマート家電等の家電機器、リアルタイムプライシングに対応したスマートメータ、宅内・宅外通信システムを有するスマートハウスを米国ニューメキシコ州ロスアラモス郡に構築した。タイムプライシング情報やDR信号に対して、快適性・利便性を大きく損うことなく経済性を確保するHEMSの検討を行い、実証実験を2012年9月から2014年3月まで行った。本実証におけるスマートハウスの外観を図1に示す。



図1 スマートハウス外観
Fig.1 Overview of the smart house.

スマートハウスは、シャープが開発を担当する HEMS とスマート家電に加え、共同で実証を行う他社が担当する温湿照度・人感・電力の各センサ、スマートメータ、太陽光発電パネル、蓄電池、ハイブリッドコントローラ、スマートゲートウェイ、スマートサーバで構成される。本実証におけるスマートハウスの構成を図2に示す。

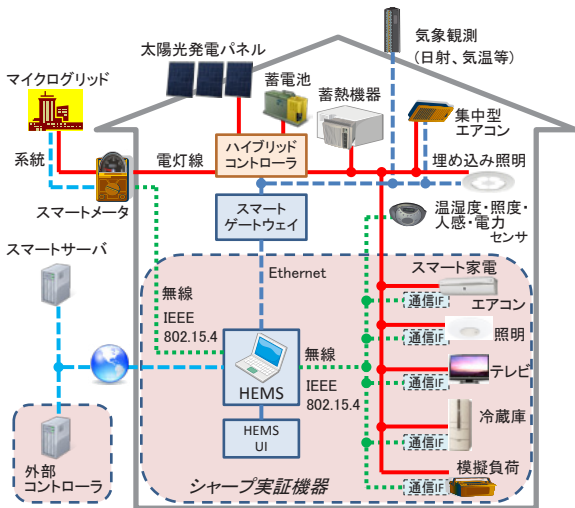


図2 スマートハウス構成
Fig.2 Diagram of the smart house.

スマートメータからは、リアルタイムプライシング情報（当実証では30分毎に売電/買電料金単価が変化：最大6段階）やDR信号などを受け取る。スマートゲートウェイからは、太陽光発電パネル、蓄電池、給湯器、系統電力などの情報を取得する。スマートサーバからは、気象予測データなどを受け取る。

また米国一般家庭の居住者を想定した生活パターンに基づいてスマート家電を制御することでユーザによる家電などの使用状態を擬似的に再現する。

4.2 HEMSの開発

HEMSはユーザの快適性を維持しつつ、スマートメータからのリアルタイムプライシング情報や、電力削減指示といったDR信号に応じて家庭内の蓄電池とスマート家電の最適な制御・運転を行う。

ハウス内の各機器との通信・情報取得・制御などの動作を行うHEMSソフトウェアには以下の2つの制御シ

テムと3つのアルゴリズムが含まれる。本稿ではこれらについて解説する。

- a) 電気料金を最小化する蓄電池制御
 - ・消費電力予測アルゴリズム（4.3節）
 - ・蓄電池制御アルゴリズム（4.4節）
- b) 消費電力をDR要求値以下に抑える家電制御
 - ・家電制御アルゴリズム（4.5節）

4.3 消費電力予測アルゴリズム

消費電力予測アルゴリズムでは、1日分（30分を1区分とした0:00から23:59までの合計48区分）の家庭内の消費電力量を予測する。

本予測では過去の消費電力量実績と気温を説明変数とした重回帰分析を用いた。消費電力量予測の正確さ（精度）を向上させるため、消費電力情報は過去3日間の実績値、気温情報は当日予想値及び前日実績値を使用する。なおDR発生時は家電制御が実行されることで消費電力量の傾向が変わるため、そのような特異な時間帯のデータを排除することで予測精度を向上させた。当実証において得られた消費電力量予測値と実測値との絶対誤差を図3に示す。

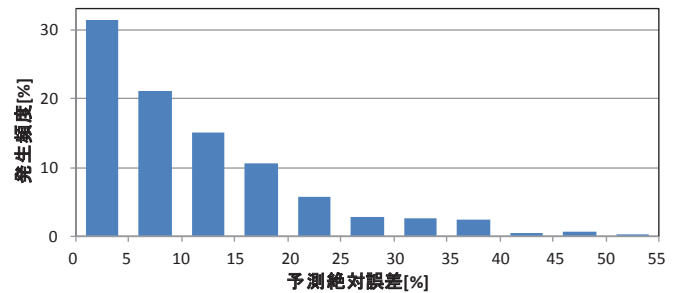


図3 予測絶対誤差の確率分布
Fig.3 Distribution of the prediction error.

