

無線センサネットワークを用いた 簡易型表示系 HEMS の開発と評価

安部 恵^{†1} 澤田 尚志^{†2} 増井 崇裕^{†2}
峰野 博史^{†3} 水野 忠則^{†1}

本稿では、省電力型無線通信 ZigBee によるセンサネットワークにより家庭内の住環境情報ならびに家電などのエネルギーの消費量を可視化できる簡易型表示系 HEMS (Home Energy Management System) の構築技術について提案する。提案の手法では、HEMS 普及の課題である導入コストの課題などを解決でき、かつ既存建造物および既存家電に対していっさい改変を行わずに家庭およびオフィスにおいて、簡単に表示系 HEMS を構築できる。また、ZigBee 通信の特徴を利用することで、家庭内の分電盤および、その分電盤の同電力系統につながっているすべての個別家電の消費電力を測定することで単位時間あたりの消費電力量の詳細内訳表示・分析ができる技術について述べる。実際に提案した簡易型表示系 HEMS のプロトタイプを開発し、実証実験を行った。その結果、消費電力量の詳細内訳表示・分析を行うことで、これまでに気づくことがなかった電気エネルギーの無駄使いの発見や具体的な省エネ対策を発見でき、省エネ効果の有効性を確認できた。

Development and Evaluation of Easy-HEMS for Indication Using Wireless Sensor Networks

KEIICHI ABE,^{†1} HISASHI SAWADA,^{†2} TAKAHIRO MASUI,^{†2}
HIROSHI MINENO^{†3} and TADANORI MIZUNO^{†1}

In this paper, it proposes the construction technology of Easy-HEMS (Home Energy Management System) for Indication that can make the energy consumption of living environmental information and the consumer electronic visible using Wireless Communication (ZigBee) Sensor Networks. In the technique of the proposal, the problem etc. of the introduction cost that is the problem of the HEMS spread can be solved. And, HEMS can be easily constructed in the home and the office without modifying it to an existing building and an existing consumer electronic at all. Moreover, in the use of the feature of the ZigBee communication, the technology that can display and analyze a detailed

breakdown of the amount of electric power an hour is described. We developed and evaluated proposed prototype Easy-HEMS (smart meter nodes) for Indication. As the result, we could notice the waste of electricity and share the energy-saving strategy in our laboratory.

1. はじめに

温室効果ガスの削減および化石燃料の使用合理の観点から省エネルギー対策の強化が求められている。人々の生活が快適さや豊かさを求めるライフスタイルへと変化し、民生部門では電気などのエネルギー消費が継続的に増加傾向にある。このような背景から住宅の省エネルギー対策として ICT (Information and Communication Technology) 技術を活用してエネルギーの使用状況を実時間で表示したり、室内状況に応じて家電機器などを自動制御したりする HEMS (Home Energy Management System) 技術が期待されている。これまで HEMS に関しては数多く研究されている。なかでも代表的な HEMS 研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のプロジェクトを中心に実験住宅ならびにモニタ宅を使った様々な実用研究の成果が数多く報告されている。

この NEDO の HEMS 研究成果結果を住環境計画研究所¹⁾ がまとめた調査報告によると HEMS 導入普及の課題として、(i) HEMS の導入時の初期コストを低コスト化すること、(ii) 提供する省エネ情報の訴求力を高めることの 2 点を提言している。本稿ではこれらの課題について着目し、解決方法を述べる。

課題 (i) の HEMS 導入時の初期コストには、HEMS の機器購入費用以外に配線工事費などが含まれる。これらの導入コストの課題解決の研究としてスマートタップ型 HEMS の研究がある。これは家庭用コンセントと家電機器の間に CPU 内蔵の通信機能付きの電源タップ、すなわちスマートタップを入れ、家電機器ごとの消費電力の計測を行い、通信を介してその計測データをデータ収集用の上位 PC へ届けたり、家電機器の自動認識などを行ったものである。この技術の特徴は HEMS 導入時に新規配線工事不要 (No New Wire) あるいは省工事ができ、かつ既存家電に対しいっさい改変せずに HEMS を構築できるこ

^{†1} 静岡大学創造科学技術大学院

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

^{†2} 静岡大学大学院情報学研究科

Graduate School of Information, Shizuoka University

^{†3} 静岡大学情報学部

Faculty of Informatics, Shizuoka University

表 1 スマートタップ型 HEMS の比較
Table 1 Various comparisons of Smart Tap HEMS.

種類	通信方式	最大ノード数 (台)	エネルギー可視化 の対象		住環境情 報の可視 化の可否	計測 データ	制御機能
			分電盤 (建物全体)	家電毎			
NEDOプロジェクト のHEMS研究[2] (ELクエスト)	低速PLC 通信	16	○	○	×	・電力測定	・エアコン・照明などの 遠隔制御 ・待機電力削減制御
省エネナビ[3] (型式CK-5/ 中国計器工業製)	特定小電力 無線通信	4	○	△ (最大4箇所 まで)	×	・電力測定	なし
細粒度電力[4, 5] センサ (名古屋大研)	Bluetooth 通信	7 (スレープ)	×	△ (最大7箇所 まで)	×	・電力測定	なし
グリーンタップ[6] (NECシステム テクノロジー)	無線LAN, ZigBee	無線LAN(15), ZigBee (65,533)	×	○	○	・電力測定 ・温度・湿度・ 照度(オプション)	・ON/OFF制御 ・リモコン制御
簡易型表示系 HEMS(本研究)	ZigBee	65,533	○	○	○	・電力測定 ・温度・湿度・ 照度・人感(一体型)	なし (ON/OFF制御, リモコン機能の追加可能)

とである．このため家電も既存家電をそのまま利用できるもので機器費用ならびに，配線工事の大幅な低コスト化が図れる．

本研究では HEMS 導入時のコストの課題解決からこのスマートタップ型 HEMS に着目する．表 1 にスマートタップ型 HEMS の各種比較を示す．まずスマートタップ型 HEMS は通信方式により分類できる．低速 PLC (Power Line Communication) 通信を用いた研究には EL クエストの HEMS 研究²⁾ があり，特定小電力無線通信には中国計器工業社製の省エネナビ³⁾ が，Bluetooth 通信を用いたものには名古屋大学の河口教授らの提案する細粒度電力センサ^{4),5)} が，ZigBee 通信を用いたものには NEC システムテクノロジーの岩田氏らが提案するグリーンタップ⁶⁾ がある．各種通信方式を比較すると，家庭およびオフィスなどに使用しているすべての家電機器に対して，スマートタップを取り付けるとしたら ZigBee 通信の方が，1 つのネットワークに接続できる最大ノード数が 65,533 台と一番多いことが分かる．これだけ多くのノードを接続できるのであれば家庭およびオフィスで使用しているすべての家電機器に対して設置が可能である．このことから本研究では ZigBee を用いたスマートタップ型 HEMS の開発を進めてきた．さらに低コスト化を図るため今回は HEMS が持つ自動制御系機能を除いた表示系の部分に絞ることにした．その理由は NEDO の実証実験⁷⁾ において，表示系 HEMS の省エネ効果は最大 15%と大きい，エアコン・照

