

スマートタップネットワークによる 消費電力見える化システム

加藤丈和[†] 松山隆司^{††}

本稿では、家電の状態や電力を計測する「スマートタップ」とホームサーバから構成する「スマートタップネットワーク」を用いた家電の電力見える化システムと、見える化システムを実装したスマートマンションルームにおけるエコ生活実証実験について述べる。本システムでは、家庭内の全ての家電や照明の消費電力を個別に計測し、リビングのテレビとゲーム機を用いたインターフェースによって居住者にリアルタイムに提示することで、消費電力を見える化し節電を促すことができる。また、各スマートタップは家電認識機能を実装し、あらかじめ家電を接続する場所を固定しなくても、どこでどの家電を利用したかを自動で判別し、家電ごとの電力使用量を計測することができる。提案する見える化システムをマンションの一室に実装し、実際に生活して本システムの効果を実証した。

Electrical Power Visualization System based on Smart Tap Network

Takekazu Kato[†] and Takashi Matsuyama^{††}

This paper describes electrical power visualization system based on smart tap network. The smart tap network is an electrical power sensing and control network constructed by from Smart Taps (intelligent outlet with voltage/current sensor, signal processor and wireless communication). Our system monitor the power consumption for all appliances in a home and promotes saving electricity for the user. The function of appliances recognition is implemented on the smart-taps. We introduce the smart-tap network and visualization system to the apartment room and evaluate effectiveness of our system by real-life experiments.

1. はじめに

従来、電力ネットワークは大型発電所で生成した電力を工場・オフィス・家庭へと配送する、集中制御・一方向のトップダウン型のネットワークであったが、近年地球温暖化防止などの政策によって太陽光発電や風力発電などの分散電源が導入され、急速に分散化・双方向化、個人化が進められている。しかし、これらの分散電源は広く地域に偏在し、発電量が天候などの条件に左右されるため、従来のトップダウン型の制御技術で安定かつ効率的に電力を供給することは難しい。一方で、家庭やオフィスで使用される電力は増加の一途をたどり、また電気自動車の導入によって、新しいパターンの電力需要の増加が見込まれ、電力需給のバランスをコントロールし安定かつ効率的に利用するための新しいエネルギーインフラ技術が望まれている。

このような問題に対して、我々の研究グループでは、情報通信ネットワークと電力ネットワークの統合により、家庭・オフィス、さらには近隣コミュニティに配置される多様な分散型エネルギー生成・蓄積装置を効率的に管理運用するため新たなエネルギーマネジメント方式として、「エネルギーの情報化 1)」というコンセプトを提案し、研究開発を行っている。

エネルギーの情報化は、従来のトップダウン型の電力制御方式に対して、家庭・オフィスから近隣コミュニティへといった、需要家サイドから個々の家・オフィスの生活パターンに合わせた電力制御を行うボトムアップ型の電力マネジメント技術により、分散電源を含む電力の需給バランスをとりつつトータルの電力消費量の削減を目指している。

エネルギーの情報化の基盤技術として、個々の家電や分散電源の状態を把握し、かつ、電力コントロールを行う「スマートタップ」とそれらの協調技術としての「スマートタップネットワーク」の研究開発を行っている。スマートタップネットワークでは、単に個々の家電の消費電力の見える化や分散電源・蓄電装置の遠隔制御を行うのではなく、電力フローそのものの推定・制御や居住者の生活パターンの学習・認識技術により、太陽電池や蓄電池など異なった電源ごとに供給先を指定し電力フローを制御する電力の由来別制御、さらに電力需要と電力供給の適応的な調停を行うオンデマンド型電力ネットワークシステムなど、新しい電力マネジメントシステムの実現を目指している。

本稿では、「エネルギーの情報化」の第一ステップとして、スマートタップネットワークによる電力エネルギーの見える化システムについて述べる。

[†] 京都大学 学術情報メディアセンター
Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University

^{††} 京都大学 情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University.

