

コンシューマ・デバイス論文

ポリシーベース電力制御のための スマートタップの設計と実装

森本 尚之^{1,a)} 藤田 有¹ 吉田 雅昭¹ 吉水 宏幸¹ 滝山田 昌文¹ 明比 輝一¹ 田中 真実¹

受付日 2013年4月25日, 採録日 2013年9月13日

概要: ユーザにとって低負担かつ効果的な電力マネジメントのために, ポリシーベース電力制御のためのスマートタップの設計と実装を行った. 開発にあたっては正確な電力計測性能, 様々な制御ポリシーを実行可能な計算能力, 実生活環境での継続的な使用を考慮した安全性などを重視した. ポリシーベース電力制御の実用例として, ソフトウェアベースでの回路ブレーカ機能と, 複数機器の突入電流の重なりを回避する機能とを実装し評価を行った. また実生活環境においてスマートタップを継続的に設置して, 待機電力削減による省エネ機能や環境センサ情報を用いた家電の自動制御機能を実装した.

キーワード: 電力マネジメントシステム, スマートタップ, ポリシーベース電力制御

The Design and Implementation of a Smart Outlet for Policy-based Power Management

NAOYUKI MORIMOTO^{1,a)} YUU FUJITA¹ MASAOKI YOSHIDA¹ HIROYUKI YOSHIMIZU¹
MASAFUMI TAKIYAMADA¹ TERUKAZU AKEHI¹ MASAMI TANAKA¹

Received: April 25, 2013, Accepted: September 13, 2013

Abstract: The design and implementation of a smart outlet for policy-based power management is described, which aims to reduce user's handwork required for power-saving activities and to realize efficient power control. The smart outlet has been designed to have an accurate power-sensing function, to have enough computational resources to execute various policy-based power management, and to be used safely in a real-life situation. As applications of policy-based power management, the authors have implemented and evaluated a software-based circuit breaker, and a function of reducing overlaps of inrush current caused by multiple appliances. The authors also have deployed the smart outlet in a real-life situation, and have implemented a function of reducing stand-by power and have realized automated control of appliances utilizing environmental sensor information.

Keywords: energy management system, smart outlet, policy-based power management

1. はじめに

地球温暖化対策や石油資源の枯渇問題といった観点から, CO₂ 排出量の削減, エネルギー消費の効率化, 自然エネルギーの有効活用などが求められている. わが国では, 生活の利便性・快適性を追求するライフスタイルの変化や世帯数の増加などの社会構造変化の影響を受け, 家庭での

エネルギー消費量が 1973 年頃と比較し 2 倍以上に増加している [9]. また 2011 年の東日本大震災から波及して全国的に電力需給が逼迫したことにより, 一般家庭における高度な電力マネジメントの重要性があらためて浮き彫りになった. 近年, ユーザの電力消費データを収集し可視化する「電力消費の見える化」によってユーザの電力マネジメント活動を支援するシステムが実用化されており, 一定の効果が報告されている [20]. 一方で, 「見える化」により行動指針が示されたとしても, 実際に電力マネジメントを行うためには手作業での機器制御が必要であるため, ユーザ

¹ 株式会社エネゲート
Enegate Co., Ltd., Settsu, Osaka 566-8686, Japan
^{a)} morimoto.naoyuki@enegate.co.jp

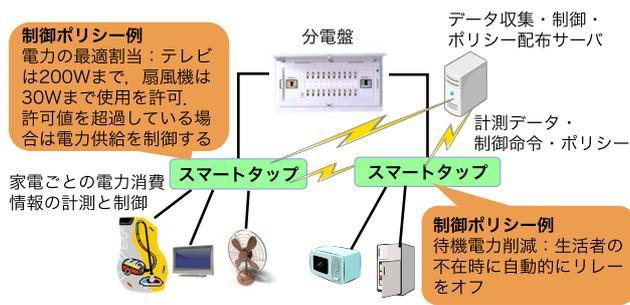


図 1 スマートタップを用いたポリシーベース電力制御

Fig. 1 Policy-based power management using smart outlets.

にとっては継続的な負担となる。

ユーザにとって低負担かつ効果的な電力マネジメントのために、ユーザの電力消費データを詳細に収集し、機器どうしが情報通信により自律的・協調的に動作し、ユーザ各々の生活や電力消費パターンに適したポリシーに基づいて電力をプロアクティブに自動制御するような家庭内電力ネットワークが提案されている。たとえば「エネルギーの情報化」[12]の考え方においては、デマンド・レスポンスやピークカットのために消費可能な電力の総量が制限されている状況下で、たとえば「テレビは200Wまで使用可、扇風機は30Wまで使用可」といったような各家電への電力割当てを、システムがユーザの Quality-of-Life (QoL) への影響を勘案しつつ最適化するという「供給電力の最適割当て」が提唱されている。そして、総消費電力が制限値を超過している場合には、ユーザに適したポリシーに基づき、家電への電力供給を自動的に制御することで総消費電力を制限値以下に保つ。ここで、ユーザの QoL の減少を抑えるために、たとえばユーザの不在時には特定の家電への電力割当て量を削減するなど、ユーザの生活パターンや行動情報、人感センサや環境センサ情報などといった電力以外の情報も活用する。これらの実現のためには、家電ごとに電力消費情報を詳細に計測し、他機器と情報通信を行うとともに、家電ごとに定められた割当て値に基づく制御や、ユーザの行動や環境情報に基づく制御を行うための機器が必要となる。

本稿では、エネルギーの情報化の考え方に基づく研究プロジェクト「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」[17]において、「供給電力の最適割当て」の実現を念頭に、主に上記のようなポリシーベース電力制御を行うための実証実験用機器として開発したスマートタップの設計と実装、ならびにその評価について述べる。本研究開発で想定する、スマートタップを用いたポリシーベース電力制御の概要を図 1 に示す。設計と実装においては、計測の正確性と、様々なポリシーベース電力制御機能を実装可能な計算資源、ハード・ソフト両面での拡張性、そして実生活環境での継続的な利用のための実用性と安全性を重視した。また、実証実験の一環として電流波形からの家電認識機能や、液晶

