

利用者単位の消費電力量測定手法と 家庭における節電指標の提案

高橋 麻美^{1,a)} 根路 銘崇^{2,3} 沼尾 雅之^{1,b)}

受付日 2011年10月24日, 採録日 2012年4月2日

概要: 節電がますます重要視される中, 企業や家庭では, 一般的な節電対策として経験的かつ試行錯誤的に節電に対する取り組みが実施されている. 一方で, 節電効果の向上を目的として, 従来のブレーカ単位・月単位での測定に対し, より詳細に把握するために電化製品や部屋単位で測定する技術が登場してきている. 我々は, 電化製品と利用者の関係を整理するために, サービスインタフェースモデルを用いて, 電化製品の特徴に基づく利用状況を分析した. 本論文では, 電化製品の消費電力量を利用者単位で測定する手法に加えて, 節電のための指標となる節電 KPI の計算方法について述べる. また, 提案する手法に対する実験と評価について述べ, 有効性を検証する.

キーワード: 電力モニタリング, 節電, 節電指標 (KPI), サービスインタフェースモデル, UML

A Proposal of User Level Power Consumption Measurement and Key Performance Indicator for House Level Power Consumption

ASAMI TAKAHASHI^{1,a)} TAKASHI NEROME^{2,3} MASAYUKI NUMAO^{1,b)}

Received: October 24, 2011, Accepted: April 2, 2012

Abstract: Electric power saving efforts is getting more important not only from the regional view point but also from the earth level view point. In order to improve the power saving, enterprises and homes are trying to reduce power consumption by ad-hoc try-and-error approach and based on empirical information. Thus, it is highly expected to establish the technologies and infrastructure for monitoring the power consumption by appliance level or finer location level. We proposed an approach to evaluate the user-level power consumption by converting from the appliance-level power consumption. In order to do that, we analyzed the relationship between appliances and users by using service interface model. In this paper, we described a method for allocating power consumption which measured by appliance level to user. In addition, we defined KPI (Key Performance Indicator) for saving power consumption and evaluate our approach.

Keywords: electric power monitoring, electric power saving, Key Performance Indicator (KPI), service interface model, UML

1. はじめに

節電の様々な取り組みが, 地域規模から地球規模において, 非常に重要になってきている. CO₂ 削減目標に対して, 産業部門での CO₂ 排出量は減少傾向にあるのに対し, 家庭部門では増加傾向にある. また, 家庭での CO₂ 排出の 40%以上が電力によるものである [1]. さらに, 震災の影響を受け, 地域全体での節電対策として計画停電が実施されるなど, 家庭での節電がよりいっそう求められている [2].

¹ 電気通信大学大学院情報・通信工学専攻
Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan
² 電気通信大学大学院情報工学専攻
Graduate School of Computer Science, The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan
³ 日本アイ・ビー・エム株式会社
IBM Japan, Ltd., Chuo, Tokyo 103-8510, Japan
^{a)} asami.hamu@gmail.com
^{b)} numao@cs.uec.ac.jp

企業や家庭では、節電効果を向上させることを目的として、試行錯誤的な提案や定性的な経験情報から節電を実施している [3]。一方で節電状況を把握するために、従来のブレーカ単位・月単位での消費電力量の把握に対し、より詳細に把握するために電化製品や部屋単位で測定する技術も登場している。さらに、測定だけでなく、電力を消費するパターンから生活パターンを推定し、電源タップ単位で制御を行うオンデマンド型の電力マネジメント [4], [5] や、環境情報を考慮した分析なども行われている [6]。

また、消費電力の値をフィードバックして提示することで、5～12%の省エネ効果があることが分かっており、家庭用の消費電力見える化システムが数多く登場している [7], [8]。これらのシステムでは、従来の契約ごとの月単位での測定に対して、部屋単位や電源タップ単位ではほぼリアルタイムでの測定が可能となっている。

一方、人はそれぞれの要求を満たすために、様々な電化製品を利用する。そのため、電化製品の利用パターンは人によって異なり、節電すべき点も異なる。そこで、1人1人に適した節電アドバイスを行うことにより、無理のない節電を行うことが可能になる [9]。

利用者に適した節電アドバイスを行うためには、利用者単位で消費電力量を求める必要がある。しかし、現状の測定は電化製品ごとに消費電力を測定するのが主流である。そこで、既存の測定機器を変更することなく、利用者へ消費電力量を割り当てる変換方法を提案する。そのために、まず利用者と電化製品の間の関係をサービスという要素を取り入れ、UMLでモデル化する。このモデルをサービスインタフェースモデルと呼ぶことにする [10]。また、サービスやサービスの利用形態によって電化製品を分類し、これらから変換式を構成する。

さらに、利用者単位に割り当てられた消費電力量を用いて、家庭ごとの節電指標を導入する。そして、構築した測定システムを、実環境において、24時間稼働させることにより得られた測定データを用いることにより、変換方法と節電指標について考察を行い、本提案の有効性を検証する。

本論文の構成は、まず2章で消費電力削減を目的とした既存技術について述べ、3章で消費電力量を利用者へ割り当てる変換方法を提案する。そして、4章でシステムの構成と節電指標について述べ、5章で実験と評価を示す。最後に6章で本論文のまとめと今後の課題を述べる。

2. 消費電力削減を目的とした既存技術について

家庭内での消費電力削減を目的とした技術や利用可能なシステムが多数存在する。PanasonicのECOマネシステムは回路ごとに消費電力を測定でき、過去との比較や目標の達成度を確認することができる [11]。富士通のスマート電源タップは、コンセントの差し口ごとの測定が可能であ