明などの単独の待機電力削減を行う自動制御系 HEMS では 1～3%と省エネ効果が小さいことから，本稿では費用対効果を考えると自動制御部分を省略した表示系機能だけに着目することで，最大 15%の省エネ効果が期待される表示系 HEMS を低コスト化できると考える．この省エネ効果 15%という数字は，電力中央研究所の「意識調査に基づく HEMS 普及可能性評価」報告⁸⁾ のなかで述べられているユーザが期待している省エネ率 15%とも一致しており妥当な値と考える．しかし，このような省エネ効果を最大限得るには，ユーザの省エネ意識をつねに高めることが重要となる．このことから課題 (ii) の HEMS が提供する省エネ情報の訴求力の向上が重要となる．ここで課題 (ii) の解決策について考えてみる．いくつかある解決策が提言¹⁾ されているが，なかでも無駄なエネルギーの削減箇所を提示できるきめ細かな省エネ情報を提供する機能を搭載することが有効であると提言されている．我々はこのような機能を付加するには次の 2 つが必要であると考えた．1 つは建物内の分電盤の消費電力計測による建物全体の消費電力の可視化だけでなく，建物内にある個別家電ごとの消費電力の可視化をあわせて行うことで，単位時間あたりの全消費電力量の詳細内訳を表示・分析できることである．2 つ目は建物内の住環境情報（温度センサ，照度センサ，人感センサなど）をあわせて取得できることである．今までの HEMS 研究は電気エネルギーの使用量の表示が主であったが，建物内の住環境情報をあわせて取得できれば，建物内の人の行動パターンならびに生活習慣における無駄なエネルギー使用量の解析が詳細に行える．これにより，今までに気づけなかった具体的な省エネ対策を発見できることから，ユーザの省エネ意識向上にもつながるものと考えられるため，この 2 つの条件をあげた．

表 1 の中で分電盤と個別家電の両方の消費電力の可視化ができるものに，EL クエストの HEMS 研究と中国計器工業社製の省エネナビがある．ただし，後者は個別家電に設置できる電力センサの数は最大 4 個までと制限があり，家庭内の消費電力量の詳細内訳を知るには十分でないといえる．次に住環境情報を併用取得できるものとして，グリーンタップだけが該当する．したがって，これまでのスマートタップ型 HEMS 研究においては，家庭内の全消費電力量の詳細内訳表示・分析ができ，かつ建物内の住環境情報をあわせて取得できるものは十分に実現されていない．

そこで，本研究ではグリーンタップと同様に省電力型無線通信 Zigbee を用いて，家庭およびオフィスの分電盤と個別家電の両方の消費電力を計測することで，単位時間あたりの全消費電力量の詳細内訳を明確にし，かつ住環境情報をあわせて取得することで，きめ細かな省エネ情報を提供できるスマートタップ型 HEMS の技術開発を目指している．このスマートタップには住環境情報を併用取得できるよう温度センサ，照度センサ，人感センサを搭載

したものを今回開発した．これを本稿ではスマートメータノードと呼ぶことにする．このスマートメータノードのタップに既存家電の電源コードを接続するだけで，素人でも簡易的に HEMS を構築できる．また，本研究では表示系機能に絞っているため HEMS 導入時のさらなる低コスト化が図れ，課題 (i) と (ii) の両方を解決できるものと考えられる．

本研究の HEMS はグリーントップと非常に構造がよく似ている．しかし，グリーントップの研究では分電盤側の消費電力を計測していないため，建物全体の消費電力量を把握するには建物内のすべての AC コンセントやテーブルタップをスマートタップに置き換ええないといけないという課題がある．また実証実験結果などで省エネ効果の有効性について詳細に示されていない．したがって，本稿では HEMS 導入普及の課題を解決する技術として，省電力型無線通信 ZigBee によるセンサネットワークを用いて，既存建造物ならびに既存家電にいったんの変更を行わずに，簡単に建物内の住環境情報ならびに家電などの電気機器のエネルギー消費量を可視化できる簡易型表示系 HEMS を提案する．

理論的に最大約 65,000 個の ZigBee エンドデバイスと通信可能な ZigBee 通信の特徴を利用することで家庭内のすべての個別家電に設置しての家庭内の単位時間あたりの消費電力量の詳細内訳表示する技術，または HEMS 導入普及の課題^{(8),(9)} の 1 つである導入コストを解決するため既存家屋および既存家電に対し一変せず簡易型表示系 HEMS を構築できる技術について提案する．さらに今回は簡易型表示系 HEMS のプロトタイプを開発し，実証実験によりエネルギーなどの可視化機能ならびに消費電力量の詳細内訳表示による省エネ効果の有効性について詳細に評価した．

本稿では 2 章では無線センサネットワークを用いた簡易型表示系 HEMS の概要を述べ，3 章では簡易型表示系 HEMS・プロトタイプの実証実験の評価結果について論じ，4 章でまとめを述べていくことにする．

2. 無線センサネットワークを用いた簡易型表示系 HEMS

2.1 簡易型表示系 HEMS の構成

図 1 に本稿が提案する簡易型表示系 HEMS の構成図を示す．

提案の HEMS では 2 種類の ZigBee・エンドデバイスがある．1 つ目は建物内の住環境情報（温度センサ，照度センサ，人感センサを搭載）を取得できるセンサノードである．2 つ目は家電などの電気機器の消費電力特性を取得できる拡張モジュールを追加したセンサノード（以降，スマートメータノードと呼ぶ）である．このスマートメータノード側にあるタップに，エネルギー管理させたい家電などの電源コードを差し込むだけで，家電の消費電力特

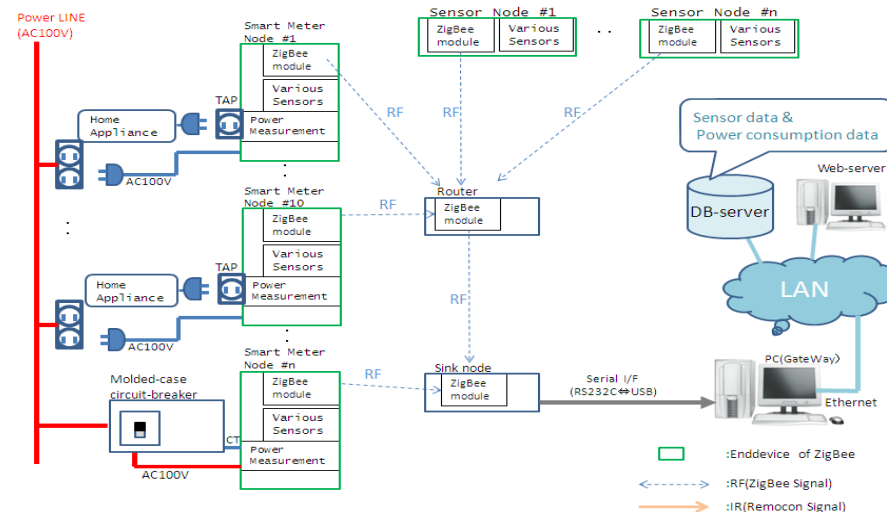


図 1 無線センサネットワークで構築した簡易型表示系 HEMS の構成図

Fig.1 Overview of Easy-HEMS for indication using wireless sensor networks.