を用いた画面表示などといった付加的な機能を将来的に実装可能なスペックを持つものとした。他の機器（ユーザの情報端末や外部サーバ、他のスマートタップ）との通信や連携を容易とするため、汎用的な通信メディアやプロトコルを採用した。スマートタップによるポリシーベース電力制御の実現例として、ソフトウェアベースでの回路ブレーカ機能と、停電からの復電時などに発生しうる複数機器の突入電流の重なりを回避する機能を実装し評価した。また、開発したスマートタップを実生活環境で継続的に使用し、電力消費データを収集しつつ、人感センサ情報を用いた待機電力の削減機能や、環境センサ情報を用いた家電の自動制御機能を実装し、省エネの自動化と生活の利便性向上を実現した。

本稿の構成は次のとおりである。2章で関連研究を述べる。次いで3章で、スマートタップの設計開発についてハードウェアとソフトウェアの両面から述べる。4章では計測機能の評価を示す。5章では、ポリシーベース電力制御機能の応用例として、ソフトベースの回路ブレーカ機能と、突入電流の重なり回避機能の実装と評価を述べる。また、本スマートタップの実生活環境における継続的運用と各種センサ情報を用いた電力制御について述べる。6章にまとめと今後の課題を示す。

2. 関連研究

電力制御を行わないタイプのスマートタップネットワークにより、いわゆる「電力消費の見える化」により電力の無駄使いを見出す手法の研究はさかに行われている [1], [3], [11]。電力制御の自動化に関する研究としては、たとえば Han らの待機電力削減システム [4] がある。Song らのシステム [18] は、ZigBee 通信を行うスマートタップ（ただし電力計測機能は持たない）と赤外線ノードの組合せにより、人の在・不在に応じた機器の自動オン・オフ制御を行う。電力制御ポリシーの効率的な生成方法については Yoshihisa らの提案がある [22]。また、ポリシーベースの電力制御システムとしては、システムの中央に位置するコントローラが制御内容を決定しスマートタップはその決定に従うという、いわゆる集中型のもも考えられる。集中型のシステムとしてはたとえば Kato らのオンデマンド型電力ネットワーク [7] や、Mrazovac らのシステム [15] があげられる。特に前者は、優先度に基づく家電の制御により、生活者の利便性を可能な限り損なわずに家庭全体の消費電力量を一定値以下に収めるシステムを実装している。また、NEC システムテクノロジーのグリーンタップ [16] は、ソケットごとの電力計測とタップ単体でのポリシーベースのリレー制御が可能であり、集中型と分散型の両方のシステム構成ならびにタップ単体での制御に対応している。また、環境センサ情報に基づく制御も可能である。

スマートタップに類する機能を持つ市販製品としては、

Belkin 社製の WeMo [2] があげられる。Wi-Fi を用いた外部からのオン・オフ制御と、タイマ機能によるオン・オフ制御が可能である。一方で電力計測機能は持たない。また、ユビキタス社製の iRemotap [23] は、Wi-Fi を用いた外部からのオン・オフ制御に加え、電力計測機能を持つ。計測したデータをクラウド上のサーバに収集し、ユーザに対する「見える化」サービスを提供する。ただしポリシベースの自動制御の機能は持たない。

なお、一般にスマートタップならびにそれに類する機器が持つ機能として、次のような項目があげられている [19]：

- 計測機能：電力関連の様々な量を計測する機能。計測する値は瞬時電流、瞬時電圧、電流実効値、電圧実効値、有効電力など。
- 制御機能：電力を制御する機能。制御の種類としてはオン・オフ、電流制御、電圧制御などが考えられる。
- 通信機能：計測データ収集や制御のための、家庭内のホームサーバや外部のサーバなどへの通信、スマートタップどうしの連携のための通信、さらに接続された家電機器との通信を行う機能。
- その他の機能：インジケータなどのユーザインタフェースやロギング、温度や湿度センサなどの電力以外の情報の獲得機能など。

3. 設計と実装

本スマートタップは、製品としての開発ではなく、電力マネジメントシステムの研究プロジェクト「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」[17]における実証実験用の機器としての開発を行った。また、Yoshihisa らのスマートタップ [21] を開発の参考とした。これは消費電力情報、温度情報や人感センサ情報などを用いたポリシベース電力制御を念頭に設計されており、このスマートタップ実機を用いたポリシベース電力制御のテスト用環境が実装されている [21]。したがって、本研究開発で目的とするポリシベース電力制御を実装ならびに実行可能とするために必要なスペックの1つの基準になると考えられる。電力計測および制御用の市販ボード (ADE5169 搭載) と、Linux ボード Armadillo-220 (CPU ARM920T 200 MHz, メモリ 32 MB) が用いられている。形状は壁挿しタイプである。2個のソケットを持つが、そのうち1個のみに電力計測機能およびリレーによるオン・オフ制御機能が実装されている。通信メディアは Ethernet である。また、拡張のための USB ポートを2つ持つ。

当プロジェクトにおけるスマートタップにはポリシベース電力制御機能に加え、実証実験の一環として、電流波形からの家電認識機能 [6], [8] や、液晶を用いた画面表示や音を用いたユーザへの通知機能などの様々なアプリケーションを搭載する可能性があったため、開発にあたってはコストやサイズよりも高機能性、高性能性や拡張性を重視

表 1 計測の要件定義

Table 1 Requirements definition (measurement).

項目	仕様	備考
定格電圧・電流	100 V, 15 A	
定格周波数	50 Hz/60 Hz	交流用
計測項目	積算電力, 瞬時電力, 電圧, 電流	電流や電圧の過渡的な変化をとらえる
分解能	12 ビット	電力量計と同等の計測性能
サンプリング周波数	20 kHz	電流や電圧の過渡的な変化などをとらえるため、高いレートでのサンプリングを行う
計測誤差	±2%以内	0.5 A~15 A. レンジ切り替えによる全域での計測性能向上

表 2 制御・通信・拡張性の要件定義

Table 2 Requirements definition (power control, communication media and extensibility).