り、スケジューラとの連携でパソコンの消し忘れなどの不要電力を明らかにすることができる [12]。

このように既存技術では、電化製品ごとに消費電力を測定することが主流となっている。そのため、節電の工夫のようなアドバイスはできても、実際の消費電力の値から無駄を見つけて、節電へつなげる仕組みがあまり存在しない。消費された電力が無駄であるかどうかは、利用者の振舞いに深く関連しており、利用者の情報なしで無駄であると判断することは困難であると考えられる。そのため、無駄な電力を見つけて分析を行うためには、利用者の情報が不可欠であり、既存のシステムでは詳細な分析が不可能である。

一方、グリーン東大工学部プロジェクト [13] では、“させられる”環境省エネ対策から“やりたくなる”環境省エネ対策にするための、消費電力の分析を行っている。このプロジェクトでは、機器や場所ごとに無駄の定義を行い、ユーザの無駄の発見を支援している。各階に居住する人物を登録し、部屋ごとの消費電力を、部屋の住人による消費電力としてリアルタイムで紐付けを行っているが、部屋に複数の人が存在した場合が考慮されておらず、共有のスペースにおける消費電力については触れられていない。

3. サービスインタフェースによる電化製品利用環境のモデル化

我々は、節電のための詳細な分析を行うために、電化製品とその利用者の関連付けを行うことで、新たな消費電力の測定手法を提案する。

まず、今回提案する消費電力モニタリングシステムと、その観測対象である家庭内での電化製品利用環境を図1に示すようなコンテキストモデルによってモデル化した。消費電力モニタリングシステムは、電化製品、利用者、電源の利用状況を観測し、これを可視化することを目的としている。

3.1 サービスインタフェースモデル

図1のコンテキストモデルにおいて、利用者が電化製品を利用するということは、電化製品の提供する機能を利用するということである。例として、エアコンは室温を変化させる機能を持ち、利用者はエアコンによって変化した室温を感じる。また、電気ケトルは水を沸騰させる機能を持ち、利用者は沸騰したお湯を利用する。このように、電化製品は電力を機能という別の形に変換し、これを実行して利用者へ提供している。そこで、電化製品が利用者に提供している様々な機能をサービスとして抽象化し、利用者はそのサービスを利用していることと見なす。ここで、サービスは電化製品の機能を実行することによる、利用者に対する作用と定義する。そこで、サービスを抽象化した電化製品利用環境を分析したモデルを、サービスインタフェースモデルと定義する。図2にサービスインタフェースモデ

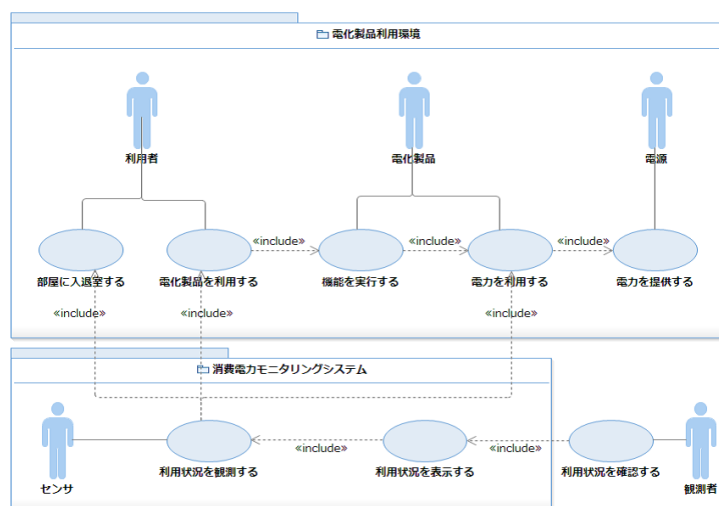


図 1 コンテキストモデル

Fig. 1 Context model.

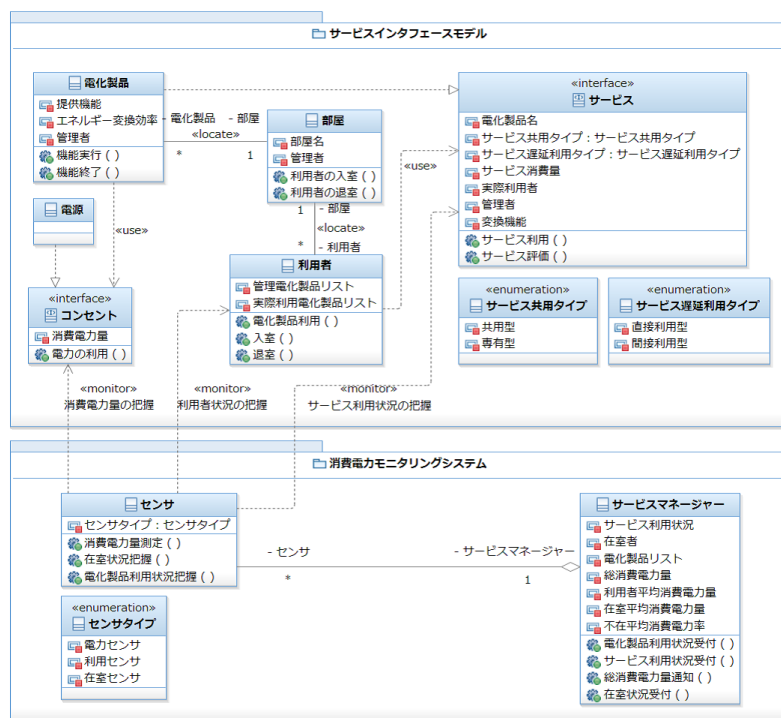


図 2 サービスインタフェースモデルと消費電力モニタリングシステム

Fig. 2 Service interface model and power monitoring system.