また開発した消費電力予測アルゴリズムでは、直近の過去の消費電力量や気温のデータを使って予測するため、ある程度の学習期間を経ることで予測精度が向上することも確認した。

4.4 蓄電池制御アルゴリズム

蓄電池制御アルゴリズムでは、主に1日分（30分を1区分とした0:00から23:59までの合計48区分）の蓄電池充放電電力の計画を立案する。消費電力予測アルゴリズムで導出した消費電力量情報の予測結果およびスマートメータから取得した電気料金単価を用い、下式の1日の電気料金の総和（コスト）が最小になるように各時間区分における蓄電池の充放電量の最適値を探索する。なお太陽光発電による発電量は天気予報情報サービスから取得した日射量予測値を基に予測した。

電気コスト

$$= \sum_{i=1}^{48} \{ \text{単価}_i \times (\text{充放電量}_i + \text{消費量}_i - \text{発電量}_i) \}$$

i: 1日を30分ごとに区分した48区分の各時間帯番号
但し、電気料金の売り単価と買い単価は同じとする

開発したアルゴリズムによる蓄電池制御と、一般的な蓄電池制御（買電単価が最も安い時間帯に最大充電し、売電単価が最も高い時間帯に最大放電する）とのコスト比較結果を図4に示す。図における2本の線は冬季2週間における各充放電計画での1日の累積電気料金計画値である。今回の機器運転計画アルゴリズムの方が2%~10%ほど低コスト化できることを確認した。

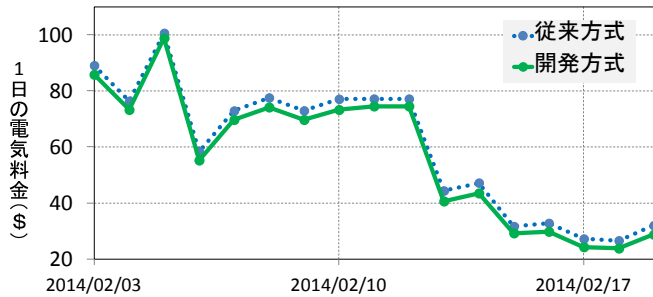


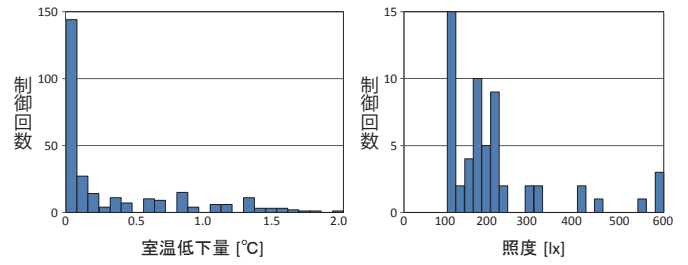
図4 蓄電池充放電手法による電気料金の比較
Fig.4 Comparison of the electricity cost.

4.5 家電制御アルゴリズム

DR信号受信時に必要に応じてスマート家電（エアコン、冷蔵庫、照明、テレビ）の制御を実施するための家電制御アルゴリズムを開発した。当アルゴリズムは、系統から電力削減指示（系統の余力が少なくなり、需要家の使用電力に制約を依頼する状態）を受信した場合に開始され、系統からの買電力を抑制する。

具体的には削減した買電力量を蓄電池からの放電により賄うことができるかどうかを判定するために、各時間区分における蓄電池放電量及び蓄電池残量を求める。各時間区分における蓄電池残量が蓄電池残量設定最小値を下回った場合、その下回った電力分を機器優先度に基づいた家電制御による消費電力削減で賄う。これにより、快適性への影響を最小限にとどめるような家電制御を目指した。

エアコンについては、DR要求に対応するためにエアコンの温度設定を変更する制御を行う。例えば冬季の場合には制御によって室温低下が発生するが、在室状態における室温低下は図5(a)に示すように2℃以内であり、快適性の低下に問題のない温度変化に抑えることができた。またLED照明については輝度を制御するが、図5(b)に示すように日常生活に問題のない照度（100 lx以上）を確保することが出来た。



(a) エアコンの温度制御 (b) LED照明の輝度制御

図5 DR時のスマート家電制御

Fig.5 Results of the smart appliance control in DR.