項目	仕様	備考
制御	リレーを内蔵	外部からの制御だけでなく、負荷監視によるリレー開放など、ソフトウェアシーケンスによる監視制御機能を設ける
通信メディア	Wi-Fi	パソコンなどとの通信を考慮し、最も汎用的な通信方式を採用
拡張性	USB	各種センサ類などの拡張のために設ける

した。前述のスマートタップのスペックをふまえ、本開発では詳細な電流・電圧計測性能や、全ソケットにおける個別の計測・制御機能、一般的なタップと同程度のソケット数や無線通信メディアへの対応などによる実用性向上、実証実験において実生活環境で継続的に利用するための安全性などに重点を置いた。

以上をふまえて、我々のスマートタップの計測に関する要件定義を表 1 に、制御・通信・拡張性に関する要件定義を表 2 に示す。一般的な家電の利用を想定し、定格電圧は 100 V、定格電流は 15 A、対応周波数は 50/60 Hz とした。A/D 変換においては、近年の家電はインバータやスイッチング電源が組み込まれており比較的広帯域な電流波形が現れるため、家電ごとの測定には 1~2 kHz よりも高いサンプリング周波数が求められるとの指摘 [19] をふまえ、サンプリング周波数は 20 kHz とした。また分解能は、電力量計で標準的に採用される 12 bit とした。ただし一般に、電流計測において単一の計測レンジで A/D 変換を行うと負荷が小さい領域での誤差が大きくなる傾向があるため、精度向上のための標準的技術である計測レンジの自動切替

表 3 開発したスマートタップのスペック

Table 3 Specifications of the developed smart outlet.

計測項目	瞬時電力, 積算電力 瞬時電流 (実効値), 瞬時電圧 (実効値)
サンプリング 周波数	20 kHz
分解能	12 bit
電力制御機能	リレーのオン・オフ制御
計測誤差	2%以下
ソケット数	4
定格電圧	AC 100 V
定格電流	15 A (全ソケットの合計値)
OS	Debian Linux (アプリケーション基板)
CPU	ARM926 400 MHz (アプリケーション基板) TMS320F28035 60 MHz (計測・制御基板)
メモリ	128 MB RAM, 32 MB FLASH (アプリケーション基板)
拡張性	2つの USB 2.0 ポート (うち1つは Wi-Fi インタフェース用), microSD スロット (内蔵ストレージ拡張用)
通信メディア	Wi-Fi (USB 接続), Ethernet
通信プロトコル	TCP/IP ソケット通信, HTTP/CGI
他機器との 通信機能	家庭内のホームサーバや 外部のサーバなどへの通信, スマートタップどうしの連携のための通信
その他の機能	LED インジケータによる状態表示 (ソケットごとのリレー開閉状態などの表示用), タップ単体での情報ロギング (内蔵 microSD スロットを利用), 人感センサ・環境センサ (USB ポートを利用し外付けで実装)

えを採用し、全域での計測性能向上をはかった。誤差は電力量計と同等の計測性能 ($\pm 2\%$ 以内) を要件とした。制御については、図 1 に示したようなシステム構成を想定し、外部機器 (コントローラなど) からの制御だけでなく、たとえば負荷監視によるリレー開放やソフトウェアシーケンスによる監視制御機能などといったポリシーに基づく制御をスマートタップ単体でも実行できるものとした。なお、現状では他機器からの電力制御が可能な家電 (いわゆる「スマート家電」) が普及しておらず、またスマートタップで電流制限や電圧制限を行ったとしても一般に家電が正常動作するとは限らないことから、制御機能はリレーのオン・オフにとどめるのが現実的と考えた。通信メディアの無線対応にあたっては、他機器との親和性や実証実験での利便性を考慮し最も汎用的と考えられる Wi-Fi を採用した。また、将来的な拡張のための USB ポートを要件とした。この要件定義に基づき実装したスマートタップのスペックを表 3 に、写真を図 2 にそれぞれ示す。以下、ハードウェアとソフトウェアのそれぞれの実装について述べる。



図 2 開発したスマートタップの外観写真

Fig. 2 Outward appearance of the developed smart outlet.

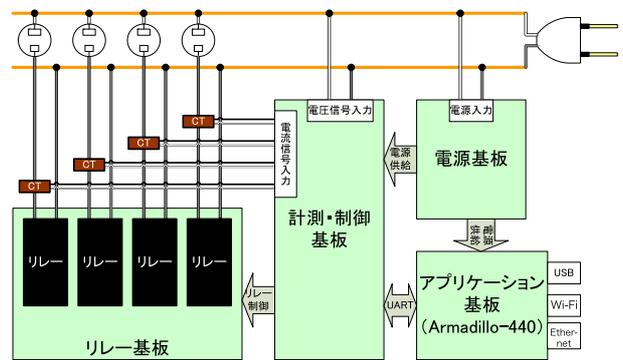


図 3 スマートタップのハード構成図

Fig. 3 Hardware block diagram of the smart outlet.

3.1 ハードウェア

ミリ秒オーダーでの正確なリアルタイム計測機能と、外部機器との通信やポリシーベース電力制御のように高度なアプリケーションの実行能力とを両立させるため、計測と制御を担当する基板と、アプリケーションの実行を担当する基板とを組み合わせ設計と実装を行った。以下、前者を計測・制御基板、後者をアプリケーション基板と呼ぶこととする。アプリケーション基板は Linux OS, USB, Wi-Fi など汎用的なソフトウェアやインタフェース、デバイスが使えるものを採用した。また、一般的なタップに近い使用環境を想定し、テーブルタップ型のデザインを採用した。ハード構成を図 3 に示す。アプリケーション基板、計測・制御基板、リレー基板、電源基板、ならびに CT からなる。以下、それぞれの基板の機能と実装、ならびに安全性の試験と評価について述べる。

3.1.1 アプリケーション基板

計測・制御基板と通信し、計測データの取得やリレーの制御指令を行う。また、外部機器との通信機能やポリシーベースの電力制御機能を担う。前述の Yoshihisa らのスマートタップと比較すると、本スマートタップは、4つのソケットの計測と制御を行うにあたり必要な処理や制御ポリシーが複雑になりうるため、実証実験用機器としてはより

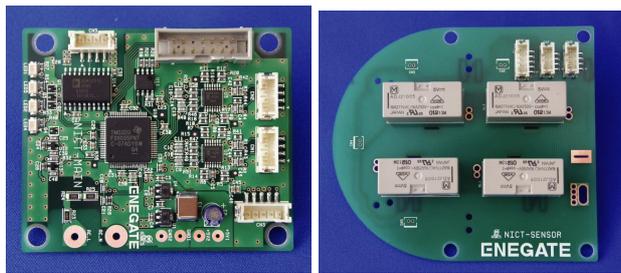


図 4 左：計測・制御基板，右：リレー基板

Fig. 4 Left: measurement/control board, Right: relay board.