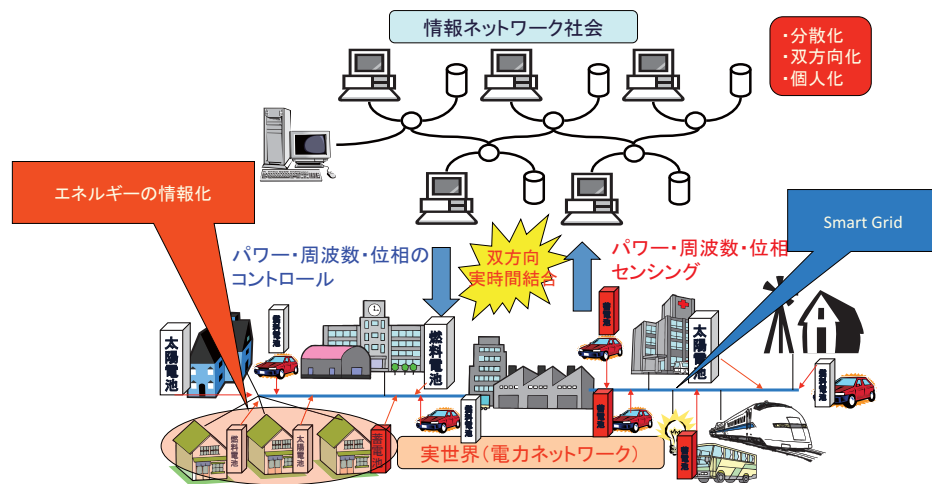


図 1 スマートグリッドとエネルギーの情報化

2. エネルギーの情報化のコンセプトと実現ステップ

2.1 スマートグリッドとエネルギーの情報化

エネルギーの情報化では、電力ネットワークと情報通信ネットワークを統合した、新しいエネルギーインフラの基盤を目指している。

近年、同様に情報通信ネットワーク技術の応用による電力ネットワークのスマート化として「スマートグリッド2」が提案され、米国を中心とした実証実験が進められている。スマートグリッドは、各家の電力メータをデジタル化、ネットワーク可することで、電力需要をリアルタイムに計測、収集、予測し、電力需要がピークとなる時にピークカットの要請を需要家に送信するデマンドレスポンスや、電力需給のバランスによってリアルタイムに電力価格を変動させるデマンドレスポンスなどの仕組みによって電力の需給バランスを保つ仕組みである。図 1 に示すように、言い換えれば、スマートグリッドは送電、配電網のスマート化を目指すものである。一方で、エネルギーの情報化では、需要家である家庭、オフィス、ビルなどのエネルギー・マネジメントを目的とし、地域に広げていくというボトムアップのアプローチを目指している。

各需要家が太陽光電池、蓄電池、EV などの分散型の発電、蓄電設備を備えるこれからの分散型、双方向型の電力ネットワークにおいては、需要家自身によるエネルギー・マネジメント技術が重要になり、このようなボトムアップアプローチによる新しいエネルギー・マネジメント技術が必要になると考えられる。

2.2 エネルギーの情報化を実現する 4つのフェーズ

我々は、エネルギーの情報化のコンセプトの実現のために、以下に示す 4つのフェーズに分けて研究開発や実証実験を進めている。

(1) フェーズ 1 : スマートタップネットワークによるエネルギー消費の見える化と人間行動の学習・見守り

フェーズ 1 では、家庭、オフィス、ビル内のあらゆる電気機器に電力センサと電力コントローラ、通信モジュールからなる「スマートタップ」を取り付け、消費電力を計測、収集、制御するためのスマートタップネットワークを構築する。これにより家庭における各電気機器の電力消費状況をリアルタイムに計測・分析・表示することが可能となり節電意識の向上が図れるだけでなく、プライバシーを損なうことなく生活者の行動パターンの学習、モニタリングができ、安全・安心のための見守り 4)., さらには電気機器の不具合の早期発見にも役立つ。