4.6 ニューメキシコ実証のまとめ

以上、米国ニューメキシコ州スマートハウスにおいて、快適性・利便性を考慮しつつタイムプライシング情報やDR信号に応じて蓄電池とスマート家電を制御するためのHEMSの検討・実証試験を行い、下記の成果を得た。

- ・電気コスト最小化機能を有する蓄電池制御アルゴリズムを開発し、一般的な蓄電池制御よりも、2~10%のコスト削減が可能であることを確認できた。
- ・DR信号受信時に蓄電池と家電を制御するアルゴリズムを開発し、快適性が維持できることを確認した。

5. 豊田市実証

5.1 概要

豊田市では2020年頃の社会を想定し、太陽光などの再生可能エネルギー源の導入、及び創エネ・省エネ・蓄エネ機器の普及が進んだ環境下での地方都市型低炭素社会システム実証を、実際に人が居住する都市・実証住宅で行っている。本実証においてシャープはHEMSの一部である家電機器制御システムの開発を推進中である。

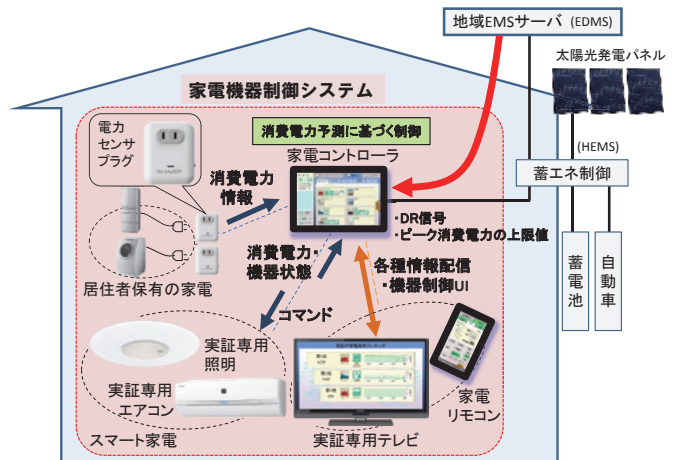


図6 豊田市実証の家電機器制御システム

Fig.6 Diagram of the appliance control system.

家電機器制御システムは、共同で実証を行う他社が担当する地域EMSサーバや蓄エネ制御部と連携して実証住宅の個々の家電の消費電力情報や機器状態情報を収集し、ユーザが設定した1カ月間の節電目標を超えないように家電を制御する。また地域EMSから取得した買電力の上限値やDR信号などに応じて家電の消費電力を抑制する制御を行い、系統からの買電力を低減する。

シャープは豊田市実証用の家電機器制御システムの開発を2010年9月に着手し、2013年1月にユーザが居住する実証住宅2棟で家電の自動制御に関する事前実証を開始した。また実証の関係各社と共同で地域EMSサーバと連携した実証実験を2013年12月から8棟の住宅で開始した。引き続き2014年夏季と冬季に家電の自動制御実証を行い、2015年2月に実証を完了する予定である。

5.2 消費電力量を一定値以下に抑える家電制御

家電機器制御システムは、ユーザが設定した1カ月間の節電目標を超えそうな時に家電機器の消費電力を抑制する制御を行うが、無計画に消費電力の抑制を行うとそれだけ快適性が損なわれることになる。そこでその家庭における過去の消費電力の傾向を学習し、当日の消費電力量を予測することで電力抑制を行うべきタイミングを適切に見極め、ユーザへの負担を軽減する。

例えば、午後に殆ど電力を消費しないという予備知識がある場合と無い場合を比較すれば、予備知識がある方が午前中の電力の抑制量を小さくできる。同様の制御を予測なしに行おうとしても残り時間の消費電力量が見込めないため適切な抑制制御を行えない可能性が高い。そのような不適切な家電制御はユーザの快適性を低下させるため、継続的に受け入れられるとは考えにくい。

収集した過去28日分の家庭全体の消費電力量情報から翌日の1日間の積算消費電力量の推移を予測した結果を図7に示す。前日に予測した積算消費電力量の推移と当日の実績値が概ね一致していることが分かる。