性を取得できるものになっている．

シンクノードは各種エンドデバイスからのセンサ情報ならびに消費電力特性データの収集を行い，上位の制御用 PC（ゲートウェイ）を介して，LAN 上の DB（Data Base）サーバにデータを届ける処理を行う．DB サーバに保存されたデータは，LAN 上の Web サーバにある PHP アプリケーションにより，クライアントの Web ブラウザよりトレンドチャート表示できるインタフェースを用意している．

2.2 ハードウェア

ZigBee 通信におけるシンクノード，コーディネータ，ルータ，センサノードはルネサステクノロジ社⁽¹⁰⁾ 製の評価ボードを使用した．このセンサノード基板には，住環境情報を取得するため温度センサ，照度センサ，人感センサがすでに搭載されており，外部コネクタより本基板に搭載されていない他のセンサおよびモジュール基板などを自由に拡張できるものになっている．今回，分電盤および個別家電の消費電力を測定するため，図 2 に示す電気消費特性取得モジュールを独自に開発した．このモジュールをセンサノードに拡張することで各種電気消費特性（有効電力，無効電力，皮相電力，力率，消費電力，電圧など）も取得できる．また，この電気消費特性取得モジュールは，高精度な電力測定が可能なデジタルパ

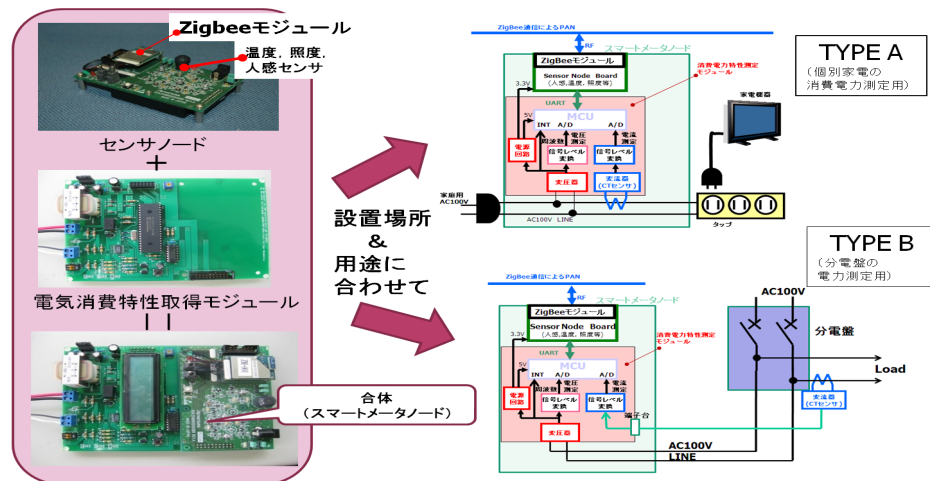


図2 スマートメータノードの種類および構成図
Fig.2 Overview and kind of smart meter node.

ワームータ（横河電機製 WT230）で高力率から低力率の様々な負荷を用いて、有効電力の測定精度が約 $\pm 2\%$ 以内に入るよう校正を行っている。

この電気消費特性取得モジュールを拡張したセンサノードが本稿で述べたスマートメータノードである。このスマートメータノードの種類は、図2に示すよう設置用途に応じて、個別家電測定型と分電盤測定型の2つに分類している。

2.3 ソフトウェア

2.3.1 スマートメータノード

スマートメータノードの MCU (Micro Control Unit) 開発においては、センサノード基板側と電気消費特性取得モジュールに分けられる。

センサノード基板には、ルネサステクノロジ社製の ZigBee モジュールが搭載されているが、この中に同社製 M16C の MCU と FreeScale 社製の RF モジュールが内蔵されている。この M16C の主な処理は同基板に搭載された各種センサ（温度、照度、人感）情報の取得および、UART 通信により電気消費特性取得モジュールからセンサノードに届けられた消費電力特性データを取得し、これらのデータをまとめて、ZigBee 通信により 3 秒周期でシンクノードへデータを届ける処理を行っている。このアプリケーションの開発には、



図3 表示インタフェースの Web ブラウザ画面
Fig.3 Screen of Web browser in display interface.

ルネサステクノロジ社製のリアルタイム OS である MR30 (μ ITRON4.0 仕様準拠) を使用した。一方、電気消費特性取得モジュールの MCU にはマイクロチップテクノロジー社製の型式 PIC16F877 を使い、モジュール基板に搭載されている計器用変圧器 (VT: Voltage Transformer) ならびに計器用変流器 (CT: Current Transformer) により電圧・電流の瞬時値を同時に測定し、演算を行うことで有効電力、無効電力、皮相電力、消費電力、力率などを求め、これらの結果をセンサノードへ届ける処理を行っている。このときの有効電力の求め方は、4 周期分の測定電圧の瞬時値と測定電流の瞬時値の積を求め、平均電力を算出することで行っている。

2.3.2 表示インタフェース

シンクノードで収集した住環境情報（温度、照度、人感）および消費電力特性データは、制御用 PC の Gateway を介して LAN 上にある DB サーバへ保存される。この DB サーバはフリーソフト PostgreSQL を使い構築している。この DB サーバに保存された各種住環境データは、PHP アプリケーションの開発によりクライアント PC にある Web ブラウザから遠隔で任意のセンサデータをトレンドチャート表示させることができる。この画面を図3に示す。図3の左端に表示対象のセンサノードの ID 番号、表示するデータ数の指定

などの入力用テキストボックスがあり、その下に複数の選択可能なチェックボックスによるセンサ項目がある。上から照度、人感、温度、湿度、電池残量、消費電力、測定電圧、力率の順に並び、表示させたいセンサデータ項目にチェックを入れることで、該当するセンサのトレンドチャートを複数表示できる。このトレンド表示は JAVASCRIPT と FLASH でトレンド表示できる amChart¹¹⁾ を使用することで、DB サーバに保存されたセンサ情報および消費電力を簡単にチャート表示出力できる。この PHP アプリケーションを LAN 上の Web サーバに置き、Web ブラウザから URL でこのサーバへアクセスすることで、図 3 のような表示インタフェース画面が表示できる。

