



2.

グリーン ICT による スマートな社会の創出

松山 隆司 加藤 丈和 京都大学 塚本 昌彦 神戸大学
丹 康雄 北陸先端科学技術大学院大学 岡部 寿男 京都大学

家庭におけるスマートなエネルギー管理に向けて

震災後の電力需給の逼迫に伴い、2011年は東北・関東地方で大規模な電力使用削減が実施され、2012年も関西を中心に大幅な節電が実施されている。一方、小規模な需要家や一般家庭においては、使用電力の抑制は呼びかけにとどまり、計画停電以外に確実に電力消費を減らす方法がないのが実状である。

本稿では、一般家庭におけるエネルギー管理に焦点を当て、家庭で消費される電力に対して、情報通信技術 (ICT) を利用して、生活者の利便を損なわず、かつ生活者が意識することなく、確実に消費電力の削減を達成する技術を確認することを目的とする研究の動向について紹介する。

需要家サイドにおけるスマートエネルギーマネジメントの実現を目指す「エネルギーの情報化」の考え方、実現プロセスについては、筆者の一人 (松山) が本誌の特集で述べている¹⁾。本稿ではまず次章において、エネルギーの情報化の中核を成す「オンデマンド型電力制御システム (EoD: Energy on Demand)」に焦点を当て、その基本的な考え方や実現方法と生活実証実験の結果を紹介し、EoD システムによって節電率が保証された省エネシステムが実現できることを示す。

次に、「ユビキタスコンピューティングによるグリーン ICT」の章では、物や場所に埋め込まれたコン

ピュータを連携させて利用するユビキタスコンピューティングで、人々の日々の暮らしが大きく変わろうとしている現状を踏まえ、ICT 活用により環境負荷低減を目指すグリーン ICT へのユビキタスコンピューティングの適用について、特に EoD を有効活用するために人々の行動を予測しながらエネルギー需要を予測する手法を中心に解説を行う。

家庭内の機器を情報通信ネットワークに接続してさまざまなサービスを実現しようとする試みは1970年代から継続して行われており、時代ごとに新たな技術やニーズに基づき進歩を遂げてきた。現在の「スマート」ハウスのポイントは、常時接続広域ネットワークの存在と、その背後にあるクラウドサービスの出現にあるが、実現可能なことと期待されることの乖離が過去に例をみないほど大きくなっていることも特徴の1つである。そこで、「スマートハウスを構築するホームネットワーク技術の現状」の章では、エネルギーマネジメント分野を中心に、我が国におけるスマートハウスやスマートメータの震災後の動きと、それに関連した技術の現状について概説する。