制御を実施する当日は、ユーザが事前に設定した節電

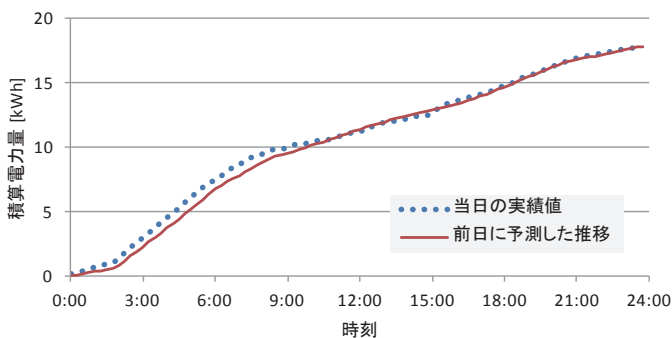


図7 家庭内の積算消費電力量の予測結果
Fig.7 Results of energy prediction.

目標と、前日に計算した消費電力量予測結果、当日の消費電力量の実績値情報から家電の消費電力を抑制する制御を行うかどうかを判定する。具体的な家電としてはエアコン・LED照明・テレビを導入しており、判定結果に従って家電の消費電力を抑制する制御を実施する。

実証住宅4軒においてユーザが設定した目標（電力量削減率0%～5%）に向かって1カ月間制御を行った場合の目標設定値に対する制御結果（電力量削減率）を図8に示す。ただし、0～5%の6値の目標設定値毎に同じ消費パターンで居住者が生活することは出来ないため、1カ月間の実証データを用いつつ制御結果はシミュレーションによって求めた。

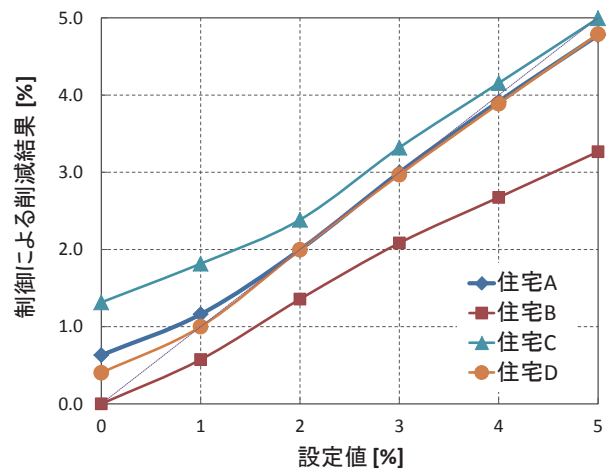


図8 設定した月間の節電目標に対する制御結果
Fig.8 Results of the appliance control.

図8の結果から、4軒ともに目標設定を高くすることで消費電力量の削減結果も高まっており、概ね設定値通りの制御結果が得られることが確認できた。しかし住宅Bについては設定した目標の削減率を達成できなかった。これは普段よりも多く電気を使用した日が月末に続いたため、抑制しきれなかったことが原因である。今後は実証によって得られた課題について制御方法の改良を行ってゆく予定である。

5.3 消費電力を一定値以下に抑える家電制御

本実証における家電制御システムは地域EMSサーバから提供される家庭毎の消費電力の上限値を超過しそうな時に家電の消費電力を抑制することによって地域全体のピーク電力需要の平準化に貢献する。この制御は5.2節の消費電力量を一定値以下に抑える制御と並行して実行する。

具体的にどの家電の消費電力をどれだけ削減すべきかについては家庭やユーザごとに異なるため、過去に蓄積した家電の状態情報や消費電力情報の学習結果から各家庭に適した消費電力削減制御を行う。また、ユーザが自

動制御を拒否したり家電の設定状態を元に戻したりするための手段を用意し、予期せぬ自動制御によって生活に支障が出ないように考慮した。

エアコンと照明の消費電力を抑制する制御実行後の消費電力の推移（のべ35回の抑制の平均値）を図9に示す。

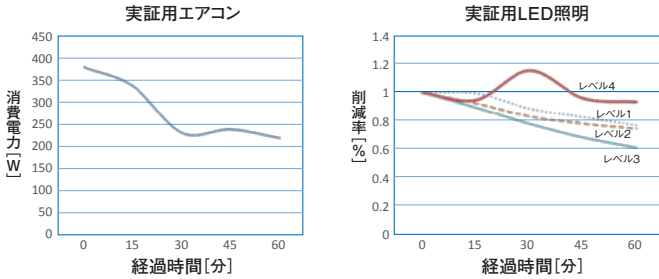


図9 電力抑制後のエアコンと照明の消費電力変化
Fig.9 Result of the power reduction control.