ルと消費電力モニタリングシステムの関係を示す。消費電力モニタリングシステムについては、4章で説明する。

サービスインタフェースモデルの主要な構成要素は、利用者、電化製品、サービスの3つである。

1. 利用者

利用者は、電化製品を利用し、要求するサービスを得る。通常、利用者と電化製品は同じ空間（場所）を占め、その電化製品を独占、あるいは共有することによって、サービスを消費する。

2. 電化製品

電化製品は利用者によって利用されるだけでなく、電

力のエネルギーをサービスに変換するものとして表される。エアコンや電気ケトルなどでは、電力から室温変化や水温変化という基礎的物理量変換機として定義される。

3. サービス

サービスは、電化製品からインタフェース実現 (realize) されることで、その提供を可能とする。電化製品の実行に対して、サービス提供は異なるエネルギーと時間が必要になることがある。

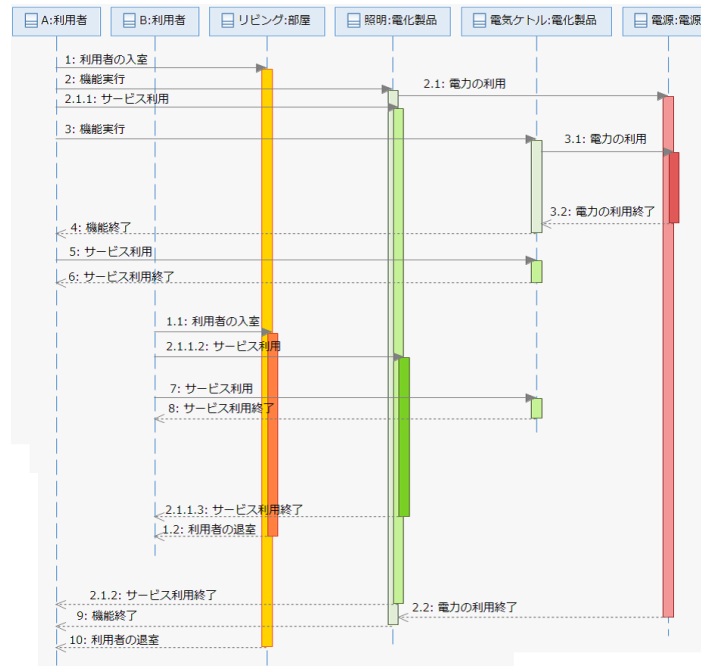


図 3 シーケンス図による利用者と電化製品利用の振舞い例

Fig. 3 An example of behavior that user A and user B uses appliances.

3.2 利用形態による電化製品の分類

図 2 のサービスインタフェースモデルを用いて、電化製品に対する利用者からのイベントの振舞いを分析する。図 3 に、シーケンス図を用いて利用者 A、利用者 B が、日常的生活において電化製品を利用している例を示す。

リビングに利用者 A が入室し、照明のスイッチをオンにすると、照明は電源から電力を消費すると同時に、サービスを利用者 A に提供する。照明からのサービスは、利用者がスイッチをオフにするまで継続提供される。

次に、利用者 A は電気ケトルのスイッチをオンにする。電気ケトルは電源から電力を消費し、お湯を沸かす。電気ケトルのスイッチがオフになった後に、利用者 A はお湯というサービスを受けとる。

次に、利用者 B が入室すると、すでにスイッチがオンになっている照明からサービスを提供される。これは、サービスが同時に複数利用者に対して利用可能であることを示す。

さらに、利用者 B は、利用者 A が用意したお湯の残りを利用することにより、利用者 A と電気ケトルによるサービスを共用したことになる。

図 3 の照明のライフラインを見てみると、実行状態が重なっていることが分かる。これは、この電化製品が共用可能であることを示すことができる。

また、電気ケトルでは、電源ライフラインに対して電力を消費していることを示す実行状態と、自らのライフライン上で、利用者に対するサービスを提供している実行状態に時間差があることが表現されている。これは、電力の消費に対して、サービス消費が遅延して発生していることを

示している。

図 3 の振舞いの分析により、サービスに共用性があることが分かった。また、電力を消費した時間に対してサービスを後から利用することもあると分かった。ここから電化製品のサービス提供タイプを、サービス共用タイプとサービス遅延利用タイプとし (図 2 参照)、それぞれを以下のように定義する。

1. サービス共用タイプ

電化製品によるサービスが、複数人で同時利用可能かに関するタイプとして、共用型と専有型の 2 つに分類する。

– 共用型

複数の人が同時に利用可能なサービスを提供する電化製品。テレビや冷蔵庫などがその例となる。

– 専有型

ある時点では、1 人にしかサービスを提供できないような電化製品。PC など個人所有の電化製品などがこの分類に属する。

2. サービス遅延利用タイプ

電化製品によるサービス提供時に、電力が消費されるか否かに対するタイプとして分類する。用語については、志和木らの研究 [14] で、電化製品が稼動している最中に、その場で直接サービスを受け取る利用形態を直接利用型、電化製品が稼動している間は、サービスを利用者ではなく物や空間に提供し、そのものや空間を後から利用者が受け取る利用形態を間接利用型としたことに準拠した。