オンデマンド型電力制御システム ～エネルギーの情報化による削減率保証付き 省エネシステムの実現～

◆ 「エネルギーの情報化」とは

福島第一原子力発電所事故以来、我が国の電力シ

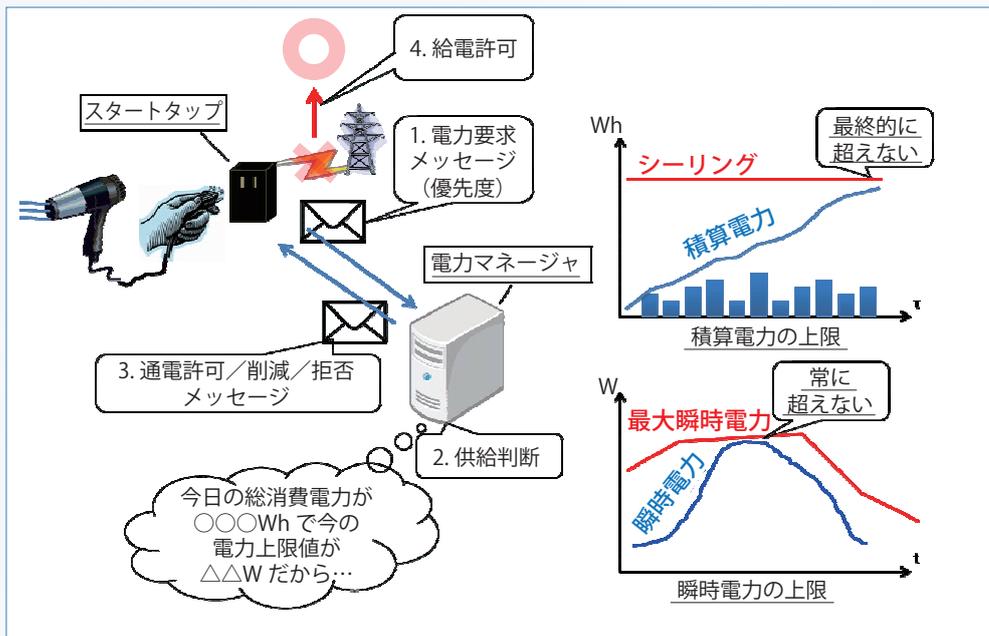


図-1 オンデマンド型電力制御システム

システムの在り方についてさまざまな議論が行われている。その1つとしてスマートグリッドがあり、①スマートメータ（ネットワーク接続されたデジタル積算電力計）による消費電力の見える化、②電力需給の逼迫時に消費電力の抑制を需要家に要請するデマンドレスポンスの実施、③さらには電力需要に応じて電力料金を変動させるダイナミックプライシング制度の導入、などを行おうというものであり、米国の社会実験では、10%程度の省エネが実現できていることが示されている。

これに対し松山・加藤らは家庭、オフィス、工場といった電力の需要家が、太陽光発電や蓄電池などの分散電源を導入し、自律的に電力マネジメントを行うことを目指した「エネルギーの情報化」¹⁾という考え方を提唱している。本章では、その中でも需要家による電力管理の中核技術として開発を進めているオンデマンド型電力制御システムを紹介する。

◆ オンデマンド型電力制御システムの動作原理

図-1は、オンデマンド型電力制御システム (EoD: Energy on Demand) の動作原理を示したもので、以下のような通信・制御プロトコルとして定義される。

1) ユーザが電気機器のスイッチを入れると、すぐ

に給電されず、代わりに電力要求量・機器特性・優先度などを記した電力要求メッセージを電力マネージャに送信。

2) 電力マネージャは、動作中・要求家電の消費電力や優先度、および各電源の供給電力や供給能力に基づいて要求を調停し、電力供給の可否、供給電力を決定して電力割当てメッセージを家電に送信。

3) 電力割当てメッセージを受け取った家電は、割り当てられた電力を使用して動作を開始。

このように、電力マネージャによる調停に基づいて電気機器への電力供給を制御することで、ユーザが設定した削減率の保証を実現する。

◆ EoD システムの実現法

スマート家電

白熱電球や電熱器のような単純な電気機器の場合は、スタートタップ（電力計測・制御・通信機能を持つコンセント）によって ON/OFF 切り替えや連続的な電力制御を容易に行うことができる。一方、エアコンや洗濯機など多様な運転モードを持ち、自動的にモード制御を行う電気機器の電力制御はスタートタップだけで行うことはできない。そこで、筆者らは、このような電気機器に対し、モード制御を無

