

オンデマンド型電力制御システム

加藤 丈和^{1,2,a)} 湯浅 健史¹ 松山 隆司^{1,2,b)}

受付日 2012年6月4日, 採録日 2012年12月7日

概要: 本研究では, ユーザ自身が電力使用量の上限値 (シーリング) を設定することで, 生活の質を損なうことなく節電率を保証することができる, 新しい需要家サイド電力管理システムとして, オンデマンド型電力制御システム (Energy on Demand: EoD) を提案する. EoD では, ユーザ自身の目的 (電気代削減, CO₂ 削減) のために上限を設定できるだけでなく, 電力会社との契約によって, 電力会社のピーク削減要請に対して自動的にシーリングを設定することで, 電力会社のピーク削減要請に対して自動的, かつ, 確実に電力を削減するスマートデマンドレスポンスを実現することができる. 本稿では, 単一の電源 (商用電源) を持つ家庭を対象とし, 家電の特性記述, および, 優先度の定義と, それらの定義に従って家電を調停する EoD のアルゴリズムについて述べる. また, 実験では, 提案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生活実証実験の結果を示す.

キーワード: エネルギーの情報化, スマートグリッド, HEMS

Energy On Demand

TAKEKAZU KATO^{1,2,a)} KENJI YUASA¹ TAKASHI MATSUYAMA^{1,2,b)}

Received: June 4, 2012, Accepted: December 7, 2012

Abstract: We propose a novel demand-side energy management method named “Energy on Demand (EoD)”. The EoD can attain the guaranteed reduction of energy consumption without damaging their quality of lives. Moreover, when utility companies are allowed to set and modify ceiling values based on contracts with consumers, EoD systems work as smart demand response systems. This paper first describes the protocol for EoD: power request demands named “Quality of Energy (QoEn)” and appliance priority descriptions. Then, the demand mediation algorithm based on appliance priorities for a single power source is introduced. Experiments demonstrate the effectiveness of EoD by implementation in a smart apartment room.

Keywords: i-Energy, SmartGrid, HEMS

1. はじめに

電力ネットワークの安定運用には, 電力の使用量と供給量の需給バランスをリアルタイムでつねに維持することが重要である. 現在, 電力の安定運用は電力供給側である電力会社が集中的に担っており, 大規模発電所で発電した電力を, 消費者の需要に合わせてコントロールすることで需給バランスを維持している. そのため, 電力会社は需要の

ピークに合わせた供給力の増強を行う必要があり, 災害や事故などによる供給力の低下や, 電力需要の急激な増加が生じると, 需給バランスの維持が困難となるという問題がある.

実際にわが国では, 2011 年の 3 月に起きた東日本大震災やそれに続く原発事故などの影響による電力供給力不足のために電力需給バランスが逼迫し, 大停電を避けるための計画停電が実施され, さらに夏の需要増加に対処するためさらなる電力使用量の削減が必要といわれている. 米国でも一部の地域では急激に増加する電力需要に対する供給力不足や電力網の老朽化に起因するピーク時の大停電などが問題になっている. また多くの新興国ではこれからの生活

¹ 京都大学

Kyoto University, Kyoto 606–8501, Japan

² 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

JST, CREST, Kawaguchi, Saitama 332–0012, Japan

a) t.kato@ieee.org

b) tm@i.kyoto-u.ac.jp

や産業の向上にともなって急激な電力需要の増加が見込まれており、電力供給力の不足が問題となっている。

このような問題に対処するため、わが国では現在、夏や冬の電力需要が増大する時期には、大口需要家だけでなく一般家庭を含む小口需要家に対しても、節電要請やピーク削減要請が出されている。また、米国ではスマートグリッド [1], [2] のプロジェクトが推進され、スマートメータによる電力需要のリアルタイムの収集とデマンドレスポンス（ピーク削減要請）やダイナミックプライシング（時間帯別料金制度）により、ピーク電力削減の仕組みの実証実験が行われている。しかし、これらの節電要請、ピーク削減要請に対して、手動で節電努力を行っているため、必要な電力とそうでない無駄を見分けて電力削減を行うことは手間がかかり、また要請された節電率、ピーク削減を保証することもできない。このような状況に対して近年では需要家サイドのエネルギーマネージメントも注目されている [3], [4], [5], [6], [7]。しかし、これらのシステムでは、負荷の制御はスマートサーモスタットによるセントラルヒーティングや温水器、プールの循環器などいつでも停止できる負荷や、ビルや工場などのエアコン、照明、発電機などの計画的に制御可能な設備系機器に限られ、一般家庭の家電やオフィスのコンセント系の機器など一般の機器を対象としたものは少ない。また、デマンドレスポンスに対するピーク削減のためのタイムシフトや、ビルなどで計画的に行うことのできるコスト最適化制御などに限られている。

また、一般家庭を対象とした省エネシステムとして、HEMS [8], [9] と呼ばれるシステムが研究開発されている。これらはもともと家庭設備の遠隔制御・自動制御を目指したホームオートメーションやホームネットワークと呼ばれていたもの [10], [11], [12] から発展し、様々な環境センサを用いて自動制御によって快適な居住空間を維持するためのユビキタスホーム [13] などの研究が行われ、近年になって省エネに適応した HEMS [14], [15], [16] やスマートホームと呼ばれるシステムの開発がさかんになってきた。これらのシステムでは、電力の見える化によるユーザへの注意喚起、温度時間などの条件やルールに従った空調や窓などの自動制御による効率的な家電利用を目指すものがほとんどである。一方でビル管理システムや工場のデマンド監視システムから発展してきた BEMS, FEMS [3], [6] も開発されているが、ほとんどは電力の監視、見える化やエアコン、照明などの設備系の制御にとどまっており、コンセント系と呼ばれる一般オフィス機器の制御はあまり行われていない。

このような状況に対して、本研究では、設備系電気機器だけでなく、家庭用の一般家電機器やオフィスにおける一般オフィス機器を対象として、かつ、生活者の日々変化する生活パターンに応じて生活の質を維持しながら、生活者自身が設定する節電率を達成するための新しい需要

家内電力制御システムの枠組みを提案する。我々が提案する家庭・オフィス・工場などの需要家向けの電力制御システムを「オンデマンド型電力制御システム（Energy on Demand: 以下 EoD）」と呼ぶ。EoD は、ある電気機器が電力を必要としてスイッチを入れたとき、無条件に電力を供給するのではなく、まず電力を要求するメッセージを電力マネージャに送信し、電力マネージャ上で供給可能な電力や電気機器の優先度などに基づく調停によって電力供給の可否や供給可能電力を電気機器に割り当て、電気機器は割り当てられた電力のみを使用する調停に基づく電力管理システムである。

このように、調停を行ってから電力供給を行うことで、節電要請やピーク削減要請、あるいは居住者自身が決定した節電率を達成することを保証できる「節電率保証付きの電力マネージメントシステム」が実現可能となり、また家庭や事業所ごとの状況によって異なる各電気機器の優先度を適切に設定することで、人工呼吸器などの重要度の高い機器への電力供給を止めることなく、また使用者の生活の質をできるだけ損なうことなく、使用電力を抑えることができる。また、電力会社からのピーク削減要請（デマンドレスポンス）に従って、ピーク電力の上限値を設定することで、デマンドレスポンスに自動的に対応できるデマンドサイドマネージメントを実現できる。

2. オンデマンド型電力制御システム

2.1 コンセプトとキーアイデア

EoD の基本コンセプトは、使用可能な電力に上限値を設け、その上限の範囲内に収まるように電気機器間で調停し、供給電力を決定することで、使用者が設定した電力使用量を保証することである。図 1 に EoD システムの概要を示す。EoD システムは、ネットワーク経由で制御可能なスマート電源と、それらを管理する電力マネージャから構成される。本稿では特に単一の電源（商用電源）のみを使用する場合における、家電の使用電力マネージメントについて述べる。

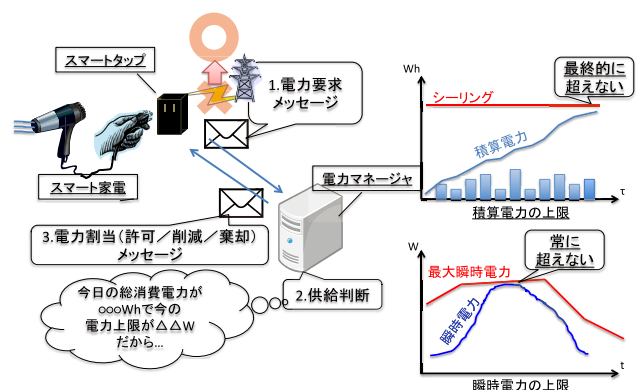


図 1 EoD システムの概要

Fig. 1 Overview of the EoD System.