この例ではエアコン単体で39%の消費電力を抑制できた。一方、照明については抑制レベル4（最も輝度を抑制する制御）を行うと、かえって消費電力が増大することが分かった。これは照明が暗くなった後にユーザが不快を感じ、照明の輝度を上げてしまったためである。今後、実証を通してユーザが許容できる抑制レベル内で制御が行えるように調整する予定である。

5.4 ユーザの快適性評価

ユーザが感じた不快度の主観評価をアンケートにて実施した結果、図10のように（a）消費電力量を一定値以下に抑える家電制御よりも（b）買電力を一定値以下に抑える制御の方が、比較的不快感が少ないことが分かった。

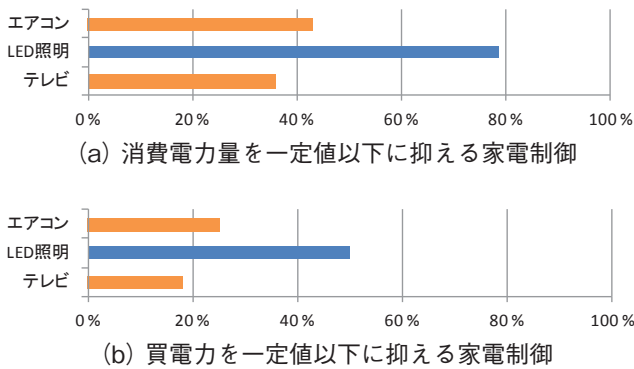


図10 ユーザが感じた家電制御の不快度
Fig.10 Discomfort index for the appliance control.

一般的に（b）の買電力を一定値以下に抑える制御では機器制御を実施すべきタイミングが限定されるため、生活の快適性や利便性が一時的に低下する可能性が高い。豊田市実証では買電力を一定値以下に抑えることで、

ユーザがインセンティブを得ることが出来る仕組みがある。今回の実証により、相応のインセンティブによってユーザの不快度が軽減できることが分かった。

5.5 豊田市実証のまとめ

消費電力予測に基づく家庭機器の制御を行うことで、ユーザの快適性や利便性を考慮しつつ、1ヶ月間の節電目標達成や地域全体のピーク電力の平準化を目的とした家電自動制御システムの実現性を検証することが出来た。引き続きシステムの実用化に向けてユーザの不快度を軽減するための開発および実証を行う。

6. 今後の展望

2年後の2016年には電力の小売り自由化が始まり、持続可能な再生可能エネルギー源への切り替えが本格化すると、多種多様な電気契約プランが次々に登場し、各家庭のHEMSとの間で複雑な情報交換が行われるようになると考えられる。各家庭においてHEMSはユーザから指定されたポリシー（電気代を安く抑える、ピーク電力を抑える、電力量を抑える等）と、電気事業者から受けたリクエストに従って、ユーザに代わって家庭内機器を自動制御するための必需品になるであろう。

2つの実証で開発した技術は正にその時代におけるHEMSに求められる技術になると考えられる。

参考文献

- 1) 新エネルギー財団. “化石燃料には限りがある”. New Energy Now. <http://www.nef.or.jp/enepolicy/sub01_02.html>. (2014-05-13)
- 2) 株式会社三菱総研. “平成21年度スマートハウス実証プロジェクト報告書”. 2010. 経済産業省, 第5章
- 3) 小樋英明他. “堺エコハウスの紹介”. シャープ技報103号, 2011, 103号.P.9-12
- 4) シャープ. “平成23年度及び平成24年度次世代エネルギー・社会システム実証事業成果報告（けいはんな）”. 一般社団法人・新エネルギー導入促進協議会. <http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/130626/130626_66.pdf>. (2014-05-13)
- 5) シャープ. “電力見える化システム”. シャープ. <http://www.sharp.co.jp/e_solution/mieruka/>. (2014-05-13)

ニューメキシコ実証の成果は独立行政法人・新エネルギー産業技術総合開発機構の委託業務によって得られたものである。また、豊田市実証の成果は一般社団法人・新エネルギー導入促進協議会の次世代エネルギー・社会システム実証事業の補助事業及び独立行政法人・新エネルギー産業技術総合開発機構との共同研究によって得られたものである。シャープは2つの実証をそれぞれ異なる人員・費用にて推進し、各実証における成果を共有することにより本論文を作成した。