高い CPU 性能が望ましいこと，前述のとおり液晶を用いた画面表示などのユーザインタフェースを搭載する可能性があったこと，内部ストレージが拡張可能であればタップ単体での情報ロギングが容易となることなどから，これらの機能を有する基板として，Armadillo-220 の上位互換機である Armadillo-440 (CPU : ARM926 400 MHz, メモリ : 128 MB RAM/32 MB FLASH) を採用した．拡張性として 2 個の USB 2.0 ポートを持つ．そのうち 1 ポートは Wi-Fi インタフェースに利用し，残り 1 ポートは環境センサなどを用いた機能拡張を想定している．

3.1.2 計測・制御基板

電流値と電圧値の計測と，瞬時電力ならびに積算電力値の算出を行う．また，リレー基板に対して開閉制御の信号を送信する．電流値の A/D 変換においては，全域での計測精度の向上のために 2 段階のレンジ (1 A, 15 A) を用いる．瞬時電力の正確な計算のために，2 つの A/D 変換器 (それぞれ電流用と電圧用) を用いて電流と電圧のサンプリングを同時に行う．4 つのソケットの合計 8 個の電流値信号，ならびに各電流値に対する電圧値信号 (8 個) を処理するために必要な 16 個の入力を備える DSP マイコンとして TMS320F28035 60 MHz (TI 社製) を採用した．写真を図 4 の左側に示す．

3.1.3 リレー基板

各ソケットをオン・オフ制御するための機械式リレーを持つ．計測・制御基板からの制御信号によりリレーの開閉を行う．写真を図 4 の右側に示す．

3.1.4 電源基板

AC100 V の入力を DC5 V に変換し，アプリケーション基板と計測・制御基板に電力を供給する．

3.1.5 安全性

電力量計規格 JIS C 1271-1 を参考として，特に絶縁抵抗，商用周波耐電圧の項目について試験し基準を満たしていることを確認した．また，電気用品安全法 (PSE) を参考として，特に空間距離，沿面距離について試験し基準を満たしていることを確認した．筐体は UL94-V0 等級の難燃性を持つ素材を用いている．

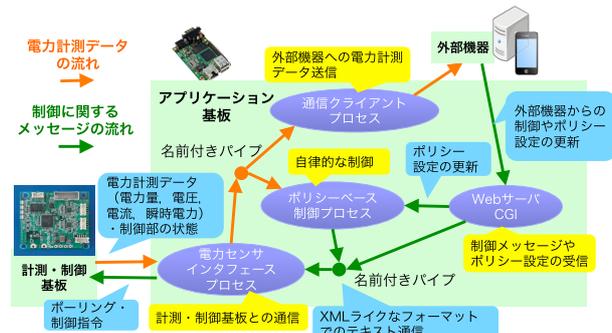


図 5 アプリケーション基板のプロセス間通信

Fig. 5 Interprocess communications on the application board.

3.2 ソフトウェア

ソフトウェア面では，Linux OS 上に様々な制御ポリシーを実装可能とした．データフォーマットは XML ライクなものとし，拡張性と人間に対する可読性を持たせた．他機器との通信プロトコルは汎用的な TCP/IP ソケット通信ならびに HTTP/CGI を用いた．

まず計測・制御基板でのソフト処理について述べる．CT により得た各ソケットごとの電流値と AC100 V の電圧値を，サンプリング周波数 20 kHz, 分解能 12 bit で A/D 変換し，その結果を基に電流実効値，電圧実効値，瞬時電力値ならびに積算電力値を計算する．アプリケーション基板内の電力センサインタフェースプロセス (後述) からのデータ要求に応じて，計測ならびに計算により得たデータ (電流値，電圧値，瞬時電力，積算電力) を 50 ミリ秒間隔で送信する．また，電力センサインタフェースプロセスからのリレー制御メッセージを受信し，リレー基板へ制御信号を出力する．

次いでアプリケーション基板上のソフトウェアについて述べる．OS として組込み向け Debian Linux が動作する．そのうえで，主に電力センサインタフェースプロセス，通信クライアントプロセス，Web サーバ/CGI，ポリシーベース電力制御プロセスの 4 つの主要なソフトウェアが動作する．これらは名前付きパイプを介しテキストベースでプロセス間通信を行う．

プロセス間通信の構成は，本スマートタップを集中型システムの一要素として利用する際の中央コントローラからの制御と，分散型システムの一要素または単体で利用する際の自律的なポリシー制御の両方に対応するべく設計し，システム構成の柔軟性を向上させている．計測・制御基板や外部機器との通信を含めた全体構成を図 5 に示す．

以下，それぞれのソフトウェアの機能とデータフォーマットを述べる．

3.2.1 電力センサインタフェースプロセス

計測・制御基板とシリアル通信 (UART) を行う．50 ミリ秒間隔で計測・制御基板から送られてくる計測データを受信し，後述するデータフォーマットに変換し，名前付き

パイプを経由して通信クライアントプロセスへと送信する。また、Webサーバ/CGIから送られてくる制御メッセージをXML解析し、リレーに対する制御命令に変換して計測・制御基板に送信する。

3.2.2 通信クライアントプロセス

電力センサインタフェースから受信した電力計測データを0.5秒間隔で外部の機器へと送信する。通信プロトコルは汎用的なTCP/IPソケット通信を用いている。

3.2.3 Webサーバ/CGI

外部機器（スマートフォンやサーバ、他のスマートタップなど）からの制御メッセージを受信する。受信した制御メッセージを、名前付きパイプを介して電力センサインタフェースプロセスへと送る。