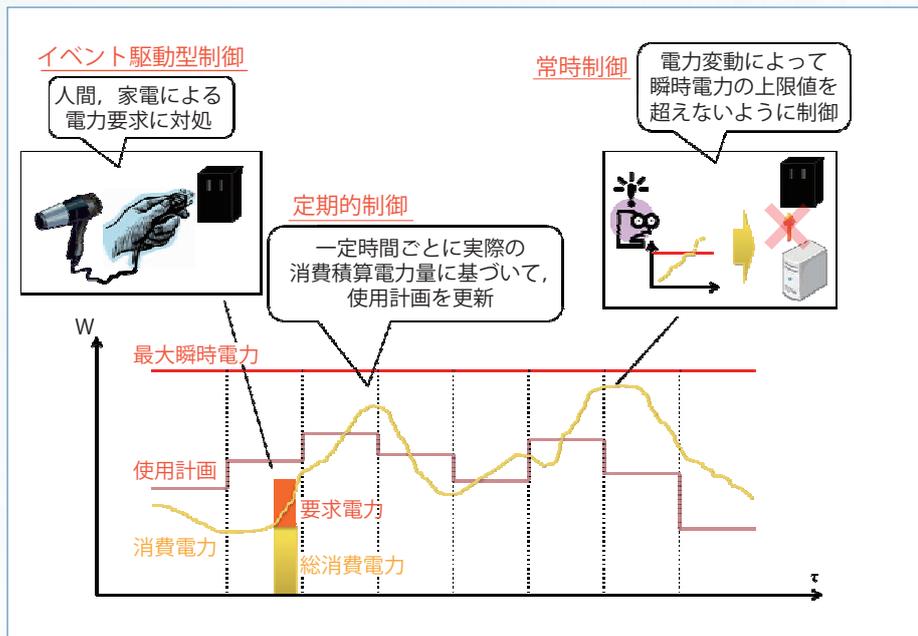


図-2 リアルタイム制御プロセス

線ネットワーク経由で行えるように改良した。こうしたスマート家電は、現在は市販されていないが、経済産業省が HEMS (Home Energy Management System) の統一規格として推奨している「ECHONET Lite (エコネットライト)」を備えた電気機器が近い将来市販されることが予想され、それを通信基盤として EoD プロトコルを実装すれば、EoD システムとして機能するスマート家電が実現できると考えている。

電気機器の優先度制御

電気機器への給電制御は、その機器の優先度に基づいて行われるため、優先度設定の妥当性によって、生活の質 (QoL: Quality of Life) が左右される。開発した EoD システムでは、電気機器の特性に合わせて優先度を動的に変化させるという方法を採用している。たとえば、エアコンの場合は、スイッチが ON されても、しばらくは給電を待機させることが可能であり、また運転中に短時間一時停止を行っても QoL に大きな影響は生じない。このような家電の特性に合わせて、優先度を動作状況に対して動的に変化させるように設計した。

電力マネージャの実現法

電力マネージャには、以下の機能がある。

1. 標準電力使用モデルの学習

季節、天候、曜日ごとに、スマートタップで計測された電力消費データから、その日の瞬時電力、積算電力の変化パターンを学習、予測する。

2. 電力使用計画の策定

利用者 (住人、オフィス・工場のマネージャ) が、電力料金や需給状態をもとに、その日 (週、月) の積算電力量の上限値および各時刻における最大瞬時電力の上限値を設定し、それに合わせて 1. で求めた標準電力使用モデルを修正し、電力使用計画を策定する。

3. リアルタイム電力制御プロセス

次の 3 つの電力制御プロセスにより、上記の計画に従って電力供給を制御する (図-2)。

- ① イベント駆動型制御プロセス：人間の操作、自動制御による電力要求メッセージに対して、通電許可・電力削減・通電停止などの制御を行う。
- ② 常時制御プロセス：消費電力を常時監視し、電気機器の消費電力変動によって最大瞬時電力の制限値を超えそうな場合は、優先度の低い機器への電力削減、通電停止などの制御を行う。
- ③ 定期的制御プロセス：一定時間ごとに計画値の修正を行い、その日 (週、月) ごとに定められた積算電力量の制限が満たされるように制御する。