3. 簡易型表示系 HEMS プロトタイプのパフォーマンス評価

本章では、簡易型表示系 HEMS のプロトタイプの実証実験での性能評価について、記述する。

3.1 実験環境

今回の評価実験は、図 4 に示すように静岡大学情報棟 1 号館 4 階の J1405 教室、J1407 教室、J1401 教室にある家電および分電盤にスマートメータノードを合計 8 台設置し、そのほかにルータ 7 台 (J1407 教室に 2 台、4 階の廊下に 1 台、J1403 教室に 1 台、J1401 教室に 3 台)、コーディネータ、シンクノード、制御用 PC (ゲートウェイ) を各 1 台ずつ配置し、通信は ZigBee ネットワークで表示系 HEMS を構築することで、本稿が提案する表示系 HEMS の可視化機能の評価を行った。

図 5 に構築した簡易型 HEMS のシステムの概要図を示す。中国計器工業社製の省エネナビ用電力センサ (型式 WHM3-SP01) を J1405 教室と J1407 教室にある分電盤に取り付けることで、スマートメータノードとの消費電力測定の比較評価を行った (図 6)。また、分電盤および個別家電の消費電力測定結果から各時間帯の消費電力量の詳細内訳表示を行い、かつ各時間帯における家電の使用量ならびに各種センサからの住環境情報を併用することで、生活習慣における無駄なエネルギーがどの程度可視化できるかを実証実験で確認した。この実証実験は 2010 年 1/9 から開始し、5/31 現在も実証実験は継続中である。また、今回はプロトタイプの大消費電力の評価ならびに電子レンジの消費電力測定におけるスマートメータノードの設置場所の検討を行った。図 4 および図 5 にはないが、J1401 教室に設置している電子レンジを使用した。

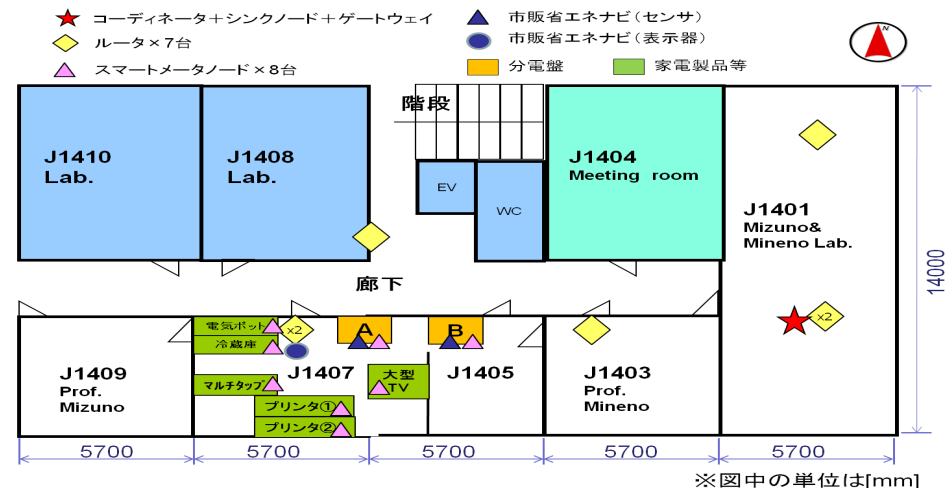


図 4 実証実験：スマートメータの配置図 (静岡大学情報棟 1 号館 4 階の見取り図)

Fig. 4 Layout drawing of smart meter node (Department of Computer Science, Shizuoka University, No.1 Building 4F).

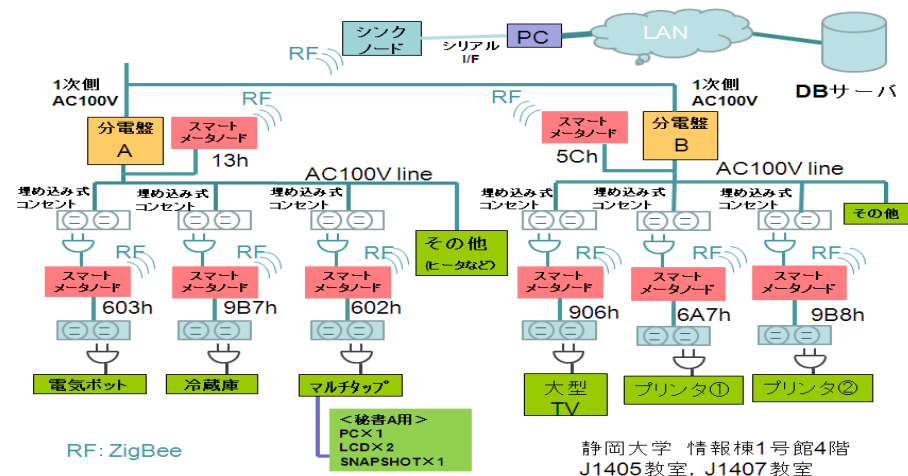


図 5 実証実験：HEMS プロトタイプシステムの構成図

Fig. 5 System of Easy-HEMS prototype.

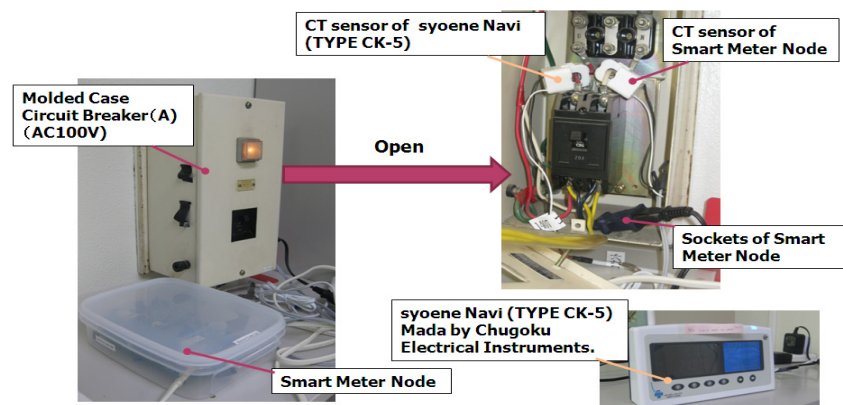


図 6 実証実験：分電盤 A に設置したスマートメータと比較評価に使用した省エネナビ (CK-5/中国計器工業製)
Fig. 6 Smart meter node and syoene Navi (CK-5) that it set up in circuit breaker A.