- 直接利用型
サービスの提供時に、電力が消費される電化製品。
- 間接利用型
サービスの提供と電力の使用が一致しなくてもよい電化製品。ポットなど、電力を他の物理量に変換するような電化製品のほかに、携帯電話などの充電機器もこの分類に入れることができる。

3.3 利用者単位の消費電力量測定手法

本節では、サービスの利用状況に応じた利用者単位の消費電力量計算方法について示す。まず、従来技術で測定可能な電化製品の消費電力量から、利用者単位の消費電力量への変換を次の関係式で示す。

$$f : E_{A(a)}(t) \mapsto E_{U(u)}(t) \quad (1)$$

左辺は、単位時間 t における、ある家庭の電化製品集合 A に属する電化製品 a の消費電力量である。これは、電源タップ型センサなどを用いて測定できるものとする。一方、右辺は、単位時間 t における、家族などの利用者集合 U に属する利用者 u に割り当てられる消費電力量を示す。変換式 f は、電化製品 a が、利用者 u に対するサービスの提供状態などの情報を取り込むことにより、左辺から、右辺への変換が可能であることを示す。

また、式 (1) は、測定開始時刻 t_s と測定終了時刻 t_e 間の総消費電力量 ($E_{total}(t_s, t_e)$) が等しいという下記の条件も満たすものとする。

$$\begin{aligned} E_{total}(t_s, t_e) &= \sum_{a \in A} \sum_{t_s < t < t_e} E_{A(a)}(t) \\ &= \sum_{u \in U} \sum_{t_s < t < t_e} E_{U(u)}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

変換式 f を計算するために、以下のような補助関数を定義する。

1. 電化製品利用関数

誰が、いつ、どの電化製品を利用したかを検索するための関数として、電化製品利用関数 $r_{(u)}(t, a)$ を次のように定義する。

$$\begin{aligned} r_{(u)}(t, a) &= \begin{cases} 1 & (\text{時刻 } t \text{ に利用者 } u \text{ は、電化製品 } a \text{ のサービスを利用した}) \\ 0 & (\text{時刻 } t \text{ に利用者 } u \text{ は、電化製品 } a \text{ のサービスを利用していない}) \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

これは、3.2 節のシーケンス図 (図 3) における電化製品ライフラインにおける、利用者の実行状態に対応している。直接利用型の電化製品においては、電力の消費とサービス利用時間が一致しているので、この利用関数だけで消費電力量の利用者分配に役立てることができるが、間接利用型の電化製品においては、サービス利用時間以前に電力の消費が行われているため

に、何時消費された電力が、当該サービスに使われたかが不明である。したがって、こうした利用形態も反映させるために、電化製品利用関数を以下のように拡張する。

$$r_{(u)}(t, a, t') = \begin{cases} 1 & (\text{時刻 } t \text{ に利用者 } u \text{ は、時刻 } t' \text{ に電力を消費した電化製品 } a \text{ のサービスを利用した}) \\ 0 & (\text{時刻 } t \text{ に利用者 } u \text{ は、時刻 } t' \text{ に電力を消費した電化製品 } a \text{ のサービスを利用していない}) \end{cases} \quad (4)$$

直接利用型電化製品も、 $t \neq t'$ のときには、つねに $r_{(u)}(t, a, t') = 0$ となるものとして、この関数で一般的に表現できるので、今後はこの電化製品利用関数 r を用いることにする。

2. 在室関数

在室関数 $h_{(u)}(t)$ は、時刻 t における利用者 u の在室状態を示す。

$$h_{(u)}(t) = \begin{cases} 1 & (\text{時刻 } t \text{ に利用者 } u \text{ が在室}) \\ 0 & (\text{時刻 } t \text{ に利用者 } u \text{ が不在}) \end{cases} \quad (5)$$

3.2 節のシーケンス図 (図 3) を見ると、照明器具などでは、在室状態とサービス利用状態が一致していることが多いので、電化製品利用関数の補助的なものとして使用することができる。また、実際にセンサなどを用いてこの関数を実現することを考えた場合にも、電化製品利用関数よりも簡単に取得することができる。

3. 固定利用者関数

サービス利用者が特定できない場合に、消費電力量を分担する義務を負う利用者を、固定利用者として定義する。固定利用者関数 $o(u, a)$ は、利用者 u が電化製品 a の事前定義された固定利用者か否かを示す。

$$o(u, a) = \begin{cases} 1 & (\text{利用者 } u \text{ は電化製品 } a \text{ の固定利用者である}) \\ 0 & (\text{利用者 } u \text{ は電化製品 } a \text{ の固定利用者ではない}) \end{cases} \quad (6)$$

PC などの専有型電化製品の所有者の場合には、1 つの電化製品に 1 人の固定利用者となるが、冷蔵庫などの共用型電化製品の共同利用者の場合には、1 つの電化製品に複数の固定利用者が登録されることとなる。

これらの補助関数を用いて、変換式 f を定義すると、電化製品ごとの消費電力量から利用者単位の消費電力量に変換するための計算式は以下ようになる。

$$E_{U(u)}(t) = \sum_{a \in A} f(a, u, t) \quad (7)$$

$$f(a, u, t) = \begin{cases} E_{A(a)}(t) / \sum_{u' \in U} r(u')(t'', a, t) \\ \quad (\text{if } \exists t'(r(u)(t', a, t) = 1)) \\ 0 \quad (\text{if } \exists u' \neq u, \exists t'(r(u')(t', a, t) = 1)) \\ E_{A(a)}(t) / \sum_{u' \in U} o(u', a) \\ \quad (\text{if } \forall u', \forall t'(r(u')(t', a, t) = 0) \ \& \\ \quad o(u, a) = 1) \\ 0 \quad (\text{if } \forall u', \forall t'(r(u')(t', a, t) = 0) \ \& \\ \quad o(u, a) = 0) \end{cases} \quad (8)$$