(2) フェーズ 2 : オンデマンド型電力ネットワークによる高度電力マネジメント

フェーズ 2 では、フェーズ 1 で獲得した電力消費パターンや生活者の行動パターンに基づいて、電力使用量を制御するオンデマンド型電力ネットワークを構築する。オンデマンド型電力ネットワークとは、使用家電の消費電力を調停にもとづいて決定し、電力供給を行うことで、電力使用量や節電率の保証付きの電力マネジメントシステムを実現する 5)。

(3) フェーズ 3 : 家庭内ナノグリッドによる電力カラーリング (由来別制御)

フェーズ 3 では、個々の家庭に設置される発電装置及び蓄電装置をネットワーク結合し、家庭内のトータルな電力マネジメントシステムを構築する。すなわち、現在の家庭内電力ネットワークは木構造であるが、複数電源や蓄電池の導入によってループを持ったグラフ構造へと拡張することが考えられ、多様な電力ルーティング機能を備えた「ナノグリッド」を形成する。家庭内に複数の電力源が設置された場合、各電源からの電力を区別し (電力カラーリング)、量的な省エネだけでなく、二酸化炭素発生量の低減を考慮したエネルギー・マネジメント (自然由来エネルギーを優先的に利用、十分確保できない場合は給電しない、あるいは自家消費せず 電力会社へ積極的に販売するなど) を行うことが考えられる。

(4) フェーズ 4 : 地域ナノグリッドによるエネルギー売買市場の創成

フェーズ 4 では、家庭内ナノグリッドを近隣家同士でネットワークで結び、地域にまで広げて地域内の電力売買市場を構築する。一軒の家庭だけでは太陽光電池などで発電した電力をすべて有効に使い切り、トータルの消費電力量を削減する効果は限られるが、それを地域に広げることで、エネルギーの地産地消を推進することで、更なる削減が可能となる。すなわち、地域ナノグリッドは、単なるエネルギーを授受するネットワークだけでなく、その売買を行う経済ネットワークを含んでおり、それによ

て各世帯に省エネや、ピーク電力の平準化、二酸化炭素削減に向けた大きなインセンティブを与えることが可能となる。

本稿では、エネルギーの情報化の基礎技術となるスマートタップネットワークと、それを用いた第1フェーズの実証システムとして消費電力の見える化システムについて述べる。

3. スマートタップネットワーク

3.1 スマートタップ

エネルギーの情報化では、家庭やオフィスを対象として、個々の家電や分散電源の電力計測や制御だけでなく、家電の使用状態を認識するとともに、そこから生活者の行動パターンを学習・認識し、家庭内の電力フローそのものを制御することを目的としている。そのため、スマートタップは単なる電力量計ではなく、電圧・電流波形そのものを計測・制御対象とする。また、このような電圧・電流波形をネットワーク経由でリアルタイムに収集することは困難であるため、スマートタップ内部である程度の知的処理を行う必要がある。つまり、スマートタップは次式のように計測と内部処理機能を合わせ持つものとして定義できる。

図2に我々が試作したスマートタップを示す。電力の測定を行うための電圧・電流センサ (Voltage Sensor / Current Sensor)、電力制御のための半導体リレー (Solid State Relay)、通信のための Zigbee6) モジュールと、これら全体の制御や内部処理を行うマイコン (Micro-controller with DSP) から構成される。交流100V、15A (1500W)まで計測でき、半導体リレーにより電力制御を行うことができる。また、このスマートタップは20kHzという高い内部サンプリングレートで電圧・電流を計測しているため、家電使用中の電流波形から家電の種類や状態を認識することができる3)。

図3にスマートタップで計測した電圧・電流波形の例を示す。掃除機 (Vacuum Cleaner) とドライヤー (Hair Dryer) で異なる波形を示していることがわかる。このような電流波形をデータベースと比較することで、16種類の家電に対して99%の認識率で認識を行うことができた3)。