3.2 実験結果

3.2.1 市販の表示系 HEMS「省エネナビ」との比較評価

今回、HEMS 用に開発したスマートメータノードが市販の表示系 HEMS・省エネナビと同等の測定結果が得られるかどうか比較評価した。今回は中国計器工業社製の省エネナビ製品 (CK-5) と比較した。図 7 に 2010 年 3 月 23 日の 0 時から 24 時までの J1407 教室にある分電盤 A の消費電力量の結果を示す。図 7 (a) はスマートメータノードからそのまま取り出した消費電力の結果との比較である。これをみると、省エネナビを基準と比較すると全体的に平均 17 Wh 増のオフセットが生じているが、消費電力の時間遷移などはほぼ同じ結果が得られている。このオフセット分を差し引いて処理したものを図 7 (b) に示す。この結果では消費電力量 400 W 未満では省エネナビの測定値とほぼ一致した結果になっているが、消費電力 400 W を超えているところでは $-33.6 \text{ Wh} \sim +24 \text{ Wh}$ の差があった。次にこの日の全体の消費電力量を算出してみると、省エネナビの測定では $5,876 \text{ Wh}$ であるのに対し、スマートメータノードでは $5,953 \text{ Wh}$ であった。省エネナビを基準とした場合の誤差率は 1%以内であるので、オフセット処理を入れることで省エネナビと同等の測定が行えていることを示唆している。

3.2.2 消費電力量の詳細内訳機能の評価

次に消費電力の詳細内訳機能の評価について述べる。図 8 (a) に分電盤 A ならびに分

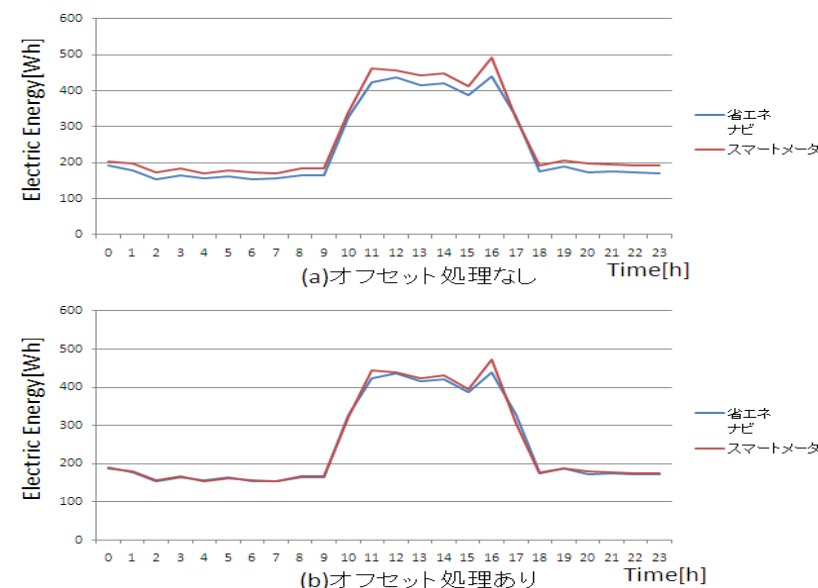


図 7 市販の省エネナビ (中国計器工業製) とスマートメータノードの分電盤 A の測定比較 (2010 年 3 月 23 日データ)

Fig. 7 Electric energy data of circuit breaker A (Day 2010/03/24).

盤 B の各時間での単位時間あたりの消費電力量を積上げ縦棒グラフで表示したものを示す。この図 8 (a) より J1407 教室側の分電盤 A の消費電力量が全体的に J1403 教室側の分電盤 B よりも高くなっているのが分かる。このぐらいのグラフ表示・解析であれば市販の省エネナビでも標準装備されている機能であるが、このグラフ表示だけではどの電気機器が多くエネルギーを消費しているのか一目で判断することはできない。一方の本提案の表示系 HEMS では、分電盤と同電力系統につながる個別家電の消費電力測定を行える機能を持つので、図 8 (b) のように分電盤 A および B の下位につながる個別家電の消費電力量測定結果を積上げ縦棒グラフで表示することで、単位時間あたりの消費電力量を詳細内訳表示することができる。これにより、どの時間帯にどの家電を使用しているか、また無駄な電気使用は何かを利用者側の方で容易に分析できるものと考えられる。図 8 (b) の結果では 10:00 ~ 18:00 の時間帯で消費電力が 300 Wh を超え、全体的に消費電力が高くなっていることが分かる。この時間帯に消費電力が高い機器は、マルチタップ、冷蔵庫、その他 (分電盤 A)、そ

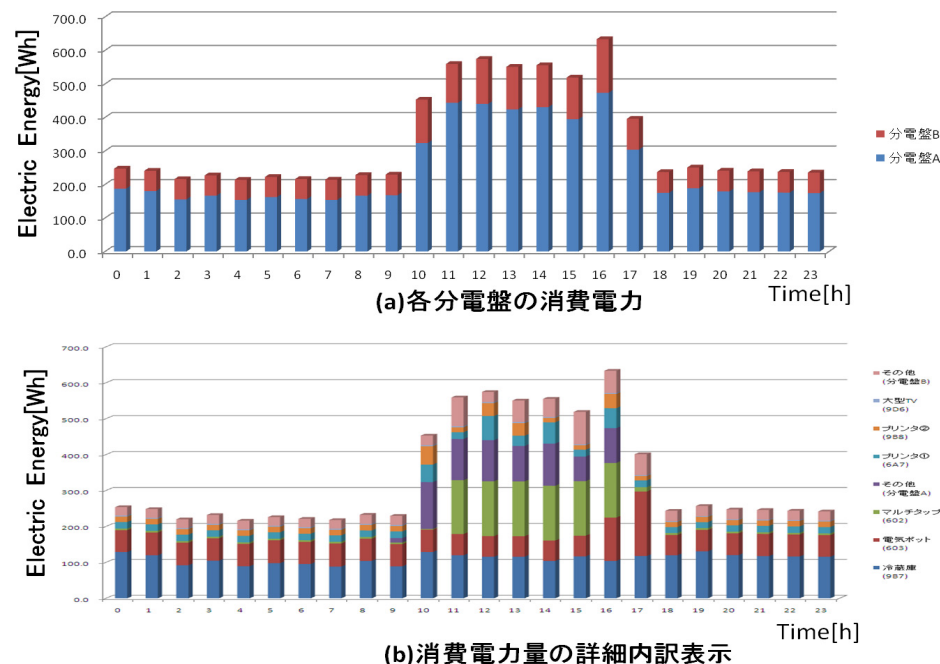


図 8 分電盤 A/B の各時間帯での消費電力量のグラフ (2010/3/23 データ)

Fig. 8 Electric energy data of circuit breaker A/B (Day 2010/03/23).