式 (7) は、時刻 t において利用者 u が使用した消費電力量は、電化製品 a の消費電力量を、利用者 u に分配する変換式 $f(a, u, t)$ を、その利用者 u が使う可能性のある電化製品全体で加算した和として表現されることを示している。また式 (8) は、ある時刻 t での電化製品 a の消費電力量を利用者 u に分配するための式となり、以下の 4 つの条件によって、割り当てられることを示している。

- (i) a に対して、 u がサービス利用者だった場合には、 u は他のサービス利用者と消費電力を分担する。
- (ii) a に対して、 u はサービス利用者ではなく、かつ他のサービス利用者が特定できた場合には、他のサービス利用者が消費電力を分担する。よって、 u の負担は 0 となる。
- (iii) a に対するサービス利用者が特定できず、 u は固定利用者だった場合には、 u は、他の固定利用者と消費電力を分担する。
- (iv) a に対するサービス利用者が特定できず、 u は固定利用者でもなかった場合には、他の固定利用者が消費電力を分担する。よって u の負担は 0 となる。

4. 消費電力モニタリングシステムによる節電 KPI の計算

4.1 消費電力モニタリングシステム

消費電力モニタリングシステムの利用イメージを図 4 に示す。システムは、図 5 に示すように、電力センサ、行動センサ、在室センサからなるセンサ類と、センサから得られたデータを処理するデータ収集サーバ、および、結果を表示するための表示用 PC の 3 つから構成される。

4.1.1 センサ

1. 電力センサ

電力センサは、非接触で電化製品が消費する電流を測定できるクランプ型電流計と、その電流値を一定時間ごとに送信するための通信モジュールから構成される。ここでは、電化製品向けの短距離無線通信規格である ZigBee [15] を用いる。これは、低速で通信距離は短い、低コストで消費電力も少ないという特徴を持つ。電源タップ型センサと配電盤センサの 2 種類を用意した。

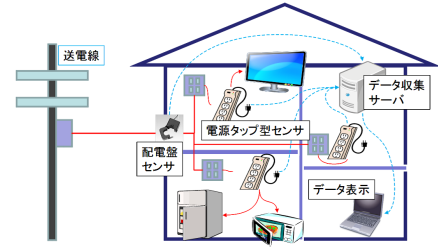


図 4 家庭用の消費電力モニタリングシステム
Fig. 4 Power monitoring system for home.

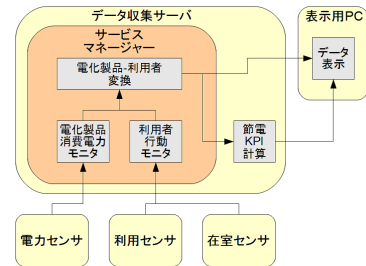


図 5 システム構成

Fig. 5 System configuration.

2. 在室センサ

在室センサは、ある時点で、誰が部屋にいるかを検知するための仕組みである。RFID などでも認識することもできるが、本システムでは、スマートフォンなどに標準装備されている Bluetooth 通信機能を用いている。Bluetooth 端末はユニークな MAC アドレスを持っており、これを部屋に置いたホストから検知することによって、在室者の特定ができる。

3. 利用センサ

利用センサは、ある電化製品を誰が操作しているかを特定するための仕組みである。これは電化製品ごとに異なる方法が実現する必要がある。たとえば共用 PC では、誰がログインしていたかのログ情報でとることができる。今回の実験では、電化製品ごとの利用センサは前提にしないこととし、利用状態が分からない電化製品については、事前定義された固定利用者を用いる。

4.1.2 サービスマネージャ

サービスマネージャは電化製品消費電力モニタ、利用者行動モニタ、電化製品-利用者変換によって構成される。

1. 電化製品消費電力モニタ

電力センサから得られたデータから電化製品ごとのデータに変換し、保存する。電源タップ型センサの場合には、登録されたコンセント-電化製品対応関係から得ることができるが、配電盤センサの場合には、複数の電化製品が集計された値となっているので、接続関係を考慮して、電化製品ごとの消費電力量を計算する。ここで電化製品ごとのある時間における消費電力量 $E_{A(a)}(t)$ が得られたことになる。

2. 利用者行動モニタ

在室センサと利用センサからのデータから、ある時間に誰が部屋にいたかどうかの在室関数 $h_{(u)}(t)$ と、ある時間に誰が電化製品を使っていたかの電化製品利用関数 $r_{(u)}(t, a)$ を計算し、保存する。さらに、 $E_{A_{(a)}}(t)$ のログを用いることにより、間接利用型の事前消費電力を加味した利用関数 $r_{(u)}(t, a, t')$ を計算する。

3. 電化製品-利用者変換

1. 2. で得られた、電化製品ごとの消費電力量 $E_{A_{(a)}}(t)$ と、在室データ $h_{(u)}(t)$ 、電化製品の利用関数 $r_{(u)}(t, a, t')$ から、利用者ごとの消費電力量 $E_{U_{(u)}}(t)$ を計算する。