3.2 スマートタップネットワークのアーキテクチャ

図4に示すように、スマートタップネットワークは、すべての電気機器、電源に取り付けたスマートタップと、それらからのデータを収集し制御するホームサーバからなる、電力センシング・コントロールネットワークである。スマートタップ現状の家電のプラグに取り付けるアダプタ型の他に、コンセントに埋め込むコンセント型や家電自身にスマートタップの機能をもたせる埋め込み型などが考えられる。また、本稿で

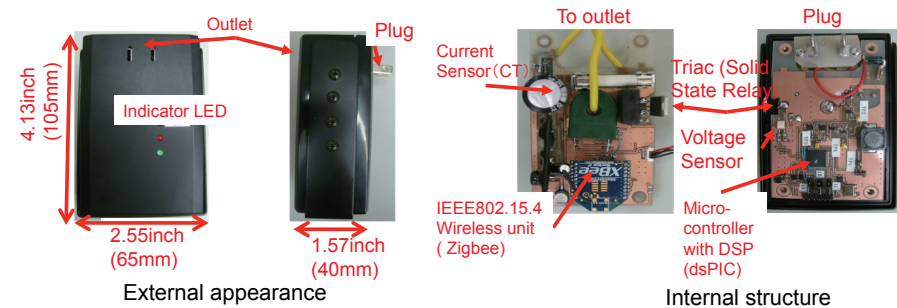


図2 スマートタップの外観と構成

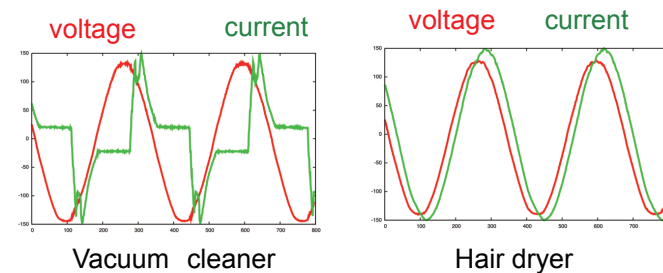


図3 スマートタップで計測した電圧・電流波形

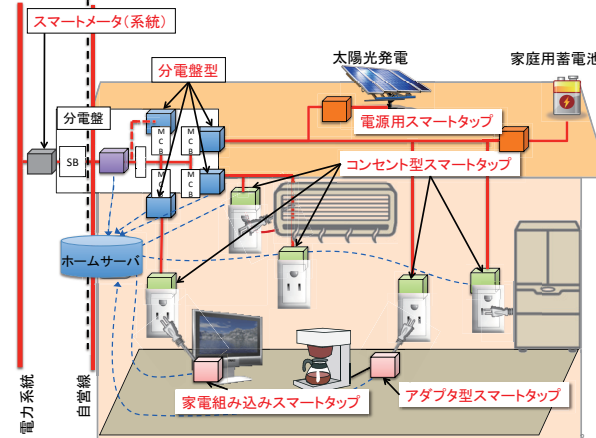


図4 スマートタップネットワーク

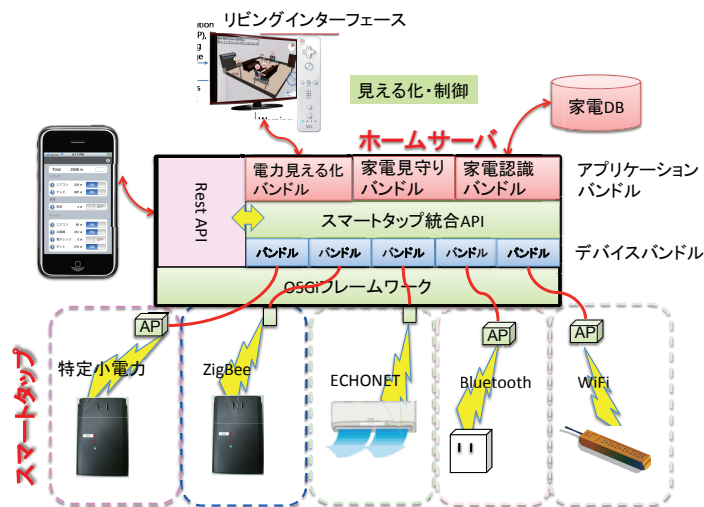


図 5 スマートタップネットワークのフレームワーク

は取り扱わないが、複数の分散電源が導入された際には各電源に対して、電源用スマートタップも取り付ける。

スマートタップネットワークを構成する通信メディアは、本稿で用いた ZigBee の他にも、PLC や特定小電力無線、WiFi など様々な種類が考えられ、その通信プロトコルも ECHONET や Smart Energy Profile のような既存のプロトコルと併用する場合など、スマートタップを作成したメーカーによって多種多様となる。これらのスマートタップネットワークを利用して提供するサービスやアプリケーションも多様なアプリケーションが考えられる。

本研究では、このような多様な通信媒体、通信方式を吸収し、また様々なアプリケーションを追加できるように、図 5 に示すように、OSGi フレームワーク 9) を利用したホームサーバを用いてスマートタップネットワークを実装した。OSGi フレームワークは Java VM 上で動作中に簡単にモジュールの追加、削除、更新を行うためのフレームワークであり、ホームネットワークにおけるゲートウェイの基盤技術としても期待されている 10)。

この OSGi フレームワークのうえにスマートタップとのやり取りを行うための総合 API を構築し、実際のスマートタップとの通信はデバイス用バンドルとして提供する。これにより新しいスマートタップを追加する場合にもメーカーやサードパーティがバンドルを提供することで、容易に対応することができる。また、スマートタップネット