の他 (分電盤 B), 電気ポットの順に高くなっていることが分かる。一番消費電力の高いマルチタップには, 当研究室にいる 2 人の秘書のうち 1 人の秘書が使用しているパソコン (1 台) と液晶ディスプレイ (2 台) が接続されている。このためマルチタップの消費電力が高い時間帯はこの秘書の出勤時間と連動していると考えられる。その他 (分電盤 A) の機器は, 2 人の秘書のうちどちらかが出勤中のときに使用しているデスク用小型ヒータであることが秘書の証言で分かっている。その他 (分電盤 B) には, Li イオン電池のバッテリーチャージャー 4 台分やノートパソコンを使用することで生じている消費電力であることが実験後の調査で判明している。

0:00 ~ 9:59 または 18:00 ~ 23:59 の時間帯では人が直接家電を使用していないのに消費されている消費電力量と推測される。図 8(a) のグラフをみるとこの時間帯では分電盤 B よりも分電盤 A の消費電力量が最も多く, さらに図 8(b) のグラフでみると分電盤 A と同電力

系統につながっている冷蔵庫 (約 100 Wh 前後), 保温状態の電気ポット (約 62 W) の消費電力が最も高いことが分かる。この結果から省エネ対策をするとしたら, 冷蔵庫を同容量のもので消費電力半分の省エネタイプのものに買い替えるか, 電気ポットの保温状態の排除である。前者は金銭的に余裕がないと対応できないが, 後者の電気ポットの保温状態の排除は, 使用していない時間帯, つまり, 0:00 ~ 9:59 または 18:00 ~ 23:59 の時間帯だけコンセントから電気ポットの電源コードを外すといった省エネ行動をとることで, お金をかけずに 1 カ月あたりの消費電力量約 29.5 kWh 分を削除できる。これを料金単価 22 円/kWh (全国電力会社の平均単価) で電気料金を計算すると, 1 カ月あたり 667 円, さらに 1 年間では約 8,000 円も削減できることがシミュレーションの計算で分かった。

実際にこのデータを測定した次の日 (3/24) の 17:00 以降から電気ポットの電源コードを抜くことで, 図 9 に示すよう電気ポットの保温状態分の消費電力 (1 カ月あたり約 29.5 kWh 分) を削減することができた。これにより消費電力量の詳細内訳表示を行うことで, これまでに気づくことがなかった電気エネルギーの無駄使いや具体的な省エネ対策が発見できたといえる。さらに省エネを図るとしたら冷蔵庫を省エネ家電などに買い替えて消費電力を半分にできれば, これだけで 1 カ月あたり約 36 kW の削減でき, 電気料金に換算すると 1 カ月あたり 792 円になる。これと電気ポットの削減分を含めると 1 カ月あたり 1,459 円の削減となり, 1 年では約 17,500 円の電気料金の削減につながることが推測できる。

3.2.3 各種家電の消費電力波形観測による人の行動分析評価

図 10 に 2010/3/24 の分電盤 A の消費電力ならびにその分電盤と同じ電力系統に接続されている個別家電の消費電力波形を示す。分電盤 A 側の消費電力は, 冷蔵庫, 電気ポット, マルチタップなどの消費電力波形を合成したもので表せる。また, 各種家電ごとに消費電力波形が異なり固有の波形を持っていることが分かる。電気ポットの波形では, 保温, 水の沸騰動作, AC コンセントから電源コードを抜いた OFF 状態などの各動作が時系列に確認できる。保温中の波形をよくみるとヒータは約 2 分間の周期で ON と OFF 動作を繰り返しているが, これは一定の温度になるよう保温制御を行っているためである。保温中の消費電力は約 62 W 前後になるが, 水を沸騰させたときの消費電力は約 880 W 前後にもなり, 他の機器よりも消費電力が高い。この消費電力波形の立ち上がり時間は 14:30 であるが, この時間は電気ポットで水の沸騰動作を開始した時間に相当する。また, 立ち下り時間は 14:52 で沸騰動作の終了時間と考えられる。この波形の立ち上がりと立ち下りの時間幅を求めると約 22 分になっており, この時間が水を沸騰させるのに要した時間といえる。次にマルチタップの消費電力波形をみると時間 10:28 から消費電力が約 160 W ほどに急激に増加して

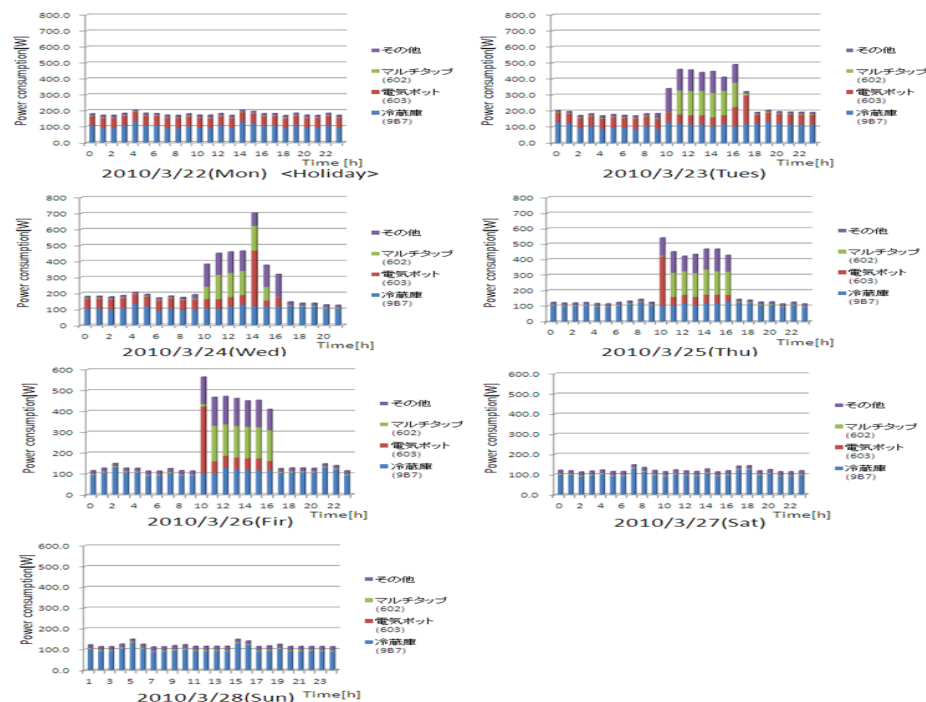


図9 分電盤 A の 1 週間分の電気使用量トレンドチャート (2010 年 3 月 22 日 (月)~3 月 28 日 (日))

Fig. 9 Electric energy data of one week of circuit breaker A (Day 2010/3/22~28).