4.1.3 データ表示

データ処理サーバから値を取得し、表およびグラフ化して表示する。リアルタイムでの表示や、当日と前日との比較表示などを行い、観測者へ利用状況の表示を行う。

4.2 節電 KPI を用いた家庭ごとの節電指標

3 章で定義した利用者単位による消費電力量測定を用いて、節電意識を高めるための指標が必要である。

KPI (Key Performance Indicator) とは、企業などで用いられる重要業績評価指標のことである [16]。企業の生産活動などの状況を定期的かつ定量的に示すことで、中間的な実施状況を評価することができる。

4.2.1 節電 KPI の定義と計算式

節電 KPI は、利用者視点を取り入れた節電のための指標として、以下の 3 つを定義する。

1. 利用者平均消費電力量

平均消費電力量は、ある家庭の 1 人あたりの消費電力量である。従来の測定で得ることができる総消費電力量は、家庭にあるすべての電化製品の消費電力量の合計となるため、家族人数によって変化してしまい、同一家庭での対前月比といった形での比較はできるが、家族構成の異なる家庭間での比較が行えなかった。そこで、利用者の人数を入れた利用者平均消費電力量を指標の 1 つとする。

$$\bar{E}_{total}(t_s, t_e) = E_{total}(t_s, t_e) / N_u \quad (9)$$

利用者平均消費電力量は、測定開始時刻 t_s と測定終了時刻 t_e を引数を持つ $\bar{E}_{total}$ で示される。総消費電力量 $E_{total}(t_s, t_e)$ を利用者数 N_u で割り、利用者平均を算出する。

2. 在室平均消費電力量

在室平均消費電力量は、在室時に消費した電力の 1 人あたりの消費電力量である。総消費電力量は利用者の在室情報が含まれていないため、在室時の消費電力量を測定することはできなかった。この値は、在室状況を把握することによって計算可能となった値である。在室時に消費した電力は、実際にサービスを受けてい

る可能性が高いため、有効活用された電力と見なす。また、実際利用分の消費電力量の変化や、利用の仕方

$$\begin{aligned} \bar{E}_{stay}(t_s, t_e) \\ = \sum_{u \in U} \{ \sum_{t_s < t < t_e} h_{(u)}(t) E_{U_{(u)}}(t) \} / N_u \end{aligned} \quad (10)$$

在室平均消費電力量は、測定開始時刻 t_s と測定終了時刻 t_e を引数を持つ $\bar{E}_{stay}$ で示される。利用者 u の在室時における消費電力量は、 t_s から t_e の間の時刻 t における利用者 u の消費電力量に対して、 t_s から t_e の間の在室関数 $h_{(u)}(t)$ を掛けることで計算される。 $\bar{E}_{stay}(t_s, t_e)$ は、利用者全体 U の在室時における消費電力量を利用者数 N_u で割った平均とする。

3. 不在平均消費電力量

不在平均消費電力量率は、不在時に消費された 1 人あたりの電力の割合を表す。2. と同様に、総消費電力量から実際に利用していたサービスに対して消費していた電力と、不在時に消費していた電力の区別をつけることはできなかった。不在時に消費された電力は、消し忘れなど、電力を無駄に消費している状態である可能性が高いため、不在時電力率は改善すべき点の比率として定義する。

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{away}(t_s, t_e) \\ = \sum_{u \in U} \{ \sum_{t_s < t < t_e} ((1 - h_{(u)}(t)) E_{U_{(u)}}(t)) \\ / \sum_{t_s < t < t_e} E_{U_{(u)}}(t) \} / N_u \end{aligned} \quad (11)$$

不在平均消費電力量率は、測定開始時刻 t_s と測定終了時刻 t_e を引数を持つ $\bar{Q}_{away}$ で示される。測定開始時刻 t_s と測定終了時刻 t_e の時刻 t における利用者 u が不在時の消費電力量に対し、全体の利用者 u の全体の消費電力量に対する割合を求めた値を用いてさらに利用者平均を算出する。

5. 実験と評価

5.1 実験計画

以下の状況で実験を行った。実験は、研究室において家庭を想定して行い、実験に利用した研究室内の消費電力測定対象電化製品と利用したセンサの配置を図 6 に示す。

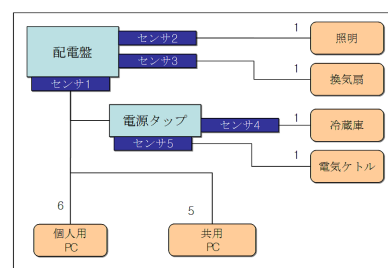


図 6 消費電力測定対象電化製品

Fig. 6 Appliance for measurement of power consumption.

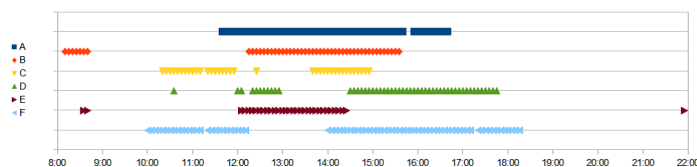


図 7 利用者の在室状況

Fig. 7 User's situation to stay in the room.