3.2.4 ポリシベース電力制御プロセス

スマートタップ単体での自律的な制御を行う。制御ポリシーとしては、電力情報に基づく制御や環境センサ情報を用いた制御が考えられる。その実装例は5章で示す。

3.3 データフォーマット

リレー制御のためのメッセージと、電力計測データ通知のためのメッセージのフォーマットはXMLライクなものを定義した。これは、将来的なタグの追加（環境センサ情報など）に備えた拡張性と、人間にとっての可読性向上を意図している。

3.3.1 リレー制御メッセージ

リレーを制御するためのメッセージ `command_socket` の例を示す。下記の例では、リレー1をオン、リレー3をオフ制御する。

```
<root>
  <info>
    <kind>command_socket</kind>
  </info>
  <data>
    <socket1><state>ON</state></socket1>
    <socket3><state>OFF</state></socket3>
  </data>
</root>
```

3.3.2 計測データ通知メッセージ

計測した電力データを通知するメッセージ `notice_wattmeter` の例を示す。これは2012年9月9日10時48分54秒039ミリ秒において、たとえばソケット1は積算電力が20954Wh、瞬間電圧が102.070V、電流が1.551A、瞬間電力が84.6Wであり、リレー状態がオンであったことを意味する。他のソケットも同様である。

```
<root>
  <info>
    <kind>notice_wattmeter</kind>
    <time>20120909104854039</time>
```

```
</info>
<data>
  <socket1><wh>20954</wh><volt>102.070</volt>
    <current>1.551</current><watt>84.6</watt>
  </socket1>
  <socket2><wh>2536</wh><volt>102.085</volt><
    current>0.013</current><watt>4.1</watt><
  state>ON</state></socket2>
  <socket3><wh>2499</wh><volt>102.073</volt><
    current>0.242</current><watt>14.2</watt>
  <state>ON</state></socket3>
  <socket4><wh>1219</wh><volt>102.080</volt><
    current>0.081</current><watt>5.1</watt><
  state>ON</state></socket4>
</data>
</root>
```

4. 計測性能の評価

計測性能の評価として、電力計測誤差、電圧計測誤差、電流計測誤差を測定した。電力についてはJIS C 1271-1：電力量計（単独計器）で規定される100%から3.3%の範囲で誤差を測定した。電圧については80Vから120Vまで変化させて測定した。また、電流については100%（15A）から0.033%（5mA）の領域で測定した。それらの結果、電力計測誤差は2%未満、電圧計測誤差は0.1%未満、電流計測誤差は0.2%未満であった。定格（100V、15A）に対する0.033%の電流は約5mAであるため、0.5W程度の待機電力であっても正確に測定できることを示している。

図6にスマートタップで計測したインバータ蛍光灯の電圧波形と電流波形を示すが、インバータ機器独特の波形のひずみが取得できており、電流・電圧の過渡的な変化を明確にとらえている。この例では電流と電圧のピークのタイミングが重なっており、瞬間的に大きな電力となることが把握できている。これより、電流波形からの家電認識などが可能な性能を持っていると考えられる。

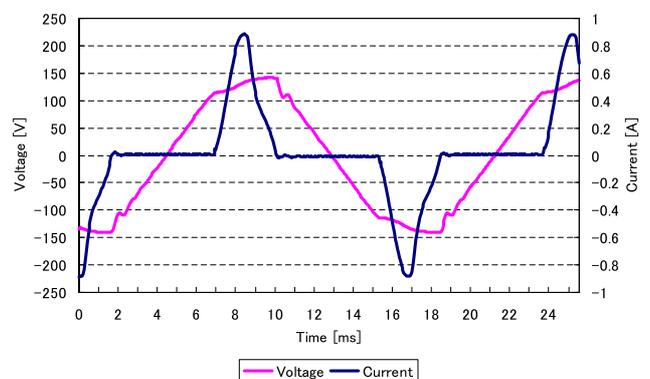


図6 インバータ蛍光灯の電圧波形と電流波形

Fig. 6 Voltage and current waveforms of a fluorescent lamp with an inverter.

5. ポリシベース電力制御の実装と実用例

本章では、開発したスマートタップを用いたポリシベース電力制御機能の例として、「供給電力の最適割当て」の値に基づき自律的な制御を行うソフトウェアベースでの回路ブレーカ機能と、複数機器の突入電流の重なりを回避する機能の実装と評価、ならびに実生活環境でのスマートタップの運用と各種センサ情報を用いた家電制御を示す。

5.1 ソフトウェアベースでの回路ブレーカ機能

現在家庭の分電盤に設置されているブレーカや市販のブレーカ機能付きタップは、ソケット単位での電流制限はできないため、過電流発生による遮断時には必要以上に広い範囲で電力供給が停止する。またそれらは一般に熱動式あるいは電磁式であり、遮断条件は物理特性に基づく固定のものであり柔軟に変更することができないため、家電ごとに動的に定められる「供給電力の最適割当て」の値を基に家電ごとに制御を行うという目的には向かない。

そこで、スマートタップ上にソフトウェアベースの回路ブレーカ機能を実装した。本機能は家電ごとに割り当てられた電流値を基準として、消費電流値が基準値に対して超過している場合に、超過の割合と経過時間の条件に基づきリレーのオフ制御を行う。ソフトウェアベース実装の利点は、遮断が働く電流の閾値と遮断までの時間とをソケットごとに柔軟に設定可能であり、かつ条件の変更が可能なことである。また、ソケット単位での制御が可能である。

ここで、基準値からの大幅な超過は割当て違反または過電流と見なしてすぐに遮断する一方で、一時的な大電流が流れる家電（エアコン起動時や冷蔵庫のコンプレッサ動作時など）については遮断までに一定の猶予を持たせる、といった段階的な設定が可能であれば実用性が向上すると考えられる。そこで、たとえば「ソケット1は3Aを基準として120%の電流値で10秒経過、または150%の電流値で3秒経過すると回路遮断」といった2段階での設定を可能とした。さらに、4つのソケットの電流値の合計に基づく回路遮断機能も実装した。この機能を用いると、電流の合計値が閾値を設定時間以上にわたり継続した場合にすべてのリレーがオフ制御される。本機能の概要を図7に示す。以下、実装と評価を示す。