表 1 家電 QoEn：家電クラス
Table 1 Appliance classes for QoEn.

class	電力調節	待機	一時停止	例	優先度関数 $\text{Pri}_a(p, t)$
I	○	○	○	ノート PC, 蓄電池	$\text{Pri}_a^{\text{adj}}(p) \cdot \text{Pri}_a^{\text{shift}}(t) \cdot \text{Pri}_a^{\text{int}}(t)$
II	○	○	×	デスクトップ PC	$\text{Pri}_a^{\text{adj}}(p) \cdot \text{Pri}_a^{\text{shift}}(t)$
III	○	×	○	エアコン	$\text{Pri}_a^{\text{adj}}(p) \cdot \text{Pri}_a^{\text{int}}(t)$
IV	○	×	×	ドライヤ, 照明	$\text{Pri}_a^{\text{adj}}(p)$
V	×	○	○		$\text{Pri}_a^{\text{shift}}(t) \cdot \text{Pri}_a^{\text{int}}(t)$
VI	×	○	×	炊飯器, レンジ	$\text{Pri}_a^{\text{shift}}(t)$
VII	×	×	○	冷蔵庫	$\text{Pri}_a^{\text{int}}(t)$
VIII	×	×	×	電話, ルータ	1

EoD の仕組みはスマート家電と電力マネージャ間のメッセージ交換による調停に基づいて電力供給を行うことである。このようなメッセージを本研究では **EoD プロトコル** と呼ぶ。EoD プロトコルでは、ユーザがスマート家電の電源を入れたとき、すぐに電力が供給されるかわりに、1) スマート家電が、要求電力や優先度とともに“電力要求メッセージ”を電力マネージャに送信する。2) 電力マネージャはそのときの電力使用量や電源の供給可能電力、また家電の優先度に従って、家電への電力供給の可否や、供給電力を調停する。3) 電力マネージャは調停結果に従って“電力割当て（許可/削減/棄却）メッセージ”をスマート家電に送信する。4) “電力割当てメッセージ”を受け取ったスマート家電は、メッセージに従って家電を動作させる。

商用電源を対象とした場合、通常、契約電力以内ならいくらでも電力を使うことができるが、本研究では、生活者自身が設定できるパラメータとして、瞬時電力に対する上限値（最大瞬時電力）と、積算電力量に対する上限値（シーリング）の2つの上限値を与える。最大瞬時電力は、生活者が契約電力を低く抑えるためや、電力網の需給バランスを保つための電力会社からのピーク抑制要請に応えるために時間帯ごとに使用電力の上限値として与える。また、シーリングは、生活者が電気代や CO₂ 排出量を抑えるために一定期間（1日、1週間、1カ月など）に使用する積算電力量の上限値として与える。これらのパラメータを商用電源に関する**電源 QoEn (Quality of Energy)**と呼ぶ。つまり、EoD システムに要求される機能は、家庭内の電力をつねに最大瞬時電力以下に保ちつつ、ユーザが決めた期間内の積算電力量を最終的にシーリング以下に抑えることである。また、ユーザの生活の質を維持するために、必要性の高い家電への電力要求はできるだけ満たす必要がある。

EoD システムの実現のためには、1) 生活の質を維持しつつ電力を削減するために、どの家電へ電力を供給し、どの家電への電力を削減するかを決める家電の優先度の定義、2) 生活者の生活パターンを考慮しつつ、電源 QoEn の上限値を達成するための電力使用計画の作成、3) 実際の生活の中で家電からの電力要求のリアルタイム電力調停アルゴリズムの3つの構成要素が必要となる。以下の節では、それ

ぞれについて詳細を述べる。

2.2 家電 QoEn (Quality of Energy) と家電の優先度

生活の質を維持しながら電力使用計画を満たすように制御をするため、電力を要求している家電や使用中の家電の中から動作させる必要性が高い家電とそうでない家電を選択する必要がある。本節では、必要な家電の判断基準として優先度を定義する。家電の使用状況は時々刻々と変化するため、優先度は静的に定義するのではなく、家電の使用状況にあわせた動的な優先度関数として定義する。なお、ある家電 a の優先度関数 $\text{Pri}_a(p, t)$ は、家電が使用する電力 p や時刻 t を入力とし、0 から 1 の値を返す関数とする。

2.2.1 家電 QoEn

家電の種類によって制御可能な電力制御方法が異なるため、各機器の特性を分類し、その特性ごとに優先度関数を定義する。本研究では、家電が要求する電力の特性や電力制御方法を表すパラメータを**家電 QoEn**と呼ぶ。家電 QoEn ではまず、家電の制御可能性に関する3つの性質に基づいて家電を分類する。

1つ目は、**電力調節可能性**であり、家電の電力を連続的に調節可能かどうかという特性である。2つ目は**待機可能性**であり、これは家電が電力を要求したときに、すぐに動作せずに一定時間起動を遅らせることのできる家電である。3つ目は**一時停止可能性**であり、家電が動作しているときに、一時的に動作を停止させることのできる家電である。表 1 に示すように、すべての家電機器をこれら3種類の性質を組み合わせた8つのクラスに分類する。まず基本的な3つの特性について優先度関数を定義し、その組合せによってこれら8つのクラスの優先度関数を定義する。

2.2.2 電力調節可能な家電の優先度

電力調節可能な家電では、図 2 に示すように、要求したとおりの電力が供給されるとユーザの満足度は最も高いが、供給電力が多少減少しても満足度は大きく変わらない。しかし、大幅に電力が減少すると家電の能力が制限されユーザの満足度は低下し、最終的にある一定以下の電力になるとその家電の機能を果たせなくなる。つまり、最低限使用するのに必要な電力の優先度は高く、要求電力どおりに供

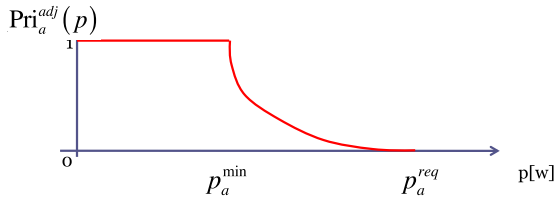


図 2 電力調節可能な家電の優先度

Fig. 2 Priority function for power adjustable appliances.

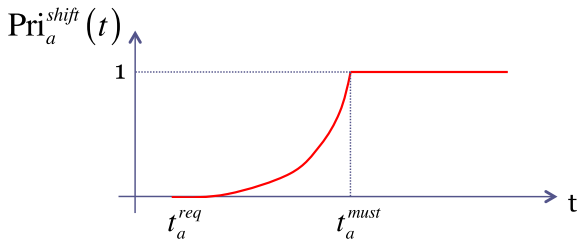


図 3 待機可能な家電の優先度

Fig. 3 Priority function for time-shiftable appliances.

給する優先度は低いという，供給電力に対して単調減少の関数で優先度を与えることができる．

本研究では，ある電力調節可能な家電 a の要求電力 p_a^{req} に対して，電力 p を割り当てる（使用する）ための優先度 $\text{Pri}_a^{\text{adj}}(p)$ を次式のように定義する．

$$\text{Pri}_a^{\text{adj}}(p) = \begin{cases} 0 & \text{if } p_a^{\text{req}} \leq p \\ 1 - \left(\frac{p_a^{\text{req}} - p}{p_a^{\text{req}} - p_a^{\text{min}}} \right)^{\alpha_a^{\text{adj}}} & \text{if } p_a^{\text{min}} < p < p_a^{\text{req}} \\ 1 & \text{if } p \leq p_a^{\text{min}} \end{cases} \quad (1)$$

ただし， α_a^{adj} は，電力削減に対してどれくらい急激に優先度が増加するかを決める設定パラメータであり， p_a^{min} は家電 a が機能を満たす^{*1}ために最低限必要な電力である．また，使用中であっても電力に余裕がなく，そのときの使用電力 p から計算される優先度が他の家電の優先度より低い場合は，使用電力を削減されるとともに優先度が増加し，電力に余裕ができるか他の家電の優先度より高くなるまで使用電力の削減が繰り返される．

2.2.3 待機可能な家電の優先度

待機可能な家電は，電力を要求してすぐに電力が供給されなくても，必要な時刻までに家電の動作が完了していればよく，起動時刻を遅らせることのできる家電である．つまり，図 3 に示すように，電力を要求した直後は優先度が低く，起動しなければならない時刻に近づくにつれ優先度が高くなるように定義すればよい．

ある待機可能な家電 a が，最初に電力要求メッセージを送信した要求時刻を t_a^{req} ，起動しなければならない時刻を t_a^{must} としたとき，この家電 a が時刻 t まで起動を待たされたときの優先度 $\text{Pri}_a^{\text{shift}}(t)$ を次式のように定義する．

^{*1} 機能を満たすとは，たとえば照明であれば明かりを照らすことであり，電力 p_a^{min} 以下では点灯すらしなことを示している．

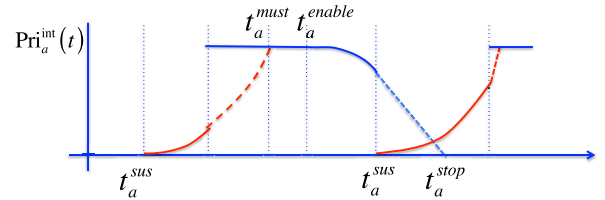


図 4 一時停止可能な家電の優先度

Fig. 4 Priority function for interruptible appliances.

$$\text{Pri}_a^{\text{shift}}(t) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{t - t_a^{\text{req}}}{t_a^{\text{must}} - t_a^{\text{req}}} \right)^{\alpha_a^{\text{shift}}} & \text{if } t \leq t_a^{\text{must}} \\ 1 & \text{if } t > t_a^{\text{must}} \end{cases} \quad (2)$$

最初，時刻 t_a^{req} に電力要求メッセージを送信したときには， $t = t_a^{\text{req}}$ であり優先度は最低値の 0 であり，電力に余裕がなければこの電力要求メッセージは棄却される．その後システムは決められた時間後に再度同じ家電に対して電力要求を行うが，このときの時刻 t は最初の要求時刻 t_a^{req} から時間が経過しており $t > t_a^{\text{req}}$ となり優先度が増加する．これを繰り返すことで家電 a の優先度が増加していき，他の家電の優先度以上となるか，電力に余裕ができれば家電 a が使用できるようになる^{*2}．