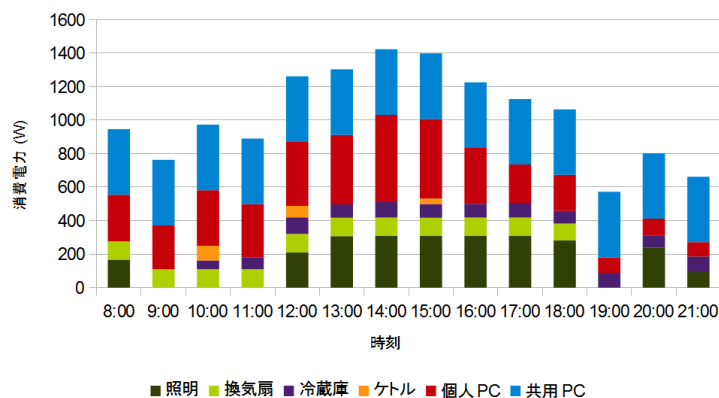


図 8 電化製品ごとに消費電力量を割り当てたグラフ

Fig. 8 A graph of power consumption allocated by appliance.

表 1 利用者単位の消費電力量

Table 1 Power consumption allocated by user.

利用者	A	B	C	D	E	F	合計	平均
総消費電力量 (Wh)	2,138.7	2,095.4	1,681.4	2,257.6	3,240.7	3,303.5	14,417.4	2,402.9
在室時間 (min)	290	240	185	255	160	390	1,520	253

- 場所：2 部屋（6 人部屋と 2 人部屋）
- 期間：1 日
- 時間帯：8:00～22:00
- 対象機器：照明，換気扇，冷蔵庫，電気ケトル，個人 PC，共用 PC
- 被験者：8 人

5.2 評価

5.2.1 電化製品単位の消費電力量の測定

まず 6 人部屋で生活する 6 人について測定を行った。電化製品ごとに測定した消費電力量を合計したグラフを図 8 に示す。図 8 では、消費電力量の大半が PC によるものであり、次に消費電力量が多いのは照明であることが分かった。ここから、PC や照明の消費電力量を減らすことにより、大幅に総消費電力量を減らすことができると考えられるが、利用者の生活に影響を与える可能性があるため、減らし方の工夫が必要であると考えられる。

5.2.2 利用者への割当て

まず、6 人部屋に対して、在室センサにより得られた利用者の在室状況を図 7 に示す。この図 7 から、昼間の在室人数が多いことが分かるが、在室時間はばらばらであり、生活パターンがそれぞれ異なることが分かる。このことから、個人の節電意識を高めるためには、利用者の生活に

合わせた分析を行う必要があるといえる。

次に、図 8 で示す電化製品ごとに測定された消費電力量 ($E_{A(a)}(t)$) を、提案した手法を用いて利用者へ割り当てた。利用者ごとに測定した消費電力量を表 1 に示す。利用者単位の消費電力量 ($E_{U(u)}(t)$) を一時間ごとに集計すると図 9 のようになる。

表 1 を用いて、利用者 A と利用者 D の消費電力量と在室時間を比較すると、利用者 D の方が在室時間が短いにもかかわらず、総消費電力量が多いことが分かる。その理由として、利用者 D が電気ケトルを 2 回利用したのに対し、利用者 A は電気ケトルを利用していないことが分かった。また、利用者 E は他の利用者に比べて在室時間が短い、総消費電力量は多い。これは、利用者 E が部屋の責任者であり、式 (6) で定義された固定利用者であったためである。つまり、部屋に誰もいないときに消費された電力は、サービス利用者が特定できないため、固定利用者が負担することになるからである。

図 9 から、10 時台の利用者 F の消費電力量が多いことが分かる。これは、この時間に利用者 F が 1 人で電気ケトルを利用したことが原因である。電気ケトルは沸かす水の量に応じて消費電力量が変化するため、利用者 F に対して、「お湯は必要な分だけ沸かしましょう」「できるだけ誰かと共用しましょう」といったアドバイスが可能になる。

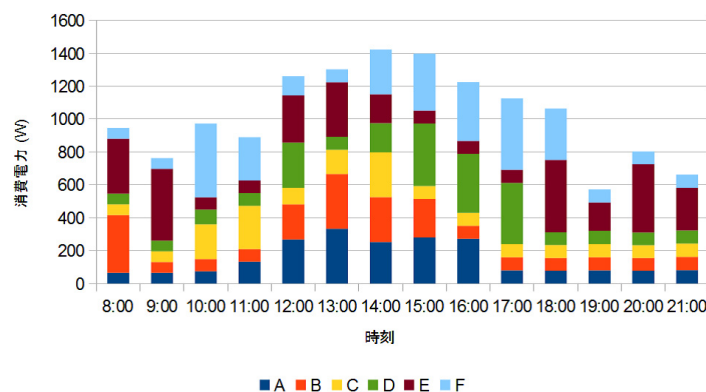


図 9 利用者ごとに消費電力量を割り当てたグラフ

Fig. 9 A graph of power consumption allocated by user.

表 2 節電 KPI による家庭間の比較

Table 2 Comparison between homes by power saving KPI.

家庭	総消費 電力量 (Wh)	利用者数	平均在室 時間 (min)	節電 KPI		
				利用者平均消費 電力量 (Wh)	在室平均消費 電力量 (Wh)	不在平均消費 電力率 (%)
H_1	14,417.4	6	253	2,402.9	1,401.9	41
H_2	8,580.5	2	545	4,290.2	3,888.0	13

5.2.3 家庭単位における節電 KPI の計算

家庭間における比較を行うために、2つの家庭 (H_1 , H_2) を想定して実験を行った。1つの家庭 H_1 には、5.2.2 項で示した6人部屋を6人家族とし、もう1つの家庭 H_2 は、2人部屋の2人家族を対象として別途実験を行った。