5.1.1 実装

ソケットごとの電流値に基づく回路ブレーカ機能は、各ソケットの電流値を監視し、閾値からの電流超過が設定時間以上にわたり継続した場合に当該ソケットに対してリレーのオフ制御を行う。閾値は、各ソケットごとに定めた基準電流値および閾値監視パーセントから算出する。たとえば基準電流値が5A、閾値監視パーセントが120%のとき、閾値は $5A \times 1.2 = 6A$ となる。閾値監視パーセントおよび遮断までの時間はソケットごとに2つまで登録でき

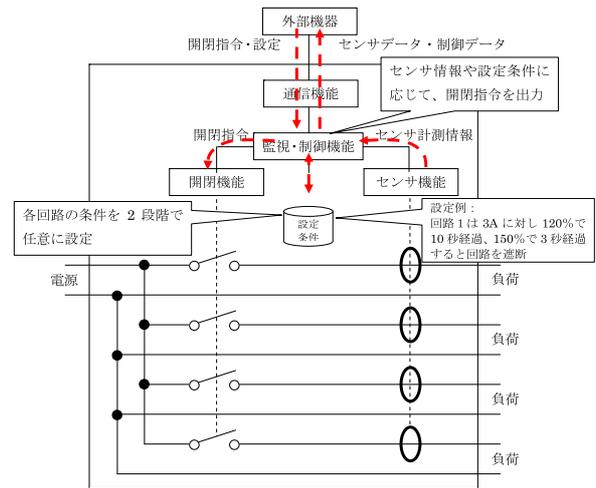


図7 ソフトウェアベースの回路ブレーカ機能

Fig. 7 Software-based circuit breaker function.

る。一方、全ソケットの電流値の合計に基づく回路ブレーカ機能は、閾値からの超過が設定時間以上にわたり継続した場合にすべての回路が遮断される。デフォルトの基準値はスマートタップの定格電流値である15Aであり、閾値監視パーセントは120%としている。基準電流値などのパラメータはWebサーバ/CGI経由で外部から設定することができる。また、遮断が行われる前のユーザに対する警告として、閾値超過時には本体のLEDインジケータが赤点滅する。

5.1.2 実験と評価

以下の条件設定での動作確認を行った。

- ソケット単位での制限超過：「単一のソケットについて、3Aを基準として120%の電流値で10秒経過、または150%の電流値で3秒経過すると回路遮断」という設定下で4Aの電流を通电した結果、10秒後に回路遮断が正しく実行された。また5Aの電流を通电した結果、3秒後に回路遮断が正しく実行された。
- 複数ソケットの合計値での制限超過：「4つのソケットの合計値として、15Aを基準として120%の電流が1秒間流れた時点で回路遮断」という設定下で合計18Aの電流を通电した結果、1秒後に回路遮断が正しく実行された。

以上より、ソケットごとに定めた遮断条件に基づき正しく遮断が行われることから、「供給電力の最適割当て」の監視および制御を行うための性能を備えていると評価する。

5.2 突入電流の重なりを回避する機能

電気機器の中には、電源投入の直後に一時的に、機器の定格電流をはるかに超える大きな電流（いわゆる突入電流）が発生するものがある。停電からの復電時などにおいて、突入電流の大きな機器が複数個同時に電源投入された場合、突入電流が複数重なってきわめて大きな電流となる。

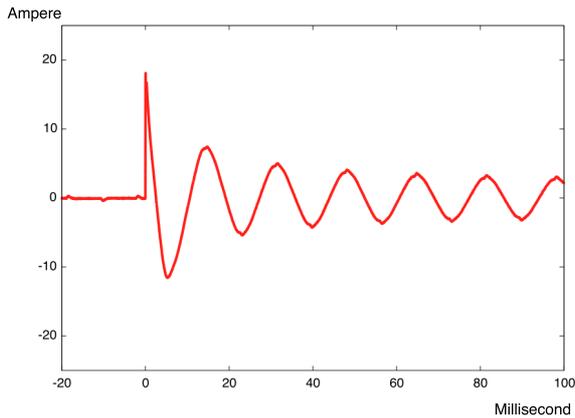


図 8 2 個の白熱電球の電流波形 (突入電流重なり回避なし)
Fig. 8 Current waveform of two light bulbs (without avoiding overlaps between inrush currents).

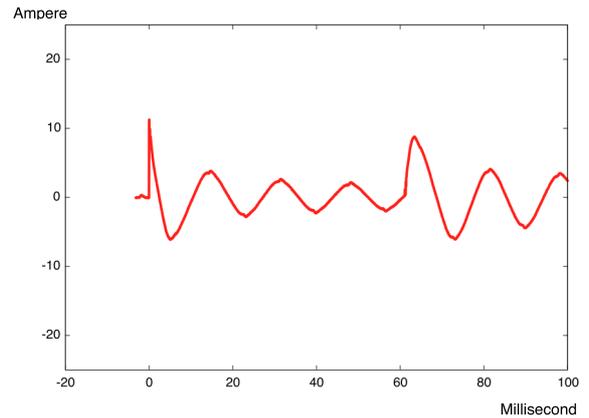


図 9 2 個の白熱電球の電流波形 (突入電流重なり回避あり)
Fig. 9 Current waveform of two light bulbs (with avoiding overlaps between inrush currents).