2.2.4 一時停止可能な家電の優先度

一時停止可能な家電は，エアコンの温度設定のように，運転中はある定常状態を目指して動作するが，いったん定常状態に到達すると，一時運転を停止しても，定常状態を保つことのできる家電である．このような家電の場合，図 4 に示すように，運転開始直後は定常状態を目指して動作するため高い優先度を与える必要があるが，定常状態に到達すると一時停止しても定常状態が維持されるため優先度を下げることができる．また，一時停止後は，時間が経つにつれ定常状態からはずれるため，優先度を高くして再開する必要がある．

一時停止可能な家電の優先度 $\text{Pri}_a^{\text{int}}(t)$ は，次式のように a が動作中の場合と停止中の場合に分けて定義する．

$$\text{Pri}_a^{\text{int}}(t) = \begin{cases} \text{Pri}_a^{\text{run}}(t) & a \text{ が動作中の場合} \\ \text{Pri}_a^{\text{sus}}(t) & a \text{ が停止中の場合} \end{cases} \quad (3)$$

ここで，停止しても機能を果たせる最短の時刻を t_a^{enable} ，無条件で停止してもよい時刻を t_a^{stop} としたとき，家電 a が動作中の場合の優先度を次式のように定義する．

$$\text{Pri}_a^{\text{run}}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t \leq t_a^{\text{enable}} \\ \left(\frac{t - t_a^{\text{enable}}}{t_a^{\text{stop}} - t_a^{\text{enable}}} \right)^{\alpha_a^{\text{run}}} & \text{if } t_a^{\text{enable}} < t \leq t_a^{\text{stop}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで， t_a^{enable} は優先度が最高値の 1 から下がり始める時

^{*2} 1 度使用を始めると明示的あるいは家電自身が自動的に電源を切るまで最大優先度の 1 となり停止させられることはない．

刻, t_a^{stop} は優先度が最低値の 0 に達する時刻, α_a^{run} はその間の優先度の減少カーブを決めるパラメータである. たとえば, エアコンであれば, 稼働して急冷/急温状態が終わりある程度温度が落ち着く時刻を t_a^{enable} とし, 温度が設定温度まで達した時刻を t_a^{stop} とすると, 1 度稼働すると温度がある程度落ち着く t_a^{enable} までは優先度 1 で停止されることはなく, その後だんだん優先度が低下し, 温度が設定温度に落ち着く t_a^{stop} では, 他の家電からの電力要求があり, 電力に余裕がなければ無条件に停止される.

また, 停止時の優先度について, 家電 a が停止した時刻を t_a^{sus} , 再開しなければならぬ時刻を t_a^{must} としたとき, 停止中の場合の優先度を次式のように定義する.

$$\text{Pri}_a^{\text{sus}}(t) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{t - t_a^{\text{sus}}}{t_a^{\text{must}} - t_a^{\text{sus}}} \right)^{\alpha_a^{\text{sus}}} & \text{if } t \leq t_a^{\text{must}} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

t_a^{must} は優先度が最大値の 1 となる時刻, α_a^{sus} はそれまでの優先度の上昇カーブを決めるパラメータである. エアコンの例では, 停止させられたときは現在時刻 $t = t_a^{\text{sus}}$ であり, 優先度は 0 となり, 電力に余裕がなければ再開しない. その後時刻が経過すると $t = t_a^{\text{sus}}$ が増加していき, t_a^{must} になると優先度が最大値の 1 となって必ず再稼働する. エアコン停止による設定温度から変化ががまんできなくなるまでの時刻と考えられる.

2.2.5 一般の家電の優先度

一般には, 家電のクラスは表 1 に示した 3 つの特性の組合せで定義する. それぞれの特性に対して定義された優先度の組合せによってそれぞれのクラスの優先度関数を表 1 の優先度関数の項目に示したように定義する. たとえば, クラス I の優先度関数はそれぞれの特性に対応する優先度関数の積によって次式のように定義される.

$$\text{Pri}_a(t, p) = \text{Pri}_a^{\text{adj}}(p) \text{Pri}_a^{\text{shift}}(t) \text{Pri}_a^{\text{int}}(t) \quad (6)$$

また, クラス VIII の優先度関数は 1 となり, これはつねに優先的に電力が供給されることを意味している.

2.3 電力使用計画

本研究で提案する EoD では, 一定期間で最終的に満たすべき積算電力の上限値 (以下, シーリング) と各時刻における瞬時電力の上限値 (以下, 最大瞬時電力) を設定する. 一方で, 生活者の様々な電力消費パターンに対して生活パターンを維持しつつ上限値を満たすために, 各時刻にどれだけの電力を使用するかという目標値を電力使用計画として事前に定めておく. この積算電力量のシーリングを設定し, 電力使用計画を定める期間を, 本研究では計画期間と呼ぶ.

電力使用計画は, 一定間隔 τ (たとえば 10 分) ごとの電力値の目標として作成する. なお, 本研究では, この

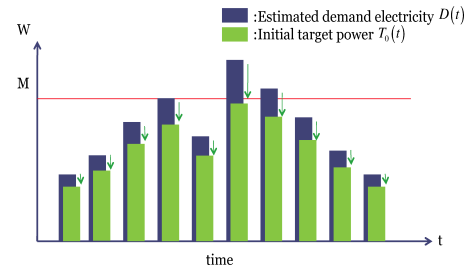


図 5 電力使用計画

Fig. 5 Power usage planning.

時間 τ を更新間隔と呼ぶ. ユーザーが設定したシーリングを $C[\text{Wh}]$, 時刻 t における最大瞬時電力を $M(t)[\text{W}]$ とする. また, 過去の生活データから学習した τ ごとの電力使用予測値を $D(t)[\text{W}]$ とする. このとき, 初期使用計画 $\text{PD}^{\text{PLAN}}(t)[\text{W}]$ をつねに $M(t)$ 以下でありかつ最終的に C 以下となるように下記のように作成する (図 5).

$$\text{PD}^{\text{PLAN}}(t) = \min \left\{ \frac{C}{\sum_{\delta \in \mathcal{T}} \tau D(\delta)} D(t), M(t) \right\} \quad (7)$$

ただし, $\mathcal{T}$ は計画期間を更新間隔で区切った時刻の集合である. 電力使用計画の作成方法として, ここに示した作成方法のほかにも, 積算電力量のシーリングを設定せず, 最大瞬時電力のみを設定するピーク削減計画, 時間帯別料金制度において電力コストが高い時間帯をより多く削減するコスト最小化計画など, ユーザーの目的に応じて作成することができる.

2.4 リアルタイムの家電調停アルゴリズム

図 1 に示したように, EoD システムは, 各家電からの電力マネージャに送信した電力要求メッセージに従って調停を行う. このとき, 表 2 に示すように, 家電 ID, 要求電力などのプロパティを付加したメッセージを送信する^{*3}. 電力マネージャはこれらのプロパティと現在の電力供給状態に基づいて調停を行い, その結果を要求家電やその他の使用中家電への電力割当てメッセージとして要求家電に送信する. 電力割当てメッセージには表 3 に示すように, 供給電力, メッセージタイプ (許可/削減/棄却), 供給電力, 再要求可能時間などのプロパティを付加する. 電力割当てメッセージを受信した家電は, そのプロパティに従って動作する. このとき, メッセージタイプとして削減や棄却された場合には家電の電力を削減, あるいは, 動作を停止させ, あらかじめパラメータとして設定しておいた再要求可能時間だけ経過後, 電力再要求メッセージを電力マネージャに送信する. このときには要求時刻は最初に電

^{*3} これらのプロパティは理想的なスマート家電では家電自身がメッセージに付加して送信するが, 現在そのような家電は存在しないので, 電力要求を受け取った電力マネージャがデータベースに基いてプロパティをメッセージに付加する.

表 2 電力要求メッセージ

Table 2 Power request message.

プロパティ	値	内容
家電 ID	ID	a の識別 ID
要求電力 p_a^{req}	電力値 (W)	前クラス共通
最低起動電力 p_a^{min}	電力値 (W)	I-IV
停止可能時間 t_a^{enable}	時間 (秒)	I, III, V, VII
要起動時間 t_a^{must}	時間 (秒)	I, II, V, VI

表 3 電力割当てメッセージ

Table 3 Power allocation message.