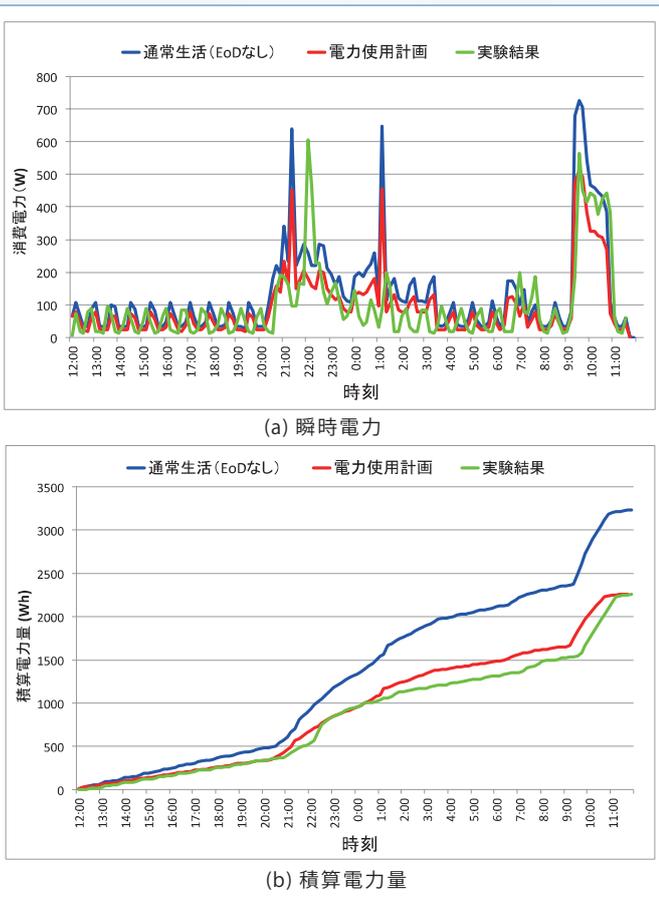


図-3 EoDシステムの実験結果

◆ スマートマンションでの実験結果

図-3にEoDシステムを実装したスマートマンション²⁾における生活実証実験の結果の一例を示す。(a)が瞬時電力、(b)が積算電力量であり、青線がEoDを使用しない場合の生活における消費電力、赤線が制限値を満たすように修正された電力使用計画、緑線がEoDシステムによる電力制御の結果得られた消費電力である。このとき設定した制限値は最大瞬時電力を1,200W、積算電力量のシーリングはEoDを使用しない場合の30%減となっており、指定された省エネ率が確実に実現されていることが分かる。

オンデマンド型電力制御システムが、多くの家庭、オフィス、工場に導入されれば、消費電力を確実に計画、制御することができるようになり、変動が大きい再生可能エネルギーの導入促進、ごく短時間の電力需要ピークに備えた大規模発電装置の削減など

を通じて、エネルギー効率の高い、持続可能な社会が実現できるのではないかと考えている。こうした社会の実現を目指して松山・加藤らは、2009年からエネルギーの情報化WG^{☆1}という産学連携組織を作り、研究開発、商品化を目指した活動を展開している。

ユビキタスコンピューティングによるグリーンICT

◆ ユビキタスコンピューティングの進展

コンピュータはその出現以来急激に小型・軽量化が進んできた。また、それとともに使われ方がドラスティックに変わってきた。一昔前に見ると「つまらない」使い方が、広く使われるようになると「なくてはならない」ものに変化する過程を、我々は数多く目撃している。今後コンピュータはさらに小さくなり、ゴマ粒大、豆粒大のものになるだろう。そうするとそれらは、実世界の中で人々の生活に密着した用途に使われるようになる。実世界のあらゆる場所で、人やもの、場所などに埋め込まれたコンピュータを利用するスタイルはユビキタスコンピューティングと呼ばれ、そのような利用スタイルや利用環境の構築に向けて数多くの研究開発が進められている。

ユビキタスコンピュータを用いれば日常の人々の行動を見守り、予測し、適切にサポートすることができる。そのサポートの方向性は大きく2つ考えられている。1つは、安全・安心、健康、エコなどの生活を便利にする方向であり、もう1つは、アート、エンタテインメントなどの生活を豊かで楽しくする方向である。これらを実現するには生活スタイルの新たな創造が必要である。

技術的観点からこれらを実現するために、多数のコンピュータを自律的に動作させ、それらを自動的に連携させる研究が進められている³⁾。1つの典型的なアプローチはルールベースのアプローチであり、

☆1 <http://www.i-energy.jp>

各デバイスには動作パターンを表す IF-THEN ルールを格納しておき、常時そのルールを実行し続けておくというものである。ルールはダイナミックな動作の最小表現であり、コンパクトな処理系での実装、自律的動作、後述するグローバルな解析が可能となるなどの点で有効である。