いるおり、15:31 に消費電力が約 5 W ほどに立ち下がっている。この消費電力の波形の立ち上りと立ち下りの時間幅は、この日の秘書 A の出勤時間帯 10:30~15:30 とほぼ連動しているものと考えられる。このマルチタップには秘書 A のパソコン 1 台と液晶ディスプレイ 2 台が接続されているので、これらの消費電力波形を観測することにより秘書 A の出勤状態を把握することができることを示唆している。

次に冷蔵庫の消費電力をみると人が不在の時間 0:00~10:00 では 35 分間 ON したあと 10 分間 OFF の動作を繰り返す周期のものと、約 120 分間 ON したあと 10 分間 OFF の動作の周期のものがあ、秘書 A の出勤時間 10:30 あたりからこの ON と OFF の動作を繰り返す周期が長くなっていることが確認できるが、冷蔵庫の消費電力波形ではマルチタップ (パソコン、液晶ディスプレイ)、電気ポットのように一目で人の行動などを分析すること

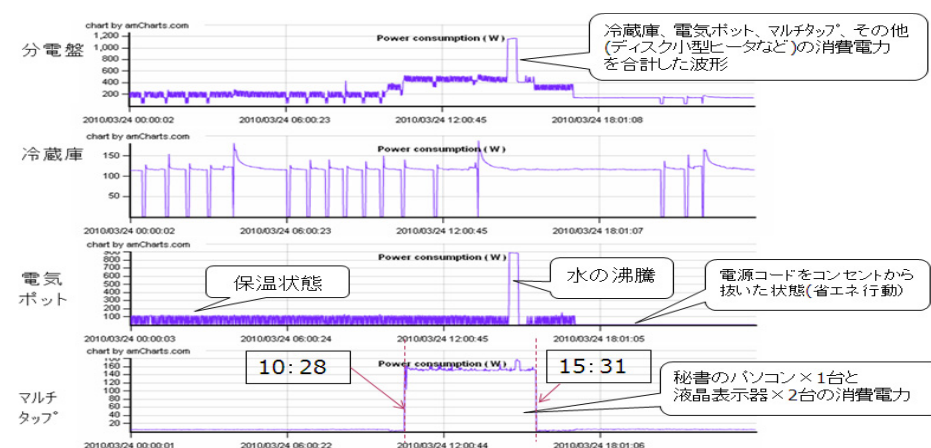


図 10 分電盤 A ならびにその分電盤と同電力系統につながる個別家電の消費電力波形 (2010 年 3 月 24 日の 24 時間分のデータ)

Fig. 10 Electric energy wave of individual consumer electronic connected with the same electricity system as the circuit breaker A (Day 2010/3/24).

は困難である。したがって、電気ポット、マルチタップ (パソコン、液晶ディスプレイ) などの電気機器の消費電力波形観測では、各時間帯における電気の使用量および使用状況などから人の行動が詳細にモニタリングできるので、家庭の生活習慣を把握できる。しかし、このような機能を遠隔でモニタリングできる機能が普及した場合プライバシー侵害ならびに新たなセキュリティの問題にもつながる可能性があるものと考えられる。

3.2.4 表示系 HEMS・プロトタイプの消費電力の評価

ここでは、実証実験で使用した表示系 HEMS・プロトタイプの消費電力について記述する。今回開発したスマートメータノードを高精度な電力測定が可能なデジタルパワーメータ (横河電機製 WT230) で消費電力を測定したところ、1 台あたりの消費電力は約 0.6 W であった。この実証実験で使用したスマートメータノードの台数は 8 台であるため、1 カ月あたりの消費電力は約 3.46 kWh になる。これにシンクノード × 1 台、コーディネータ × 1 台、ルータ × 7 台の消費電力を合計すると約 4.2 kWh 以上になった。この値は 40 インチ液晶テレビや CD ラジカセなど 1 台分の家電の待機電力¹²⁾ よりも大きな値であることが分かった。これでは、本提案の簡易型表示系 HEMS を導入しても、使用状況にもよるが省エネ効果が薄れてしまうことが推測できる。今後の研究においては各種センサとの組合せによ

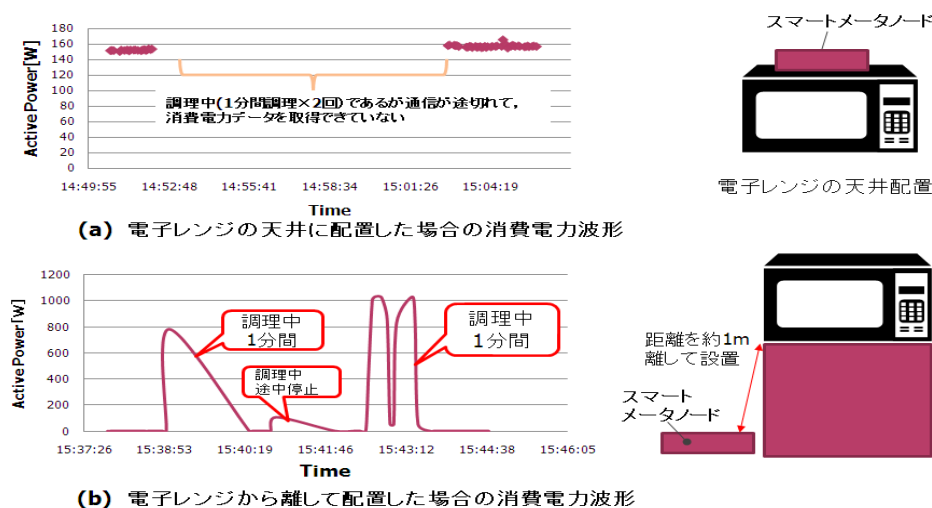


図 11 スマートメータノードの設置場所による電子レンジの消費電力測定の影響

Fig. 11 Influence of electric energy measurement of microwave oven by installation location of smart meter node.

りスマートメータノードのスリープモード活用など、低消費電力化の観点からシステムをチューニングしたり¹³⁾、スリープ中での不要な回路への電源供給を OFF にする機能を追加したりすることで¹⁴⁾、スマートメータノード 1 台あたり 0.1 W 以下の低消費電力型ノードの開発を目指す予定である。

3.2.5 スマートメータノードの電子レンジの設置の検討

今回開発したスマートメータノードを用いて、電子レンジの消費電力測定を行うときの設置場所の影響について評価した。電子レンジは調理時に ZigBee 通信と同周波数のマイクロ波帯の電波を使用するため、この電波の漏洩による電波干渉による通信到達率低下が問題視されていることから、スマートメータノードの最適な設置場所を実験より検証してみた。図 11 (a) に電子レンジの天井にスマートメータノードを置いたときの消費電力測定波形を示す。電子レンジの調理を 1 分間の設定で調理を続けて開始したところ、調理中は ZigBee 通信が途切れてしまい、データを収集できなかったが、調理終了後は通信が再開され、データ収集ができるようになった。次に佐藤商事製の高周波電磁波測定器 EMF-839¹⁵⁾を用いて、調理動作中の電子レンジの外側の天井・右側面・左側面の電界強度を測定したところ、

2.54 GHz 帯で最高 9.67 V/m の電界強度があった。一方、スマートメータノードの ZigBee モジュールの周辺を測定したところあまりに電界強度が低くすぎたためか測定不能であった。このことから、電子レンジの電波の漏洩により電波干渉が生じて通信が途切れたものと考えられる。このことをふまえ図 11 (b) のようにスマートメータノードを約 1 m 離しておいた場合は通信が途切れることもなく正常にデータ収集できることが分かった。したがって、電子レンジ本体から離れた場所にスマートメータノードを設置することが好ましいことが分かった。