プロパティ	値
家電 ID	ID
メッセージタイプ	許可/削減/棄却
供給電力	電力値 (W)
再要求可能時間	時間 (秒)

力要求メッセージを送信した時刻、要求電力も最初の要求電力とする。なお、ユーザの操作や自動制御によって家電が動作モード（電源オン、弱・中・強、温度変更など）を切り替えるタイミングで電力要求メッセージを送信するものとする。

調停アルゴリズムの目的は、ユーザの電力要求をできるだけ維持しつつ、家全体の消費電力が最大瞬時電力 $M(t)$ を超えない、かつ、計画期間の最後で積算電力量がシーリング C 以下になるように、消費電力を制御することである。しかし、生活者の生活パターンは日々異なるため、実際の電力使用パターンは事前の電力使用計画とは必ずしも一致しない。また、家電の電力消費パターンには明確な動作モードの変更をとまなわれない電力変動も含まれるため、電力要求メッセージに対してつねに電力使用計画どおりに制御することはできない。そこで、本研究では処理タイミングの異なる 3 つのプロセスによって電力使用量を管理する。1 つ目は家電からの電力要求メッセージに対応して家電の電力使用量を調停するイベントドリブンプロセス、2 つ目は更新間隔 τ ごとに電力使用計画と実際の電力使用量のずれをフィードバックする定期起動プロセス、3 つ目はリアルタイムの電力使用量をつねに監視して、最大瞬時電力を超えそうなときに消費電力を削減する常時監視プロセスである。

ここで、事前に作成した電力使用計画をもとに、実際に使用した電力量に応じて今現在の使用電力の目標値 Target を計算する。目標値の初期値は電力使用計画値 $\text{Target} = \text{PD}^{\text{PLAN}}(0) \leq M(0)$ とし、更新間隔 τ ごとに定期起動プロセスによって更新する。目標値 Target の更新については 2.4.2 項で説明する。

2.4.1 イベントドリブンプロセスによる電力要求メッセージの調停

ある家電 a から電力要求メッセージを受け取ったとき、

電力マネージャは現在使用している電力と要求電力の和が目標値 Target 以下なら、家電 a に電力割当てメッセージを送信し、そうでない場合、電力要求を棄却するか他の家電の使用電力を削減して電力が目標値以下になるように調停する。このとき、電力の削減は家電の優先度が低い順番に行う。

時刻 t に電力要求メッセージを受け取ったとすると、現時刻 t において使用中の家電集合を $A_{\text{available}}$ とし、電力要求を送った家電を a_{req} とする。なお、電力要求メッセージには要求電力 p_a^{req} 、要求時刻 t_a^{req} などが付加されており、またデータベースに家電ごとの設定として、前節で述べた優先度を決定するためのパラメータ p_a^{min} , t_a^{enable} , t_a^{stop} , t_a^{must} , α_a^{adj} , α_a^{shift} , α_a^{adj} , α_a^{run} , α_a^{sus} を読み込んでいるものとする。

また、時刻 t において、現在稼働中の家電 a の使用電力を p_a 、その優先度を $\text{Pri}_a = \text{Pri}_a(p_a, t)$ とし、電力を要求してきた家電 a_{req} の要求電力を $p_{a_{\text{req}}}$ 、その優先度を $\text{Pri}_{a_{\text{req}}} = \text{Pri}_{a_{\text{req}}}(p_{a_{\text{req}}}, t)$ とする。

このとき、調停アルゴリズムは $\sum_{a \in \mathcal{A}} p_a > \text{Target}$ (ただし $\mathcal{A}$ はすべての家電) の間、優先度最小の家電を停止あるいは電力削減し、優先度の計算をやり直す処理を繰り返す行い、最終的に $\sum_{a \in \mathcal{A}} p_a \leq \text{Target}$ となるようにすることである。

現在使用中の家電と要求家電を合わせた家電を調停対象家電 $\mathcal{A} = A_{\text{available}} \cup \{a_{\text{req}}\}$ 、その使用電力（使用中家電の場合）、あるいは、要求電力（要求家電の場合）の総量を $P_{\text{total}} = \sum_{a \in \mathcal{A}} p_a$ としたとき、以下の手順で調停を行う。

Step 1. $P_{\text{total}} < \text{Target}$ なら終了。そうでないなら次の Step へ。

Step 2. $\mathcal{A}$ から優先度が最小の家電を選択する。

$$a_{\min} = \arg \min_{a \in \mathcal{A}} \text{Pri}_a \quad (8)$$

Step 3. $a_{\min}$ が電力調節可能で、かつ使用電力 $p_{a_{\min}}$ が最低起動電力 $p_{a_{\min}}^{\text{min}}$ より大きい場合、使用電力 $p_{a_{\min}}$ を次式のように削減するよう調停する。

$$p_{a_{\min}} = \max(\text{Target} - P_{\text{total}}, p_{a_{\min}}^{\text{min}}) \quad (9)$$

また、これにともない式 (1) に従って優先度 $\text{Pri}_{a_{\min}}$ を再計算して Step1 へ。

$a_{\min}$ が電力調節可能ではない、もしくは使用電力 $p_{a_{\min}} \leq p_{a_{\min}}^{\text{min}}$ の場合次の Step へ。

Step 4. $a_{\min}$ が動作中家電であり、かつ一時停止可能である場合、 $a_{\min}$ を一時停止させるように調停する。

$a_{\min}$ が電力要求家電であり、かつ待機可能である場合、 $a_{\min}$ の要求を棄却するように調停する。

Step 5. $\mathcal{A} := \mathcal{A} - \{a_{\min}\}$ とし、 $\mathcal{A} = \phi$ ならば終了、そうでないなら Step 1. へ

なお、実際には電力削減のために家電に電力削減/停止

メッセージを送信してから実際に電力値が下がるまでにタイムラグがあるため、削減/停止メッセージを送信しながら上記アルゴリズムを適用するには繰返しごとに待ち時間が必要になる。そこで、上記のアルゴリズムは電力マネージャ内でシミュレーションにより仮想的に実行し、アルゴリズム終了後、電力を要求した家電、および、シミュレーションにより電力削減、停止を行うよう調停された家電に対して、それぞれ実際に電力供給の変更を行うように電力割当て/削減/停止メッセージを送信する。

2.4.2 定期起動プロセスによる目標値のフィードバック

定期起動プロセスは、更新間隔 τ (10 分程度) ごとに起動し、使用電力の目標値 Target を更新する。2.3 節で述べたとおり、本研究では、更新間隔 τ ごとの電力使用量を電力使用計画として事前に作成する。しかし、ユーザの生活パターンは日ごとに様々であるため、電力を使う時間帯がずれて、ある時間帯に計画より電力を使わない場合もあり、またイベントドリブンプロセスによる調停は明示的な家電のモード変更にとともなう電力要求メッセージごとに行うために、調停後の明示的なモード変更をとみなさない電力変動により計画値を超える場合もありうる。そこで、定期起動プロセスでは、このような計画と実際の使用電力とのずれを、最終的に積算電力量がシーリング以下になるようにフィードバックしながら、目標値を決定する。

開始時刻を $t = 0$ として、 τ ごと、つまり $t_{\text{now}} \geq i\tau$ ($i = 1, 2, \dots$) となる時刻 t_{now} になると、目標値を更新する。

$$\begin{aligned} \text{Target} &:= \min \{P', M(t_{\text{now}})\} \\ P' &= \text{PD}^{\text{PLAN}}(t_{\text{now}}) - \gamma (\text{ED}(t_{\text{now}}) - \text{ED}^{\text{PLAN}}(t_{\text{now}})) \\ \text{ED}(t_{\text{now}}) &= \int_{t=0}^{t_{\text{now}}} P_{\text{total}}(t) dt \\ \text{ED}^{\text{PLAN}}(t_{\text{now}}) &= \int_{t=0}^{t_{\text{now}}} \text{PD}^{\text{PLAN}}(t) dt \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、 $P_{\text{total}}(t)$ は時刻 t のすべての家電の使用電力の総和、 $\text{PD}^{\text{PLAN}}(t)$ は電力使用計画であり、 $\text{ED}(t)$ 、 $\text{ED}^{\text{PLAN}}(t)$ はそれぞれそれらの積算量である。また、 γ はフィードバックゲインに相当するパラメータである。

このとき、新しい Target に対して、 $P_{\text{total}}(t) > \text{Target}$ となるなら 2.4.1 項と同様の調停処理を行う。

2.4.3 常時監視プロセスによる最大瞬時電力の監視

一般の家電では、たとえばエアコンや冷蔵庫のコンプレッサの制御による温度調整のように、明確な動作モードの変更がない電力変動も起こりうる。本研究の EoD システムでは、明確な動作モードの変更のない電力変動に対しては要求メッセージによる調停を行わない。積算電力のシーリングに対しては一時的に計画値を超えても、前項で述べたような更新間隔ごとのフィードバックによって、最終的にシーリングを守ることが可能であるが、最大瞬時電力 $M(t)$ に対しては一時的に使用電力が $M(t)$ を超えるこ

とは許容されない。

そこで、本研究では最大瞬時電力の制約を維持するために、消費電力をリアルタイムに監視し、最大瞬時電力 $M(t)$ を超える場合に 2.4.1 項と同様の調停を行って電力を削減する。なお、この際には目標値 Target のかわりに最大瞬時電力 $M(t)$ を用いて調停を行う。

3. EoD システムの実装

EoD システムの実装のためには、1) 電力要求メッセージを送信し、電力割当てメッセージに従って制御可能なスマート家電と、2) 電力の調停を行う電力マネージャが必要である。以下それぞれの構成要素について説明する。

3.1 EoD 対応スマート家電

EoD 対応スマート家電として要求される機能は以下の 3 つである (図 6)。

- (1) 現在の使用電力などの家電の状態をリアルタイムに電力マネージャに知らせる **状態通知機能**
- (2) 家電の起動時やモード変更時など、電力を必要とするときに、電力要求メッセージを電力マネージャに送信する **要求送信機能**
- (3) 電力マネージャから送られる電力割当て (許可/棄却) メッセージ対応して、家電の起動や電力調節を行う **電力遠隔制御機能**

このような 3 つの機能をすべて持つ家電を **EoD 対応スマート家電** と呼ぶ。現在このような機能を持った理想的な家電は一般には存在しないので、図 7 に示すように、電力マネージャ側にプロトコル変換エージェントを実装することで、既存家電を EoD 対応スマート家電として使用する。

上記の 3 つの機能のうち、状態通知機能については、我々はスマートタップと呼ぶ、電力計測、電力制御、通信機能を持つアダプタを開発した。スマートタップは家電とコンセントの間に取り付け 0.5 秒間隔で家電ごとの使用電力を電力マネージャに送信することができる。

電力遠隔制御機能については、赤外線リモコンや ECHONET-Lite [15], [17], ZigBee RF4CE [18], Smart Energy Profile [19] などの通信規格によって遠隔制御が可能な家電では、図 7 に示すように電力マネージャに実装した

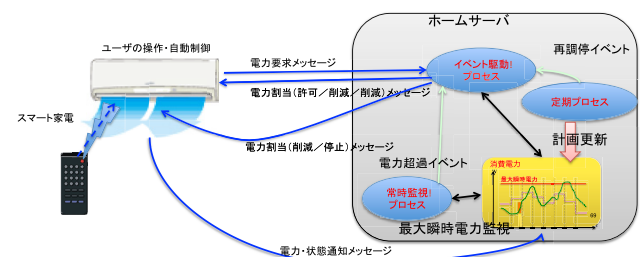


図 6 EoD 対応スマート家電

Fig. 6 Smart appliance for EoD.