ワークを利用したアプリケーションも、アプリケーションバンドルとして追加することができ、これによってアプリケーションバンドルをダウンロード・追加することで様々なアプリケーションやサービスに対応することができる。

4. 消費電力の見える化システム

本節では、スマートタップネットワーク上で実装した消費電力見える化システムについて述べる。本研究では、テレビとゲーム機を利用したリビング向け見える化インターフェース、Rest API を用いたリモート電力監視・制御アプリケーション、家電認識技術による家電の自動認識アプリケーション、家電の以上を検出する家電見守りアプリケーションを実装した。これらのアプリケーションは、すべて前節で説明したアプリケーションバンドルとして実装した。

(1) テレビとゲーム機によるリビング向け見える化インターフェース

テレビとゲーム機によるリビング向け見える化インターフェースは、本研究の見える化システムのメインのアプリケーションである。図 6 に示すように、リビングのテレビ画面上に 3 次元で部屋の間取り図を表示し、その中に使用中の家電をアイコンで表示している。各家電アイコンの上部にはその家電が現在使用している消費電力 (W) を表示し、どの家電がどれだけの消費電力を使用しているかひと目で確認することができる。また、この画面はゲーム機 Wii のコントローラである WiiRemote で直感的に操作することができる。WiiRemote の上下左右で表示画面を回転することができ、家電を選んでボタンを押すことで、選択家電の詳細情報を得ることができる。家電の詳細情報としては、図に示すように、家電が過去に使用した電力を時間帯ごとの電力量のグラフで確認することができる。また、家全体の消費電力に含まれる各家電の消費電力の割合を表示することが可能である。

さらに、使用電力の確認だけでなく、選択した家電のオン・オフや調光を行うことができ、不要な家電の電源を切ることができる。

(2) Rest API によるリモート監視

リビング向けインターフェースでは、生活者がリビングでテレビをつけている時のみ消費電力の見える化を行うことができるが、生活者がリビング以外にいる場合や、テレビ番組を見ているときなどに使用することができない。そこで、HTTP による遠隔インターフェースを実装し、スマートフォンなどで消費電力を簡易表示する API を実装した。この API ではどこにいてもスマートフォンを見るだけで、電力消費の確認や家電のオン・オフ、調光などの遠隔制御が可能である。実験ではホームサーバとスマートフォンの間は無線 LAN で接続し、家の中だけから操作したがサーバを適切に設定し、外部からアクセス可能とすることで、外出先からでも電力の確認や制御が可能となり消し忘れ対策を行うこともできる。