これにより分電盤に備えられているブレーカが動作して回路遮断が発生したり、電源電圧の不安定化やそれともなう他機器への悪影響が起こったりする。特に太陽光などの分散電源を単独で運転するなどの場合、電源容量が限られているため、突入電流による電圧低下が発生しやすい。こうした問題に対しては、大きな突入電流に耐えうる電源容量や回路を備えることが考えられるものの、コストの面で問題がある。

そこで、スマートタップを用いた解決方法として、複数機器へのリレーのオン制御のタイミングをずらすことで突入電流の重なりを回避する機能を実装した。以下ではその実装、実験と評価を述べる。

5.2.1 実装

複数のソケットを同時にオン制御する際に、計測・制御基板に対して複数の制御メッセージを同時に送るのではなく、1つのソケットに対する制御メッセージを送り、次いで実用上支障がない程度の遅延時間後に次のソケットに対する制御メッセージを送信することで、突入電流の重なりを回避する。遅延時間は、オン制御するソケットから電力供給される家電が持つ突入電流の特性 (突入電流が発生する時間幅) に合わせて設定する。

5.2.2 実験と評価

家電機器として2個の白熱電球 (同一機種) を用いた実験を行った。白熱電球は、電源投入の瞬間からフィラメントの温度が安定するまで突入電流が発生することが知られている。用いた白熱電球の定格は100Wであり、単体での突入電流は9.528A (10回の計測の平均値) であった。突入電流は電源投入後20ms程度に発生していたため、遅延の間隔は電球として実用上支障をきたさず、かつ若干のマージンをとった値として50msと設定した。

突入電流重なり回避機能を用いない場合における、2個の白熱電球の同時投入時の電流のピーク値は19.296A (10回の測定の前平均値) であった。その電流波形の一例を図8

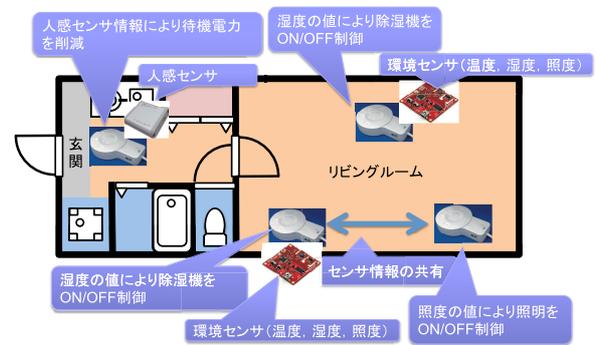


図 10 実生活環境におけるスマートタップの運用
Fig. 10 Deployment of the smart outlets in a real-life environment.

に示す。この例では2つの突入電流が重なった結果、ピーク時の電流値は18.10Aとなっている。一方、突入電流重なり回避機能を用いて、2つのリレーのオン制御メッセージのタイミングを50msずらした際の電流のピーク値は13.238A (10回の測定の前平均値) となった。これは本機能を用いない場合に比べて約31%のピークカットとなる。その電流波形の一例を図9に示す。この例ではピーク時の電流値は11.26Aである (なお、通信処理、ソフト処理、リレー制御に十数ミリ秒を要したため、実際に2個目のリレーがオンとなったのは63ms付近である)。

5.3 実環境での運用と各種センサ情報を用いた家電制御

開発したスマートタップを実生活環境や実証実験用住宅において2012年9月より継続的に運用している [14]。たとえば図10に示すように、一人暮らしのワンルームマンションにスマートタップを4台配置し、(住居備え付けの照明などを除く) ほぼすべての家電機器の0.5秒ごとの電力消費情報をサーバへと収集している。ある1時間における家電機器の消費電力データを図11に示す。電力消費の大きな変動からコーヒーメーカーやドライヤの利用が分かる。さらに冷蔵庫の消費電力の微小な変動が記録されてい

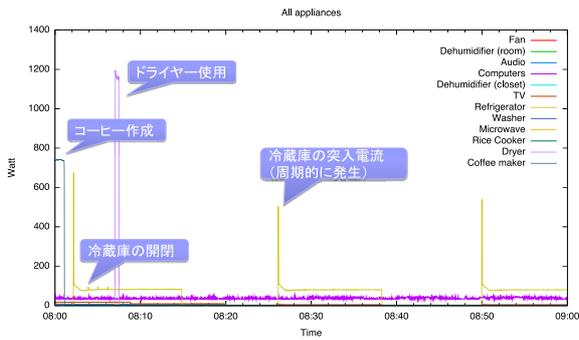


図 11 ある一時間における消費電力の変動

Fig. 11 Variations of power consumption in one hour.

るが、この変動は居住者の冷蔵庫の開閉により発生したものである。このように収集した電力消費データから居住者の生活行動を見出すことができる。この行動把握を生かした応用として、電力消費情報を用いた単身者の「見守り」サービスがあげられる。家庭の総消費電力の変動から人間活動を見出すには機械的な抽出の処理が必要との指摘がある [5] が、家電ごとの電力消費情報を収集することでそのような処理を軽減できると考えられる。

また、居住者の生活行動パターンに適した家電の制御ポリシーをスマートタップに実装した。たとえば、スマートタップの OS が持つ標準的なスケジューリング機能 (Cron) を用いて、たとえば平日の指定した時刻にコーヒーメカを起動させるといった自動制御を行っている。さらに、スマートタップの拡張性を生かして、人感センサや環境センサ (温度、湿度、照度) を USB ポートを用いてインストールし、居住者の不在時にオーディオ機器の待機電力をカットする省エネ機能や、湿度情報に基づく除湿器の自動制御などの機能を実装することで利便性を向上させている。

なお、実生活環境でスマートタップを利用する中で回路ブレーカ機能が実際に働くことがあった。これは、居住者が意図せず電子レンジとドライヤーを同時に利用し、消費電流の合計値が定格 15 A を超えていたためである。これにより、実生活環境においても、過電流による発熱などを回路ブレーカ機能により緩和できていると考えられる。

6. まとめと今後の課題

電力マネジメントを自動化しユーザの負担を軽減することを目的として、ポリシーベース電力制御を可能とするスマートタップの設計と実装を行った。ポリシーベース電力制御機能の実用例として、エネルギーの情報化の考えに基づく「供給電力の最適割当て」の監視と制御を自律的に行うソフトウェアベースでの回路ブレーカ機能と、複数機器の突入電流の重なりを回避する機能を実装し評価した。開発したスマートタップを実生活環境で継続的に利用し、人感センサや環境センサを活用して、自動的な待機電力削減による省エネや家電の自動制御による利便性向上を実現し