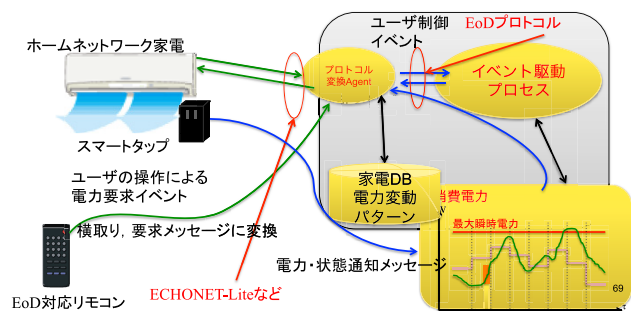


図 7 スマートタップと EoD 対応リモコンによるスマート家電

Fig. 7 Smart appliance with smart-tap and EoD remote controller.

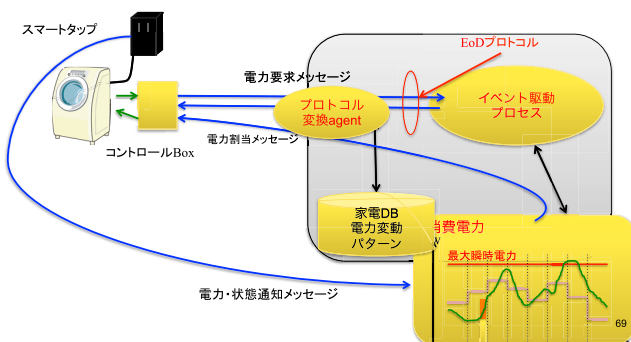


図 8 簡易 EoD 対応家電と家電制御 Box

Fig. 8 Easy EoD smart appliance with control box.

プロトコル変換エージェントから、これらの通信規格に応じた制御コードを送信することで対応することが可能である。このような家電を本研究ではネットワーク対応家電と呼ぶ。

ネットワーク対応家電では**要求送信機能**が実現できないので、**EoD 対応リモコン**を開発した。**EoD 対応リモコン**は対象家電と動作モードを選択すると、制御コードを家電に送るかわりに電力マネージャに電力要求メッセージを送信する総合リモコンであり、スマートフォンのアプリケーションとして作成した。

なお、EoD 対応家電と電力マネージャ間の電文フォーマット、プロトコル、記載内容については参考文献 [20] に示してある。また、リモコン機能を持たずネットワークに対応しない家電に対しては、図 8 に示すように、家電のボタン操作を横取りして、電力マネージャに電力要求メッセージを送信し、逆に電力マネージャからの応答メッセージや割込みメッセージに応じて家電の操作をする家電制御 Box を通常家電に取り付けて操作する簡易型 EoD 対応家電を開発した。簡易型 EoD 対応家電は家電の操作を家電制御 Box が横取りして電力要求メッセージとして電力マネージャに送信し、電力マネージャからの電力割当てメッセージを家電制御 Box が受信して家電を制御することができるが、これらの家電操作時にどれくらいの電力を使用するか分からないので、電力マネージャ側で要求電力などを

学習・予測して調停を行う.

さらに、照明やポット、コーヒーメーカなどの単純な家電に対しては、スマートタップの電力制御機能によるオン・オフ制御、電力制御を行うことで限定的であるが電力遠隔制御機能に対応した。この場合直接家電機器のスイッチを切り替えたときには瞬間的に家電に電力が供給されるが、スマートタップで電源が入れられたことを電力値から認識するといったスマートタップで電源を切り、マネージャに電力要求メッセージを送信することで、調停を行った。

3.2 電力マネージャ

本研究では、電力マネージャをパソコン上のアプリケーションとして開発した。前節で示した様々な制御、通知の仕組みで実装したスマート家電を統合的に扱うため、JavaのOSGiフレームワーク [15], [21] 上に構築した。OSGiはアプリケーションの様々な機能をバンドルとして追加・更新できるため、それぞれの家電の制御・通知機能の仕組みに対応するプロトコル変換エージェントをバンドルとして後から追加することが可能である。また、OSGiは組み込みソフトウェアとして動作することも考慮されており、将来的にホームゲートウェイやホームルータなので機器上動作させることも可能である。

4. 実験

4.1 實驗環境

我々は図 9 に示すようなマンションの一室に、3.1 節で述べたスマート家電と電力マネージャを設置した、EoD 対応スマートマンションルームを構築した。このとき使用した家電とその EoD 対応方法を表 4 に、それぞれの家電の制御可能性を表 5 に示す。

このときの電力要求メッセージ、電力マネージャからのメッセージに従った家電操作の実装方法としては、簡易EoD家電については、家電スイッチの操作を家電に取り付けたマイコンで横取りして家電の操作をする代わりに電力要求メッセージを送信し、電力マネージャからの電力割当てメッセージをマイコンが受け取ると、マイコンから家電操作を行った。また、ネットワーク家電と従来家電のうちの照明については前節で述べたスマートフォンに実装した総合リモコンによって、ユーザが動かしたい家電のモードを選択し、それを電力要求メッセージとして電力マネージャに送信し、調停結果に従って電力マネージャが家電や総合リモコンに指令を送信して稼働させた。また、ポットについてはユーザが家電本体のスイッチを入れた瞬間にスマートタップがスイッチが入ったことを認識し、いったん電源をオフにしつつ電力マネージャに電力要求メッセージを送信して調停を行い、電力マネージャからの電力割当てメッセージに従ってスマートタップで電源オン・オフ操作や電力調節を行った。また冷蔵庫についてはユーザからの



図 9 スマートマンションルーム
Fig. 9 Smart apartment room.

表 4 使用家電一覧

Table 4 Appliances.

ネットワーク家電	TV, 照明 (リビング, 寝室), エアコン
簡易 EoD 家電	電子レンジ, 洗濯機, 加湿器, 温風機, 炊飯器
従来家電 (スマート タップで制御)	照明 (玄関, 台所, 洗面所, トイレ, 風呂場), IH, 冷蔵庫, ポット, 温水便座, 掃除機

表 5 使用家電の制御可能性

Table 5 Control capabilities of appliances.

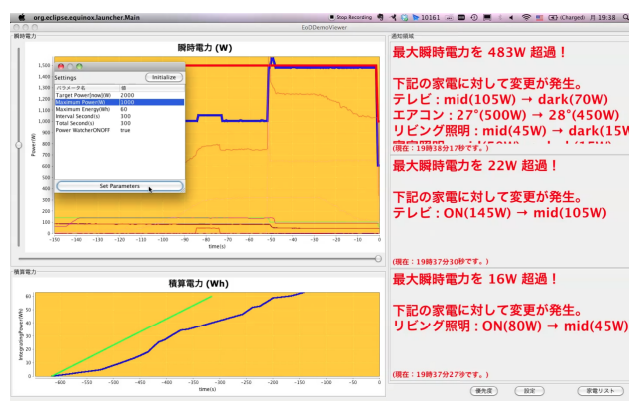
クラス	家電
I (電力調節可能 + 待機可能 + 一時停止可能)	温風機
II (電力調節可能 + 待機可能)	エアコン, ポット
III (電力調節可能 + 待機可能)	加湿器
IV (電力調節可能)	TV (明るさ調節), 照明 (すべて)
VII (一時停止可能)	冷蔵庫
VIII (調節不可: 優先度 1 固定)	電子レンジ, 洗濯機, 炊飯器, IH, 温水便座, 掃除機

操作はなく、電力マネージャからの停止メッセージ、再開のための電力割当てメッセージをスマートタップが受け取り、スマートタップからの電源オン・オフによって操作した。

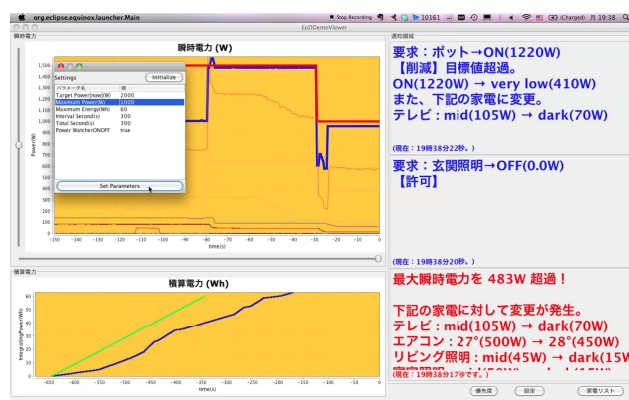
また、これらの家電の優先度を決めるパラメータは、事前に被験者が致命的な不便を感じにくいように予備テストを行い家電ごとに手動で調整した。

4.2 節電要請の模擬による最大瞬時電力の制御実験

まず、常時監視プロセスによって、消費電力が最大瞬時電力 $M(t)$ を超えないように制御している様子を示すため



(a) 最大瞬時電力削減直後



(b) 30 秒経過後

図 10 最大瞬時電力に対する制御結果

Fig. 10 Results of the EoD against Demand-Response.