◆ ユビキタスコンピューティングはグリーン ICT にどのように役立つか

前章で述べたオンデマンド型電力制御システム (EoD) は、電力網側で電力消費の基本的管理を行う手段を与えるものである。

EoD の環境下において電力を使用する機器は、使用する電力のパラメータを明示してエネルギーの要求を電力網に対して行うが、機器を使用するときには、その機器が網に対して適切な要求を行わなければならないという点が問題となる。ここで適切な要求とは、機器が使われる際、これからどれだけの電力が必要かを適切に算出することにあたる。機器の使い方を予測するためにはユーザの行動予測が必要であり、ここはまさにユビキタスコンピューティングが有効といえる。

塚本らの研究グループでは、ルールベースのユビキタス環境をベースに HEMS を構築している。家電機器やセンサなどはユビキタスコンピュータそのものであり、その上でルールエンジンを動作させる。問題はいかにして全体として整合的な動作を行わせるかという点にあるが、解決方法の1つがマクロプログラミング、すなわちグローバルな動作ルール(グローバルルール)を記述して、コンパイラによってそれを各機器向けのルール(ローカルルール)に分解する手法である。また、動作記述の抽象度を高めるため、一段階上のメタのレベルで家電制御のポリシーを記述し(グローバルメタルール)、そこから電力や機器動作の情報を組み合わせて実際のグローバルルールを生成するという階層的なルール生成のアプローチをとる(図-4)。このようなマクロプログラミングにより全体として整合性のある連携が容易

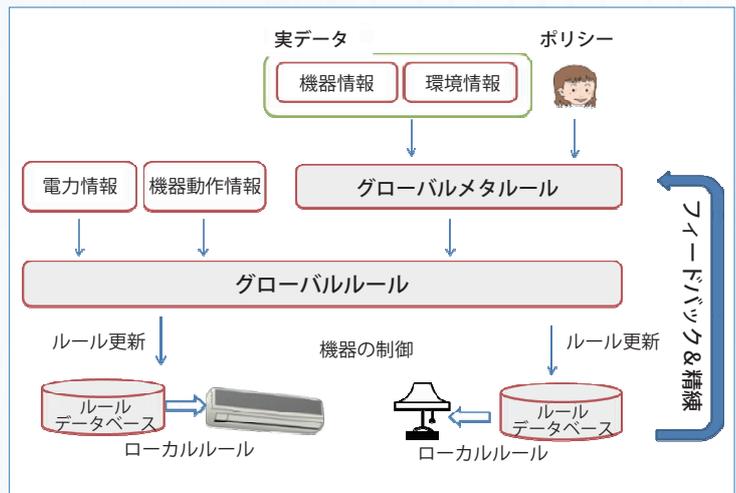


図-4 ルール変換のアーキテクチャ

に実現できることになる。また実環境下で集められた情報はグローバルメタルールにフィードバックされ、再びグローバルルール、ローカルルールを生成して動的にルールを更新することでルールが精練されていくようにする。フィードバックメカニズムとしては、電力使用量や使用パターン、センサパターンなどをルールで収集し、サーバに蓄積する。この点に関しては、人やモノの位置測定、ユーザ推定や使用量推定についての多くの研究が行われており、それらを適宜組み合わせる利用することが有効である。その後、パターンを解析してルールを生成する。これについてもパターンマイニングやプロファイル生成などの研究は多く行われており、それらの技術の適用が有効である。問題は導入インセンティブ(あるいはコスト)であるが、ロボット、見守り、防犯、健康、災害救助、健康など複合的な目的を考えると有効であると考えている。

スマートハウスを構築する ホームネットワーク技術の現状

◆ 昨今の「スマート化」の実態

「スマートハウス」や「スマートメータ」が急速に現実味を帯びてきた。2012年になり住宅メーカ各社は各々独自のスマートハウスをカタログに載せはじめ、経済産業省による「エネルギー管理システム導