(3) 家電の自動認識

家庭内では、テレビ、冷蔵庫、洗濯機などの大型家電を除いて、使用するコンセントが一定でない場合が多い。例えば、掃除機などは移動しながら各部屋を掃除するため、使用するコンセントを変更することが多い。このような場合にどこでどの家電を使用したかを把握するため、本研究ではスマートタップはコンセントに固定で取り付け、そこに家電を接続して使用するものとし、家電の使用場所を変えたときにはスマートタップによる家電認識技術 3)によって、どこでどの家電が使用されているかを自動認識するようにした。

(4) 家電の見守り

家電認識技術では、使用している家電の種類だけでなく、その状態も認識可能である。そこで、正常な状態で使用している家電の電流波形を学習し、学習した電流波形に合致しない電流波形が検出したときには、異常としてリビングインタフェースからユーザに知らせるようにした。

5. スマートマンションルームによるエコ生活実証実験

本節では、前節で述べた消費電力の見える化システムを、マンションの一室に導入したスマートマンションルームと、そこに実際に生活したエコ生活実証実験について述べる。

5.1 スマートマンションルーム

我々が構築したスマートマンションルームは、図 7 に示すような 1LDK (33.21 m²) のマンションの一室で 1 人～2 人暮らし向けの部屋である。この部屋ではテレビ、HDD/DVD 録画機、ゲーム機、エアコン、電子レンジ、冷蔵庫、掃除機、洗濯機、備え付け照明など、日常生活で利用する 30 種類の家電を使用した。

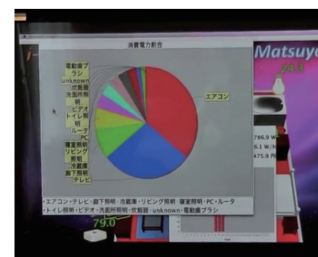
全ての家電、全ての備え付け照明の電力を計測できるように 50 台のスマートタップを用いてスマートタップネットワークを構築した。ホームサーバは Mac mini を用い生活のじゃまにならないようにテレビ台の中に設置した。

スマートタップは、部屋のコンセント、延長コードなどの全ての口に取り付け、掃除機、空気清浄機、扇風機、ナイトスタンド、電動歯ブラシ、ゲーム機、コーヒーメーカー、ポット、携帯充電器の 9 種類については、あらかじめ電流波形を学習し、どこでなにを使用しているかを自動認識をさせた。残りの大型家電、備え付け照明については、決まったスマートタップに接続するものとした。

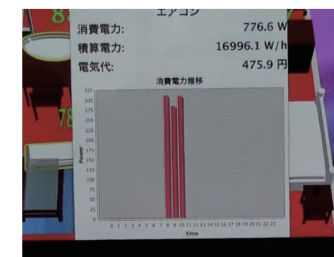
スマートマンションルームの概要と消費電力見える化システムの動作の様子は 11) で動画を公開している。



3Dインターフェースとゲーム機によるリモコン



使用電力の割合



家電の詳細情報

図 6 テレビとゲーム機による見える化

5.2 エコ生活実証実験

生活実験では、実際に被験者が住みこんでデータの収集を行った。同一の 2 人 (夫婦) で 2 ヶ月間の生活データを取得したのを始め、3 日間ずつ交代で 5 人の学生が生活した。また現在も生活データの取得を継続中である。

消費電力見える化システムの効果を確認するため、環境条件 (外気温、湿度) が同じ二日間について、見える化システムを使用せずに消費電力を気にせずに生活した場合と、見える化システムを使って無駄な電力をこまめにチェックしながら生活した場合を比較した。なお、それぞれの生活スケジュールはあらかじめ指定した。図 8 にそれぞれの一日の積算電力量の推移を示す。この結果より見える化システムを利用することで、23%の消費電力が削減されており、見える化システムの効果があることがわかる。