に、家電使用中に電力会社からの節電要請（デマンドレスポンス）を受信した場合を想定し、最大瞬時電力値を変更することでピーク電力を削減した場合の結果を図 10 に示す。この図は電力マネージャのリアルタイムの状態を表示した画面であり、画面の左上のグラフが瞬時電力で、グラフの右端が現在時刻、左に行くほど過去を表している。また、太い赤線は最大瞬時電力、青線が現在の総消費電力を表しており、細い線は各家電の消費電力を表している。また左下は現時刻までの積算電力量であり、緑色が計画値、青色が実際の積算電力量である。画面の右側は調停アルゴリズムの結果を表しており、一番上が最新の調停結果、下にゆくほど過去の調停結果を表している。

まず、最大瞬時電力を変更した直後の (a) は、いままで 1,500 W だった最大瞬時電力（赤線）を 1,000 W に変更した直後の状態である。瞬時電力のグラフの右端（現時刻）で、最大瞬時電力が下がった直後に、総消費電力も下がっていることが分かる。このときの調停結果は右の一番上に表示されている。このとき、483 W 超過していて、テレビの明るさ、エアコンの温度、照明の明るさなど複数の家電の電力を調節して、最大瞬時電力以下を達成している様子が分かる。

また、50 秒前（グラフの -50 の部分）をみると、最大

瞬時電力を変更する前でも、家電の消費電力の変化によって、瞬間的に最大瞬時電力を超過しているが、その直後に調停をして最大瞬時電力を維持している様子が分かる。このときの調停結果は右の真ん中と一番下の部分に表示されている。いったん 16 W 超過分をリビングの照明を暗くすることで削減（一番下の調停結果）し、その後さらに他の家電の消費電力が増加し、22 W 超過した分をテレビを 1 段階暗くする（真ん中の調停結果）ことで最大瞬時電力 (1,500 W) を維持していることが分かる。また、(b) に示すそれから 30 秒ほど経過した状態では、さらなる家電の電力要求に対しても、ポットやテレビの電力調節によって新しい最大瞬時電力 (1,000 W) を維持している様子が分かる。

これらの結果より、だいたいにおいて最大瞬時電力の上限を維持しているが、急に消費電力が変化すると瞬間的 (1 から 3 秒程度) には最大瞬時電力を超過してしまう。これは、スマートタップによる計測から電力マネージャへの計測データの送信、電力削減メッセージの送信、家電自身の電力制御というプロセスのタイムラグのため、どうしても消費電力が増加してから実際に消費電力が調節されるまでに時間がかかるためである。この点については、最大瞬時電力の超過が許される時間や電力の限界の明示的な定義とそれを保証するためのマージンの設定や電力マネージャを経由しないスマートタップローカル判断による電力削減などの仕組みを検討する必要がある。

4.3 シミュレーション実験

次に、まったく同じ生活パターンに対して、EoD を使わない場合と使った場合を比較するためにシミュレーション実験を行った。生活データは実際にスマートマンションルームで 1 日生活したときの電力データを用い、同じ家電を同じモード、同じタイミングで使用しようとした場合に EoD システムで調停を行ったと仮定して電力パターンの変化をシミュレーションで求めた。このとき、電力調節可能な家電のうち、照明、テレビ、エアコンについては、調停結果によって電力削減しても使用時間は変化しないものとし、ポットについては電力削減した場合には積算電力量が同じになるように使用時間が長くなるものとした。また、エアコンと冷蔵庫以外の待機可能、一時停止可能家電については、待機/停止している時間だけ使用時間が伸び、トータルで稼働している時間が変わらないものとした。

図 11 に実験結果を示す。(1) は瞬時電力の 10 分間ごとの平均、(2) は積算電力量を示す。また、青色が EoD を使わない場合の電力パターン、赤色の線は EoD を使わない場合から 30% 削減するように作成した電力使用計画、緑色は EoD を使った場合の結果を示している。また (1) の赤色の破線は最大瞬時電力 $M(t)$ であり、つねに 1,200 W に設定あり、(2) の赤色の破線は積算電力量のシーリングで

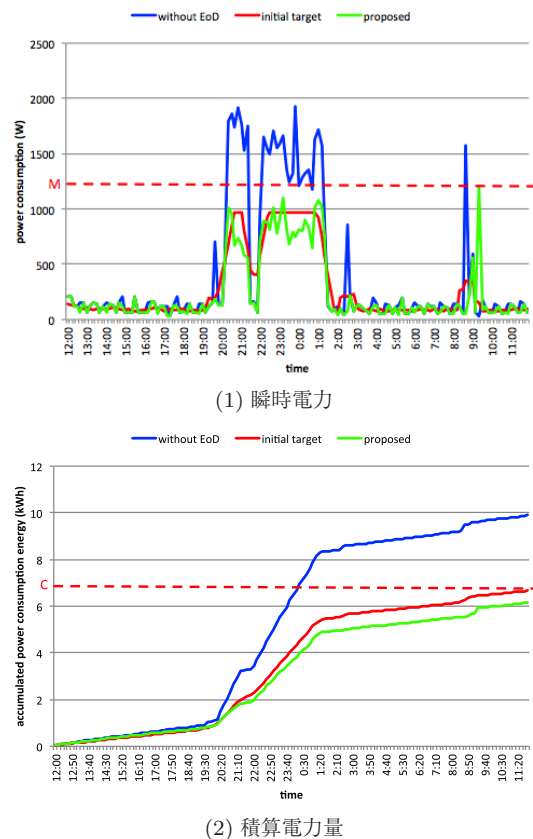


図 11 シミュレーション結果

Fig. 11 Results of the EoD simulation.

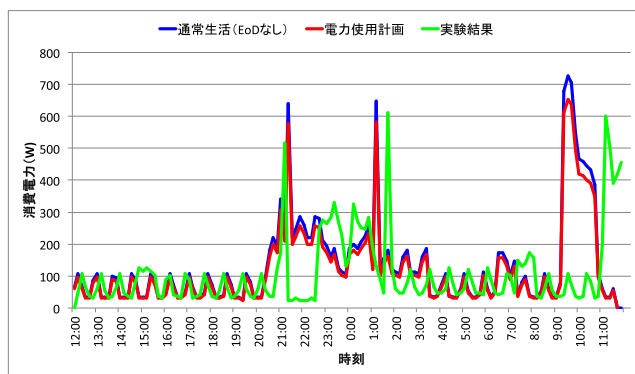
ある。この結果より、赤色の計画値に対して多少のずれはあるものの、つねに最大瞬時電力以下を維持しており、かつ積算電力量が最終的にシーリング以下を保っていることが分かる。

20時から1時の間はEoDを使わない場合(青線)とEoDを使用した場合(赤線)で、似たような電力変動パターンを示し、全体的に電力値が下がっていることが分かる。これはこの時間帯には電力調節可能なテレビ、照明、エアコンを主に使用しており、消費電力を削減して使用しているためである。また、翌朝の8時ごろにポットを使用したために、EoDを使用しない場合には1,500 Wを超える消費電力となっているが、EoDを使用した場合ではピークの時刻が後ろにずれて消費電力も下がっている。これは目標値を超えるために一時停止で待たされたうえで、最大瞬時電力を超えないように電力を制限されて稼働し、その分使用時間が若干のびている。

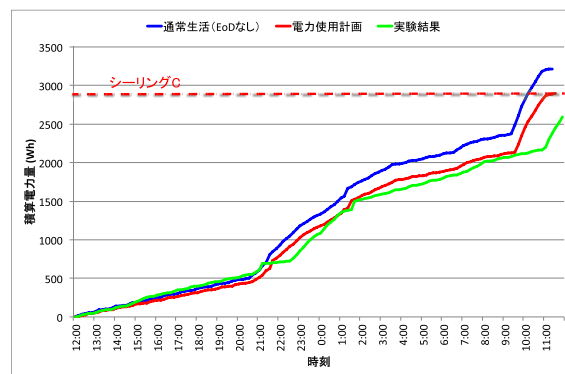
4.4 生活実験

最後に実際にEoDシステムを使いながら生活を行った結果を示す。20代男性の被験者が、まず1日間EoDシステムを使わずに使用電力の記録のみを行いながら生活し、通常生活における機器ごとの電力の使用データを収集した。

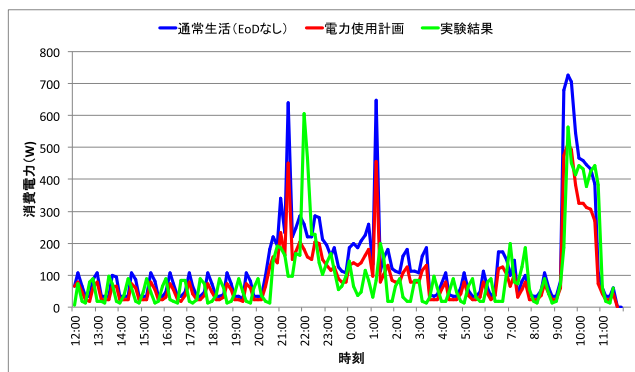
このときの実際の電力データを電力使用予測として用い、積算電力の上限値 $M(t)$ として 2,000 W、積算電力の