入促進事業補助金 (HEMS 導入事業)」の対象となるシステムも 2012 年 6 月 25 日現在で 16 社 38 製品にのぼっている^{☆2}。また、3 月から 4 月にかけて東京電力が原子力損害賠償支援機構とともに行った、東京電力のスマートメータの仕様に対する意見募集^{☆3}には 482 件におよぶ意見が寄せられ、近々調達仕様が策定されようとしているが、その背景には国家戦略室のエネルギー環境会議が 2011 年 7 月 29 日に公表した「当面の供給安定策」において、今後 5 年以内に総需要の 8 割をスマートメータ化するという目標が掲げられていることがある。

このような動きは、確かに当該分野において蓄積されてきた研究開発成果を実用化するものとして歓迎されるべきことであるが、少々疑念を抱かざるを得ないことがあるのも事実である。それは、一言で言えば今回導入されつつあるものが、決して「スマート」ではないということに起因する。スマートハウスは本来「賢い家」であるから、エネルギーマネジメントをはじめ、見守り、防災、健康管理など、さまざまな分野のアプリケーションに対応したプラットフォームであって然るべきである。しかし現在のスマートハウスはエネルギー管理機能に特化しているだけでなく、その実装方法も固定的で特定機能を実現した組込みシステムの様相を呈している。また、スマートメータは、単に使用電力の測定を行うメータというだけでなく、広域ネットワークと家庭を接続する一種のゲートウェイであり、家庭内の装置を制御して電力の削減やピークシフトをするため、ネットワーク内のサービスと連携して動作するコントローラとしての役割も期待され、場合によっては現在のインターネット接続で実現されているサービスを一部吸収してしまう可能性さえも取り沙汰されていた。しかしながら今回、我が国で導入されるものは単に遠隔検針を実現しただけのネットワーク接続型電力計であることが明らかとなってお

り、この電力計から、ローカルでも電子的な方法で情報が取れるか、つまり、自分の家の電力計の情報を自分の持つ電子機器で読み取れるインタフェースが用意されるのかどうかで議論が起こっているような状況である（一応、国の方針としては付けることにしたのではあるが）。震災前は、スマートグリッドについては、米国とは異なる我が国の安定した電力供給網を前提に、新たな一步を踏み出すための位置付けで議論されてきた面もあったが、震災を機に流れは大きく変わってしまい、短期で実現可能な路線に向いていると言うことができよう。

このような状況ではあるが、進展した事柄も少なからず存在する。その代表格が、ECHONET^{☆4}が ECHONET Lite という新しいバージョンになるとともに改めて日本としての標準技術の座に位置付けられたことであり、もう 1 つは創エネ・蓄エネ機器の実用化が進展したことである。ここでは前者について述べることにする。

◆ ECHONET の進展

2012 年 2 月 24 日、経済産業省はスマートハウス標準化検討会とりまとめの公表⁴⁾を行った。この中で、HEMS の機器間、および、スマートメータと HEMS 間で利用するプロトコルとして ECHONET Lite を推奨することが明確に謳われ、さらに、スマートメータと HEMS 間の接続媒体として、参考という位置付けではあるものの、無線 LAN (Wi-Fi)、920MHz 帯の小電力無線、500KHz 以下の帯域を使うタイプの PLC の 3 種類が推奨される通信技術として取り上げられた。

以前、丹が本会誌の特集⁵⁾にて述べたように、HEMS を実現するためには、a) 各家電機器や住設機器をつなぐ技術、b) それらの機器を共通のプロトコルと共通のデータ構造で扱えるようにするための技術、c) 接続された機器群を適切に制御できるようにするための技術が必要であり、ECHONET は a) および b) を実現するものとして重要な位置付けにあった。このうち、b) は HEMS として本質的な規程であるが、a) は通信技術であり、M2M (Machine