節電 KPI による家庭間の比較結果を表 2 に示す。従来手法により測定可能であった総消費電力量は、 H_1 の方が多くなっているが、利用者数も H_1 の方が多いため、公平な比較が行えない。節電 KPI として設定した利用者平均消費電力量を比較すると、 H_2 の方が多く、1人あたりの消費電力量が多いことが分かる。また、在室平均消費電力量も H_2 の方が多いことから、 H_2 の利用者は在室時における電化製品の利用の仕方を工夫する必要があると考えられる。一方で、不在平均消費電力率は H_1 の方が大きくなっていることから、 H_1 の利用者は不在時の消費電力について分析を行うことで、無駄の削減が行えると考えられる。

6. おわりに

利用者のサービス利用状況に基づく消費電力量の割当てが実施できたことにより、利用者間の比較が行えるようになり、個人に適した節電方法の分析が可能となった。また、提案した節電 KPI を用いることで、家庭における消費電力に関する情報を、定量的に評価できることが分かった。

共有型電化製品における固定利用者の事前定義の与え方によって、在室時間単位の平均消費電力量と不在平均消費電力率に関する KPI は変化をとまなう。よって、電化製品ごとの利用環境に対して適切な固定利用者の定義が重要である。

本論文では、サービスインタフェースモデルを用いて分析を行うことで、利用者単位で消費電力量を測定する手法について述べた。また、節電 KPI の導出方法について述べた。これらの手法については、実験と評価を実施することにより、有効性を検証した。

今後の課題として、固定利用者の定義方法を検討していきたい。また、幅広い電化製品を対象に、今後も研究を継続していきたい。

参考文献

- [1] 国立環境研究所：温室効果ガスインベントリオフィス，国立環境研究所（オンライン），入手先 <http://www-gio.nies.go.jp/index-j.html>。
- [2] 溝渕健一，竹内憲司：家庭における節電をどう進めるか：東日本大震災後の節電政策，神戸大学経済学研究科，Discussion Paper, Vol.1105 (2011)。
- [3] 内閣官房，経済産業省：節電.go.jp〈政府の節電ポータルサイト〉，入手先 <http://setsuden.go.jp/>。
- [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，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.111, No.134, pp.25–30 (2011)。
- [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，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.111, No.134, pp.31–36 (2011)。
- [6] 寺崎康博，橋本泰広，菅 幹雄，降旗徹馬：世帯消費電力構造と所有電気機器および節電意識との関連性（〈特集〉データ解析コンペティション：10周年を迎えて），オペレーションズ・リサーチ：経営の科学，Vol.50, No.2, pp.99–106 (2005)。
- [7] Fischer, C.: Feedback on Household Electricity Consumption a Tool for Saving Energy, Energy Efficiency, Vol.1, No.1, pp.79–104 (2008)。

- [8] 河波 潤：省エネルギー情報の提供が家庭用電力消費に及ぼす影響，研究発表会公演論文集/エネルギー・資源学会，Vol.21，pp.61–66 (2002).
- [9] 根路銘崇，高橋麻美，松澤裕史，沼尾雅之：サービス要求モデルに基づく電力消費最適化手法の提案，第174回ソフトウェア工学研究発表会 (2011).
- [10] 高橋麻美，根路銘崇，沼尾雅之：サービスインタフェースモデルに基づいた利用者単位の消費電力測定手法の提案，第10回情報科学技術フォーラム (2011).
- [11] Panasonic：ECO マネシシステム，Panasonic (オンライン)，入手先 <http://denko.panasonic.biz/Ebox/densetsu/lifinity/eco/index.html>.
- [12] 富士通研究所：業界最小の電力センサー内蔵のスマート電源タップを開発，富士通 (オンライン)，入手先 <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2010/03/31-3.html> (参照 2010-03-31).
- [13] 中島高英：クラウド型コンピュータによる消費エネルギーの見える化の実用事例—グリーン東大工学部プロジェクトにおける事例紹介，電子情報通信学会技術研究報告 (2009).
- [14] 志和木愛子，柳原 正，石井かおり，徳田英幸：ユーザの機器利用状況に基づく家庭内電力管理機構，映像情報メディア学会技術報告 (2003).
- [15] ZigBee Alliance: Zigbee Alliance, available from <http://www.zigbee.org/>.
- [16] 野間口隆郎：変革プロジェクト構想におけるステークホルダー KPI 定義，国際プロジェクト・プログラムマネジメント学会誌，Vol.5, No.1, pp.181–191 (2010).



沼尾 雅之 (正会員)

1981 年東京大学工学部電気工学科卒業。1983 年東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻修士課程修了。同年日本アイ・ビー・エム株式会社に入社。東京基礎研究所にて人工知能応用，エクスパート・システム，知的 CAD，電子商取引における暗号応用の研究などに従事。2008 年 4 月より，電気通信大学電気通信学部教授。現在，同大学大学院情報理工学研究科情報・通信工学専攻教授。センサネットワーク，RFID 等を利用したトレーサビリティおよびデータマイニングの研究に従事。博士 (情報理工学)。



高橋 麻美 (学生会員)

2010 年電気通信大学電気通信学部情報工学科卒業。2012 年電気通信大学大学院情報理工学研究科情報・通信工学専攻修士課程修了。同年株式会社 PFU 入社。



根路銘 崇 (正会員)

1994 年琉球大学工学部電子情報工学科卒業。1996 年琉球大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了。同年日本アイ・ビー・エム株式会社に入社。東京基礎研究所にて Web アプリケーション開発環境の研究，モデル

駆動型開発，ビジネスプロセスモデリングの研究に従事。2009 年よりサービス部門に異動。電気情報通信学会会員。