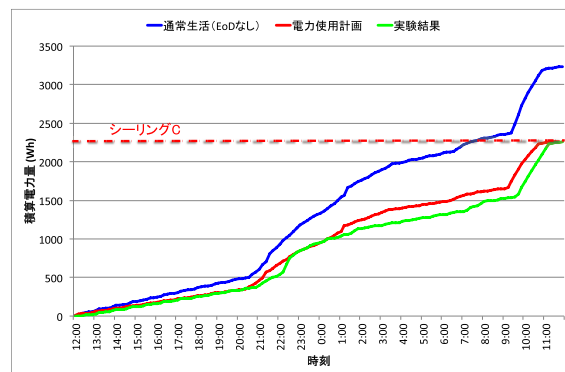
(a-1) 節電率 10% (消費電力)



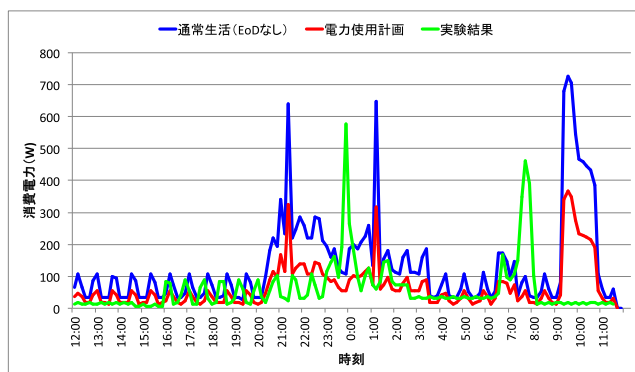
(a-2) 節電率 10% (積算電力量)



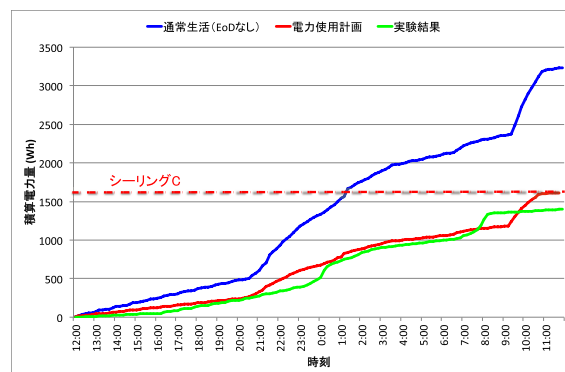
(b-1) 節電率 30% (消費電力)



(b-2) 節電率 30% (積算電力量)



(c-1) 節電率 50% (消費電力)



(c-2) 節電率 50% (積算電力量)

図 12 実験結果

Fig. 12 Experimental results.

上限値 C としては、実際に生活したときの最終的な積算電力量 (3,233 Wh) を 10%, 30%, 50%削減値 (それぞれ 2,910 Wh, 2,263 Wh, 1,617 Wh) に設定して電力使用計画を作成した。

また、それぞれの電力使用計画を用いて、それぞれ別の日に EoD なしで生活したときと同じような生活パターンで EoD システムを使って生活をして実験結果を得た。なお、このときの同じような生活パターンとは、同じ被験者に対して大まかな生活スケジュール (帰宅, 調理, 食事, 風呂, 睡眠, 起床, 洗濯, 外出のおおまかな時刻) を指示して生活した結果であり、厳密な使用家電やその使用タイミングは異なっている。

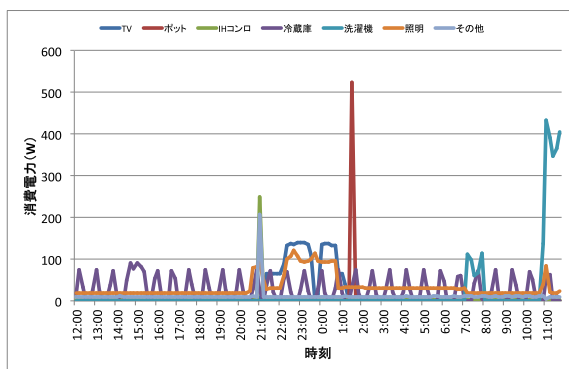
実験結果を図 12 に示す。図 12(a-1), (b-1), (c-1) は家

全体の消費電力の 10 分ごとの平均, (a-2), (b-2), (c-2) は積算電力量を表している。図中の青い線は EoD システムを使用しない通常の生活の場合, 赤色の線はそれを用いて作成した電力使用計画, 緑色の線は EoD システムを使って生活したときの使用電力を表している。また積算電力量のグラフの赤色の破線はシーリング C を表している。

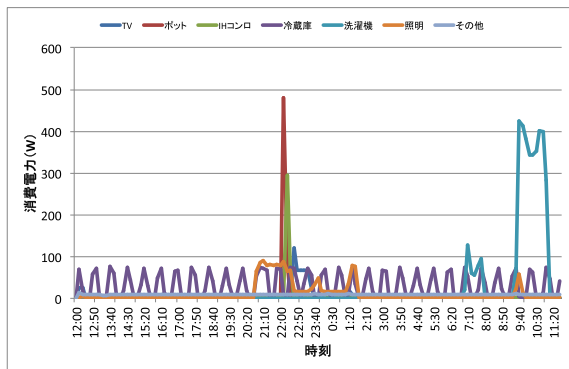
このとき、通常生活においても EoD システムを使った場合においても、最大瞬時電力 (2,000 W) を超える電力使用はみられなかった。消費電力 (a-1), (b-1), (c-1) をみると時間帯ごとの電力使用計画を一時的に超過している部分が存在していることが分かる。これは電力使用計画 (赤線) を作成するのに使った通常生活時 (青線) と、EoD システムを使った生活時では、厳密には使用家電やその使用

タイミングが異なっているためである。これにより計画と一致せず、一時的には計画を超過するような家電の使用パターンを許容していることが分かる。一方で、積算電力量(a-2), (b-2), (c-2)を見ると、10%, 30%, 50%カットの電力使用計画に対して、積算電力量(緑色)が最終的にシーリング(赤色の破線)以下に抑えられていることが分かる。これは、本アルゴリズムではある時間までに計画より電力を使用しなかった場合には、あとの時刻の目標値を増加し、計画以上に電力を使用した場合は目標値を減少させることで、生活パターンの変化を許容しつつ最終的にシーリングを満たすようにしているためである。

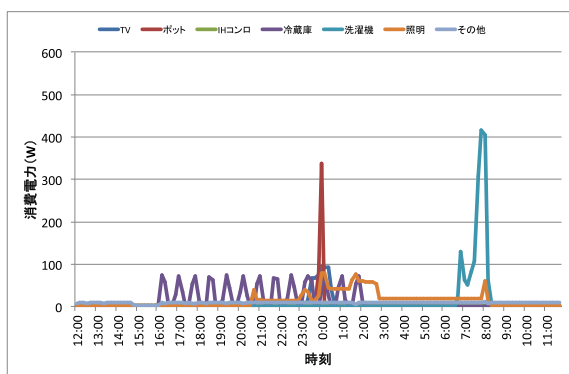
また、10分ごとの平均電力をみると10%, 30%までは、EoD システムを使わない場合に比べて全体的に消費電力が



(a) 節電率 10%



(b) 節電率 30%



(c) 節電率 50%

図 13 家電ごとの使用電力

Fig. 13 Power consumption for each appliance.

小さくなっているが、全体的には厳密な生活パターンの違いはあるものの同じような変動パターンを示していることが分かる。

さらに詳細な生活パターンをみるために、家電ごとの消費電力の変化を図 13 に示す。この図をみると、節電率 30%は 10%に比べて照明や TV で削減されている。これは、どちらもユーザは特に調整せずに使用しているが、30%ではシステムが消費電力削減のために照明や TV の明るさを若干暗く調節したためである。また、それ以外の家電の電力パターンはあまり変化がなく通常どおり利用できたことが分かる。なお、10%のときのみ 21 時前後でその他の消費電力があがっているのは、この日だけ電子レンジを 1 度使用したためであり、他の日には使用しなかった。

これらの結果に対して節電率 50%の場合には、クラス 8 (調節不可) の洗濯機は使用できているが全体的に大幅に電力が抑えられ使用できない家電が増えている。たとえば照明の電力が大幅に減少し 0 W の箇所(照明オフ)も多く存在する。また、冷蔵庫の消費電力が 0 の区間があり電源をオフにしている様子が分かる。また、ポットの電力も大幅に削減されており沸騰するまでに時間がかかった。またテレビの使用時間が少なくなっているがこれはシステムが電源をオフにしたためであった。この結果予定した生活はできたものの部屋が暗すぎる、ポットが沸騰までに時間がかかる、テレビが見られないなど被験者に著しく多くの不便さを強いていると考えられる。

つまり、この実験の生活パターンの場合には、最終的な積算電力量はどの結果もシーリング以下に保つことができ、また、節電率 30%までは大きな不便さを強いることなく削減が実施できているが、50%では使用家電が著しく制限され、ユーザの生活の質を損なっていると考えられる。