^{☆2} http://sii.or.jp/energy_system_hems/device.html

^{☆3} http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1202508_1834.html

^{☆4} <http://www.echonet.gr.jp/>

to Machine) や IoT (Internet of Things) といった言葉が頻りに聞かれる現在となつては特に HEMS に特化して技術開発をする必然性は薄れている。ECHONET においても技術仕様から a) の部分を外し、b) に特化する検討がここ数年行われてきており、2011 年 6 月に発表された ECHONET Lite という新規格として結実した。従来どおりに下位レイヤの規程も含んだ新バージョンである ECHONET 4.0 も同時期に発表され、この時点で ECHONET 規格は 2 つに分岐することとなった。これらの 2 つの規格で、機器オブジェクトを規定した文書は共用されており、やりとりされるデータ構造は同一ということになる。機器オブジェクトでは創エネ・蓄エネ機器を中心とした強化が行われており、HEMS システムの実現を念頭に置いた改訂となっている。ECHONET Lite では従来の ECHONET 規格で使われなかった部分を整理し、通信手順の見直しを行うなど、現実に合わせて変更が行われており、上記のように推奨規格となったこともあり、今後は ECHONET Lite が主流になるものと考えられている。

◆ 今後の課題

本来の意味のスマートハウスを実現するにあたっては前節で述べた c) の技術が重要な役割を果たすが、現状、この点は置き去りにされている感が強い。この分野はまさに ICT システムであり、本会が貢献できる点も多いものと思われる。また、創エネ・蓄エネ機器は世の中に姿を見せつつあるが、直流での相互接続ができておらず、また、エネルギーの流れを制御する機器類は商品化されていない。こうしたエネルギー機器が実用になれば、制御に対する要求が増し、より一層 ICT 分野が貢献できる部分が広がるものと思われる。

執筆にあたって

本稿は、同名のタイトルで 2011 年 10 月 26 日に行われた本会連続セミナー「コンシューマが切り拓くデジタル化社会の新しい潮流」第 2 回における筆

者らの講演内容をベースに、本会誌 Vol.51 No.8 の特集「エネルギーの情報化—IT による電力マネジメント—」で扱った内容と重ならないように配慮しつつ新たに書き起こしたものである。紙面の制約で書けなかったこともあるのでぜひ同特集での筆者らの解説も合わせてご覧いただきたい。

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 (Aug. 2010).
- 2) 加藤文和、松山隆司：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、情報処理学会研究報告、Vol.2011-CDS-2, No.6 (Sep. 2011).
- 3) 塚本昌彦：シンビオティック・システムの実現に向けて～人、社会、環境、情報システムの協調系～：5. ウェアラブル・ユビキタスコンピューティング、情報処理、Vol.47, No.8, pp.836-843 (Aug. 2006).
- 4) JSCA 国際標準化 WG スマートハウス標準化検討会とりまとめの公表、経済産業省プレスリリース、<http://www.meti.go.jp/press/2011/02/201102224007/201102224007.html>
- 5) 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 (Aug. 2010).

(2012 年 7 月 13 日受付)

松山隆司 (正会員) | tm@i.kyoto-u.ac.jp

1976 年京大院修士了。同大助手、東北大助教授、岡山大教授を経て 1995 年より京大教授。工博。画像理解、コンピュータビジョンに加え、最近は「人と共生する情報システム」、「エネルギーの情報化」の研究に従事。本会元理事。フェロー。

加藤文和 (正会員) | tkato@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

2001 年産業総合技術研究所特別研究員、2003 年和歌山大助手、2006 年同講師、2008 年情報通信研究機構専攻研究員、2009 年より京大特定研究員、2011 年より同大特定准教授。パターン認識、マシンラーニング、コンピュータビジョン、エネルギーの情報化に関する研究に従事。

塚本昌彦 (正会員) | tuka@kobe-u.ac.jp

1987 年京大工数理卒業、1989 年同大学院工学応用システム科学修士了。シャープ、大阪大を経て 2004 年より神戸大工電電気工教授。博士 (工学)。ウェアラブル・ユビキタスコンピューティング研究に従事。

丹 康雄 (正会員) | ytan@jaist.ac.jp

1993 年東工大理工学研究所博士後期課程修了。博士 (工学)。同年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手、同助教授を経て 2007 年教授。ホームネットワークに関する研究および標準化に従事。

岡部寿男 (正会員) | okabe@i.kyoto-u.ac.jp

1988 年京大院修士了。同大助手、助教授を経て、2002 年より教授。博士 (工学)。インターネットアーキテクチャ、ユビキタスネットワーク等の研究に従事。本会理事。