図 7 スマートマンションルーム

6. まとめ

本稿では、エネルギーの情報化の基礎技術であるスマートタップネットワークと、それを用いた消費電力の見える化システムについて述べた。本研究はエネルギーの情報化の第一フェーズと位置付けられ、現在実証実験としてスマートマンションルームにおける生活実験を行っている。生活実験において、見える化システムを使う場合と使わない場合の比較を行った結果 23%の消費電力削減の効果が得られた。

しかし、今回の実験結果では、消費電力をこまめにチェックしつづける非常にモチベーションの高い被験者によって得られた結果であり、日常生活で常にこのような効果を維持することは困難である。そこで、我々はこのようなシステムで得られた生活データからの居住者の行動パターン認識⁴⁾と、生活パターンの学習により無駄な電力消費を発見する研究を行っている。また、エネルギーの情報化の第二フェーズとして位置付けられるオンデマンド型電力ネットワークにより、生活者による電力のチェックを行うことなく、任意の節電率を達成できるエネルギーマネジメントシステムを開発中である⁵⁾。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金若手研究(B) (23700169)の助成をうけたものである。

参考文献

1) 松山隆司：エネルギーの情報化とは、-背景、目的、基本アイデア、実現手法-、情報処理、Vol. 51, no. 8, pp. 926-933, 2010.8.

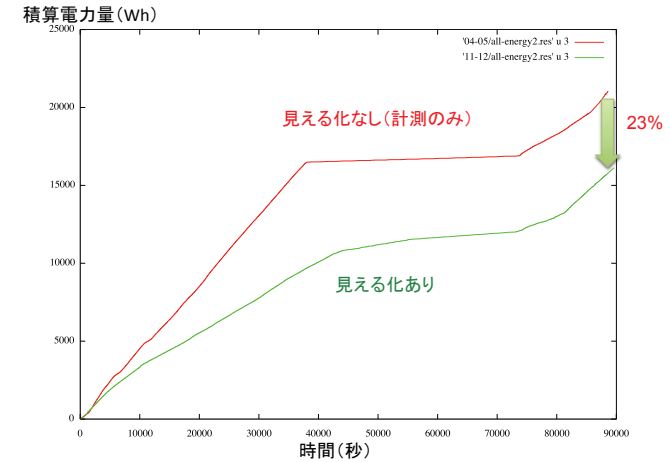


図 8 消費電力の見える化の効果の例

- 2) 村瀬一郎, 佐藤明男: 米国を中心としたスマートグリッドの動向, 情報処理, Vol. 51, No. 8, pp. 978-985. 2010.8.
- 3) Takekazu KATO, Hyun Sang Cho, Dongwook Lee, Tetsuo Toyomura, and Tatsuya Yamazaki. Appliance Recognition from Electric Current Signals for Information-Energy Integrated Network in Home Environments. International Journal of Assistive Robotics and Systems (IJARS), Vol. 10, No. 4, pp. 51--60, (2009).
- 4) 山田祐輔, 加藤丈和, 松山隆司: スマートタップネットワークを用いた家電の電力消費パターン解析に基づく人物行動推定, 信学技報, USN2011-10, pp. 31-36, 2011.7.
- 5) 湯浅健史, 加藤丈和, 松山隆司: スマートタップネットワークを用いたオンデマンド型電力制御システム, 信学技報, USN2011-11, pp. 25-30, 2011.7.
- 6) ZigBee Alliance: <http://www.zigbee.org/>
- 7) ECHONET コンソーシアム: <http://www.echonet.gr.jp/>
- 8) ZigBee/HomePlug Smart Energy Profile: http://www.qualitylogic.com/Contents/Smart-Grid/Technology/ZigBee_HomePlug-Smart-Energy-Profile.aspx
- 9) OSGi Alliance: <http://www.osgi.org/Main/HomePage>
- 10) 丹 康雄: ホームネットワーク (OSGi, ECHONET) モデルに基づく家庭内エネルギーマネジメント, 情報処理, Vol. 51, no. 8, pp. 959-965, 2010.8.
- 11) スマートマンション実証実験説明動画(アナウンス付き): <http://www.i-energy.jp/youtube.html>