5. 考察

本研究では、事前に電力使用予測にとユーザが設定する最大瞬時電力と積算電力量のシーリングに基づいて作成する電力使用計画と、それに基づきつつ実際の生活のなかでの電力使用要求を調停する調停アルゴリズムによって、最大瞬時電力と積算電力量のシーリングを維持する手法を提案した。また生活パターンの変化に対しても、電力使用計画と実際の電力使用量の差をフィードバックしながら柔軟に対応し、かつ、使用電力や経過時間によって動的に変化する優先度関数によって、できるだけユーザの生活の質を維持する枠組みを作成した。実験では、限定された条件ではあるが、生活パターンが大きく変化しなければ、実際の生活の中でも 30%削減まではある程度有効であることを示した。

今回の実験では、優先度を決めるパラメータは事前に人手で調整を行い、また電力使用計画を作成するときに電力使用予測に用いた生活パターンと、調停を行うときの生活

パターンが大きく異なる場合について実験を行い、その人にとっての標準的な生活スタイルのときには有効であることを示したが、本システムを実用化するにあたっては、生活パターンの変化や標準的でない生活パターンに対しての対処が問題となると考えられる。

つまり、このような優先度や消費電力パターンは、個人の嗜好や生活パターン、季節などによっても変化し、またさらに同じ対象人物であっても、ライフスタイルや意識の変化によって変わると考えられ、今後はこれらの生活パターンや、個人の嗜好、ライフスタイルに応じた優先度パラメータの学習、状況に応じて変化する優先度の決め方、生活パターンに合わせた電力使用予測の学習が欠かせない。また、これらの学習を行って電力使用計画で使用する生活パターンの変化にある程度対応したとしても、突発的なイベントやその日の気分などの時と場合によって、使いたい電力量や優先度が変化することは十分考えられ、生活者が明示的/暗黙的に優先度を更新し、場合によってはシーリングなどの制限も緩和するための、自然かつ使いやすいインタフェースの開発が必要不可欠である。このような個人や季節などへ適応するための学習方法、経年的なライフスタイルの変化に対する学習結果のインタラクティブな更新方法、および、突発的な変化や気分の変化に柔軟に対応するためのインタフェースの開発を今後行っていくことが必要である。

また、今回電子レンジ、掃除機など即時に利用できないと困る家電はすべてクラス VIII の調停不可能な家電として扱っているが、このような家電ばかりを使っているときには、電力の削減を行うことはできない。このような場合には直接的に電力制御を行うだけではなく、ユーザに対してアナウンスを行い、ユーザ自身で節電に努めてもらう仕組みや、電力使用計画についても最大瞬間電力とシーリングの設定による自動作成だけでなく、生活で注意すべき点や削減すべき点などをユーザと相談しながら、電力使用計画や優先度を修正するためのコンサルティング機能なども必要と考えられる。

6. まとめ

本研究では、家庭・オフィス・工場など需要家サイドの新しい電力マネジメントシステムであるオンデマンド型電力制御システム (Energy on Demand: EoD) を提案した。EoD は調停に基づく電力供給によって、ユーザが設定した最大瞬間電力、積算電力量へのシーリングなどの節電率を保証することができる新しい需要家サイド電力管理システムである。

また、スマートグリッド [1], [2] におけるデマンドレスポンスなどの需給逼迫時の電力削減要請に対して、電力会社との契約に基づいて自動的に上限値を設定することで、確実に電力削減が可能なスマートデマンドレスポンスが実現

可能である。また、ピーク時の電力の電気代を高く設定する時間帯別料金制度においても、事前に電力コストを最小化するような電力使用計画を立てておくことで、需要家にとってコスト削減でき、また供給側にとっても電力の平準化を実現することが可能である。

今回の結果は、ある 1 人暮らしに対する結果を一例として示したが、今後の課題として、様々な季節、家族構成に対して実験を行い、本手法の有効性を確認することがあげられる。また、今回は商用電源のみの単一電源を想定し、家電の調停に焦点をあてているが、現在、太陽光発電、蓄電池などの複数電源の管理への拡張についても検討している。さらに、実用化に向けて生活スタイルの変化や季節の変化に対応できる柔軟な電力使用計画の作成法、個人の嗜好に合わせた優先度の学習法、突発的なイベントやそのときの気分による優先度の変化などに対応するためのインタフェースの開発などについても検討する。

謝辞 本研究の一部は、JST, CREST および科学研究費補助金若手研究 (B) (23700169) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] NIST: Smart Grid Home Page, National Institute of Standards and Technology (online), available from <http://www.nist.gov/smartgrid/> (accessed 2012-05-29).
- [2] 村瀬一郎, 佐藤昭雄: 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).
- [3] Lau, R., Ayyorgun, S., Mau, S.C., Bushby, S. and Holmberg, D.: Strategy and Modeling for Building DR Optimization, *2nd IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm2011)*, Brussels Belgium, pp.399–404 (2011).
- [4] Bu, S., Yu, F.R. and Liu, P.X.: A Game-Theoretical Decision-Making Scheme for Electricity Retailers in the Smart Grid with Demand-Side Management, *2nd IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm2011)*, Brussels Belgium, pp.405–409 (2011).
- [5] Kim, H., Kim, Y.-J., Yang, K. and Thottan, M.: Cloud-based Demand Response for Smart Grid: Architecture and Distributed Algorithms, *2nd IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm2011)*, Brussels Belgium, pp.416–421 (2011).
- [6] Babu, C.A. and Ashok, S.: Peak Load Management in Electrolytic Process Industries, *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.23, pp.309–405 (2008).
- [7] Ramanathan, B. and Vittal, V.: A Framework for Evaluation of Advanced Direct Load Control With Minimum Disruption, *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.23, No.4, pp.1681–1688 (2008).
- [8] 住環境計画研究所: 平成 17 年度一般家庭における HEMS 導入実証試験による省エネルギー効果の評価解析成果報告書, 技術報告, 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2006).
- [9] (社) 人間生活工学研究センター: 人の好みや行動パターンに応じた HEMS/BEMS 技術の研究開発, 技術報告, 新

- エネルギー・産業技術総合開発機構 (2007).
- [10] 鶴見俊一郎: ホームオートメーションとその背景と現実, オフィス・オートメーション, Vol.8, No.5, pp.38-43 (1988).
 - [11] 中内 靖: ユビキタスセンサによるホームオートメーションシステム, 信学技法 MVE, マルチメディア・仮想環境基礎, Vol.106, No.396, pp.11-16 (2006).
 - [12] Helal, S., Mann, W., El-Zabadani, H., King, J., Kaddoura, Y. and Jasen, E.: The Gator tech smart house: A programmable pervasive space, *Computer*, Vol.38, No.3, pp.64-74 (2005).
 - [13] 山崎達也: 家族を結ぶ情報通信技術, 情報通信研究機構 (オンライン), 入手先 <http://www.nict.go.jp/publication/NICT-News/0408/p02.html> (参照 2012-10-19).
 - [14] 野間春夫, 安部伸治, 多田昌裕: 消費エネルギー抑制ホームネットワーク技術のためのライフスタイルの分析, 信学技法 GN, グループウェアとネットワークサービス, 2010-GN-76(5), pp.1-8 (2010).
 - [15] 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).
 - [16] 飯村 憲, 前野一夫, 梅村周市, 加藤良之: 分散エネルギーシステムに向けた HEMS コントローラの開発, 日本エネルギー学会大会講演要旨集 (30), pp.288-289 (2011).
 - [17] ECHONET コンソーシアム: ECHONET 規格, (オンライン), 入手先 <http://www.echonet.gr.jp/spec/index.htm> (参照 2012-05-29).
 - [18] ZigBee Alliance: ZigBee RF4CE Overview (online), available from <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBeeRF4CE/Overview.aspx> (accessed 2012-05-29).
 - [19] ZigBee Alliance: ZigBee Smart Energy Profile (online), available from <http://www.zigbee.org/Standards/ZigBeeSmartEnergy/Overview.aspx> (accessed 2012-05-29).
 - [20] 加藤丈和, 松山隆司: i-Energy Profile: スマートタップネットワークによるエネルギーの情報化プロフィール, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J94-B, No.10, pp.1232-1245 (2011).
 - [21] OSGi Alliance: OSGi Alliance Home Page (online), available from <http://www.osgi.org/Main/HomePage> (accessed 2012-05-08).



加藤 丈和 (正会員)

1997 年岡山大学工学部情報工学科卒業. 2001 年同大学大学院博士課程修了. 産業技術総合研究所特別研究員. 和歌山大学助手, 年同大学講師, 情報通信研究機構特別研究員を経て, 2010 年より京都大学情報学研究科特定研究員. パターン認識, データマイニング, エネルギーの情報化の研究に従事. 電子情報通信学会, IEEE 各会員.



湯浅 健史

2011 年京都大学工学部電気電子工学科卒業. 現在, 同大学大学院情報学研究科修士課程在学中. エネルギーの情報化に関する研究を行っている.



松山 隆司 (フェロー)

1976 年京都大学大学院修士課程修了. 京都大学助手, 東北大学助教授, 岡山大学教授を経て, 1995 年より京都大学大学院電子通信工学専攻教授. 現在, 同大学大学院情報学研究科知能情報学専攻教授. 2002 年学術情報メディアセンター長, 京都大学評議員, 2005 年情報環境機構長. 2008 年副理事. 工学博士. 画像理解, 分散協調視覚, 3 次元ビデオの研究に従事. 最近は「人間と共生する情報システム」, 「エネルギーの情報化」の実現に興味を持っている. 2009 年文部科学大臣表彰科学技術賞 (研究部門) 等受賞. 国際パターン認識連合, 情報処理学会, 電子情報通信学会フェロー. 日本学術会議連携会員.