4. ま と め

本稿では省電型無線通信 ZigBee によるセンサネットワークを用いることで、既存建物ならびに既存家電にいっさいの改変を行わずに、簡単に建物内の住環境情報ならびに家電などの電気機器のエネルギー消費量を可視化できる簡易型表示系 HEMS について提案した。実証実験を行った結果、分電盤ならびに分電盤と同電源系統につながる個別家電の消費電力測定により各時間帯における単位時間あたりの消費電力量の詳細内訳表示を行うことで、これまでに気づくことがなかった電気エネルギーの無駄使いの発見や具体的な省エネ対策を見つけ出せることが分かった。実際に省エネ対策を講じて、1 カ月あたりの消費電力量は約 29.5 kWh 分削減（電気料金 667 円/月の削減）することができた。また、電気の使用時間および使用量の情報から生活習慣も把握できることを示したが、このような機能を遠隔でモニタリングできる機能が普及した場合、将来、プライバシー侵害の問題にもつながるものと考えられる。

ZigBee と同周波数を用いている電子レンジの消費電力測定においては、電子レンジ本体から約 1 m 程度離してスマートメータノードを設置することが好ましいことが分かった。また、今回実証実験で使用したスマートメータノードは、1 台あたりの消費電力が約 0.6 W 程度あった。このことから複数スマートメータノードを用いて表示系 HEMS を構築したときは省エネ効果が薄れてしまうことが推測できる。今後は実用化に向けスマートメータノードなどの ZigBee・エンドデバイスの低消費電力化の研究開発を進める予定である。

謝辞 本研究は、浜松地域知的クラスター創成事業（第 II 期）「浜松地域オプトロニクスクラスター構想」の助成を得て、「自律分散協調ユビキタスセンサネットワーク」の一環として実施したものであることを記し、ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 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，新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2006)。
- 2) 松下電器産業株式会社山根豊幸：ホームネットワーク利用による省エネ実証実験，入手先 <http://www.city.sendai.jp/kankyoku/kanri/icgps-e/pdf/6-4.pdf>。
- 3) 中国計器工業株式会社：省エネナビ 型式 CK-5，入手先 http://www.chukeiko.co.jp/01product/energy/ene_navi.html。
- 4) Kawaguchi, N.: Small-sized Power Sensor and Wireless Display for Fine-grained Measurement and Presentation, *R'09 Twin World Congress Poster Session* (2009)。
- 5) 上田泰嵩，小川延宏，河口信夫，片山正明：省エネ意識向上を目指した細粒度電力センシング・提示システムの構築，電気学会通信研究会，CMN-10-007 (2010)。
- 6) 岩田真琴，甲斐正義，島津秀雄：省電力プラットフォーム「グリーンタップ」の提案①，情報処理学会第 71 回全国大会，6D-3 (2009)。
- 7) (社)人間生活工学研究センター：平成 18 年度-平成 19 年度エネルギー使用合理化技術戦略の開発/エネルギー使用合理化技術戦略の開発 (FS 事業) 人の好みや行動パターンに応じた HEMS/BEMS 技術の研究開発成果報告書，新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2007)。
- 8) (財)電力中央研究所：意識調査に基づく HEMS の普及可能性評価，研究報告 Y05022，電力中央研究所 (2006)。
- 9) (独)国立環境研究所：HEMS (ホームエネルギーマネジメントシステム) 技術の現状と課題，入手先 <http://ecotech.nies.go.jp/library/report/detail.php?id=14>。
- 10) ルネサステクノロジー：ZigBee/IEEE802.15.4MAC 近距離無線通信ネットワーク，入手先 http://japan.renesas.com/applications/key_technologies/connectivity/zigbee_ieee/zigbee_ieee.jsp。
- 11) amcharts: flash charts stock charting software，入手先 <http://www.amcharts.com/>。
- 12) 省エネルギーセンター：平成 18 年度待機消費電力調査報告書，入手先 <http://www.eccj.or.jp/standby/06/index.html>。
- 13) 中川泰仁，太田賢司：DC エコハウスにおけるエネルギーマネジメント，情報処理学会誌，Vol.51, No.8, pp.970-971 (2010)。
- 14) Ye, A.W., Heidemann, J. and Estrin, D.: An energy-efficient Mac protocol for wireless sensor networks, *Proc. INFCOM*, pp.1567-1576 (2002)。
- 15) 佐藤商事：データロガー高周波電磁波測定器 EMF-839，入手先 <http://www.ureruzo.com/denji-EMF829.htm>。

(平成 22 年 5 月 31 日受付)

(平成 22 年 11 月 5 日採録)



安部 恵一 (学生会員)

1970 年生，1995 年日本工業大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。エム・シー・エレクトロニクス (三菱商事系列) (株) 第一事業部電気技術部係長，HOYA コンテニウム (株) システム製品事業部システム技術部を経て，現在，独立法人雇用・能力開発機構東海職業能力開発大学校付属浜松職業能力開発短期大学校電子情報技術科講師。2009 年静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部情報科学専攻博士課程に進学し，情報家電，センサネットワーク応用 (省エネ，農業等) に関する研究に従事。著書として『USB2.0 インターフェース設計術』(電波新聞社)がある。浜松地域テクノポリス推進機構先端精密技術研究会会員。



澤田 尚志 (学生会員)

1987 年生。2010 年静岡大学情報学部情報科学科卒業。同年静岡大学大学院情報学研究科情報学専攻進学。屋内向け有線/無線相互補完通信プロトコルの開発に関する研究に従事。



増井 崇裕 (学生会員)

1987 年生。2009 年静岡大学情報学部情報科学科卒業。同年静岡大学大学院情報学研究科情報学専攻進学。2010 年情報処理学会 DPSWS2010 学生優秀論文賞受賞。施設園芸における高密度無線センサネットワークの構築に関する研究に従事。



峰野 博史（正会員）

1974 年生．1999 年静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了．同年日本電信電話（株）入社．NTT サービスインテグレーション基盤研究所を経て，2002 年 10 月より静岡大学情報学部助手．2006 年九州大学大学院システム情報科学府博士（工学）．2010 年 6 月より，静岡大学情報学部講師．モバイルコンピューティング，センサネットワーク応用に関する研究に従事．電子情報通信学会，IEEE，ACM 各会員．



水野 忠則（フェロー）

1945 年生．1969 年名古屋工業大学経営工学科卒業．同年三菱電機（株）入社．1993 年静岡大学工学部情報知識工学科教授．1996 年情報学部情報科学科教授．2006 年より創造科学技術大学院院長．工学博士．情報ネットワーク，モバイルコンピューティング，ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事．著訳書として『コンピュータネットワーク』（日経 BP），『モダンオペレーティングシステム』（ピアソン・エデュケーション）等がある．電子情報通信学会，IEEE，ACM，Informatics Society 各会員．情報処理学会副会長．