た。これらより、実生活環境での行動情報や環境情報を活用したポリシーベース電力制御に足る性能を備えていると評価する。

以下、今後の課題と方向性について述べる。現状のスマートタップは通常のタップに比べサイズが大きい。これは 4 つのソケットにリレーを搭載していること、そして安全のためにリレー間に十分な距離を確保していることに起因する。しかし実環境での運用においては特にサイズに関する要望が強いため、現在小型化を検討している。

現状では、スマートタップ単体で行える電力制御はリレーによるオン・オフに限られている。なお小山らは、本スマートタップに赤外線送信器を USB 接続し、ヒータの動作モード変更などのより細かな家電の制御を試験的に行っている [10]。将来的には、いわゆるスマート家電が外部から制御可能となれば、スマートタップから家電をコントロールすることで、より高度な電力制御が可能となる。

ソフトウェアベースの回路ブレーカ機能は、家電ごとに定められた「供給電力の最適割当て」の値を基準として制御を行うものであるが、割当て値自体を決定する機能は含まれていない。割当て値の決定はユーザの QoL への影響を勘案しつつ動的に行う必要があると考えられ、現在その手法の検討を行っている。また、制御アルゴリズムの拡張を検討し、実装と評価を行っている [13]。なお、遮断が働く前には LED ライトの赤点滅による警告機能があるが、実運用において遮断が働いた際にはユーザは警告に気づかなかった。したがって、警告音を用いるなどのより能動的な通知手段が望ましい。

突入電流重なり回避機能については、今回の実験は単一種類の白熱電球が 2 個というシンプルな状況で行ったが、実環境では異なる突入電流のパターンを持つ様々な家電が混在するため、遅延時間の最適化は複雑になる。

謝辞 様々なご助言を賜った京都大学教授岡部寿男先生、有意義なご指摘を賜った査読者の皆様、そしてご助力を賜った関係各位に深謝する。なお本研究は NICT 高度通信・放送開発委託研究「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」による。ここに深謝する。

参考文献

- [1] Abe, K., Mineno, H. and Mizuno, T.: Development and evaluation of smart tap type Home Energy Management System using sensor networks, *Proc. IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2011)*, pp.1050-1054 (2011).
- [2] Belkin: WeMo, Belkin (online), available from (<http://www.belkin.com/us/wemo>) (accessed 2013-04-24).
- [3] Choi, C.-S., Park, W.-K., Han, J.-S. and Lee, I.-W.: The architecture and implementation of proactive Green Home Energy Management System, *Proc. International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC 2010)*, pp.457-458 (2010).
- [4] Han, J., Choi, C.-S. and Lee, I.: More efficient home

energy management system based on ZigBee communication and infrared remote controls, *IEEE Trans. Consumer Electronics*, Vol.57, No.1, pp.85-89 (2011).

[5] 石山文彦, 井上洋思, 山本昌樹, 渡辺敏雄, 香西将樹, 鈴木康直, 高谷和宏: 1千万世帯の独居を見守る, 情報処理学会研究報告コンシューマ・デバイス&システム (CDS) 2013-CDS-6 (2013).

[6] Ito, M., Uda, R., Ichimura, S., Tago, K., Hoshi, T. and Matsushita, Y.: A method of appliance detection based on features of power waveform, *Proc. IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet (SAINT 2004)*, pp.291-294 (2004).

[7] Kato, T., Yuasa, K. and Matsuyama, T.: Energy on demand: Efficient and versatile energy control system for home energy management, *Proc. IEEE International Conference on Smart Grid Communications (Smart-GridComm 2011)*, pp.392-397 (2011).

[8] Kato, T., Cho, H.S., Lee, D., Toyomura, T. and Yamazaki, T.: Appliance Recognition from Electric Current Signals for Information-Energy Integrated Network in Home Environments, *International Journal of Assistive Robotics and Systems*, Vol.10, No.4, pp.51-60 (2009).

[9] 経済産業省・資源エネルギー庁: エネルギー白書 2012, 経済産業省・資源エネルギー庁 (オンライン), 入手先 <<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2012energyhtml/>> (参照 2013-07-05).

[10] 小山洋一, 岡本暁広, 中野博樹: 家庭内電力網における電力管理技術の階層化設計, 電子情報通信学会総合大会講演論文集 BS-7-4 (2012).

[11] Lifton, J., Feldmeier, M., Ono, Y., Lewis, C. and Paradiso, J.: A Platform for Ubiquitous Sensor Deployment in Occupational and Domestic Environments, *Proc. International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2007)*, pp.119-127 (2007).

[12] 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).

[13] Morimoto, N., Fujita, Y., Yoshida, M., Yoshimizu, H., Takiyamada, M., Akehi, T. and Tanaka, M.: Optimizing power allocation to electrical appliances with an algorithm for the knapsack problem, *Proc. IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE 2013)*, pp.155-156 (2013).

[14] Morimoto, N., Fujita, Y., Yoshida, M., Yoshimizu, H., Takiyamada, M., Akehi, T. and Tanaka, M.: Smart Outlet Network for Energy-Aware Services Utilizing Various Sensor Information, *Proc. IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA 2013)*, pp.1630-1635 (2013).

[15] Mrazovac, B., Bjelica, M., Teslic, N. and Papp, I.: Towards ubiquitous smart outlets for safety and energetic efficiency of home electric appliances, *Proc. IEEE International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin 2011)*, pp.322-326 (2011).

[16] NEC システムテクノロジー株式会社: オフィスや家庭の電力を節約する電力制御システム「グリーンタップ」の開発, NEC システムテクノロジー株式会社 (オンライン), 入手先 <<http://www.nec.co.jp/press/ja/0911/0405.html>> (参照 2013-04-24).

[17] 岡部寿男: 情報通信・エネルギー統合技術の研究開発, システム/制御/情報: システム制御情報学会誌, Vol.55, No.6, pp.221-226 (2011).

[18] Song, G., Ding, F., Zhang, W. and Song, A.: A wireless

power outlet system for smart homes, *IEEE Trans. Consumer Electronics*, Vol.54, No.4, pp.1688-1691 (2008).

[19] 塚本昌彦, 加藤丈和: スマートタップの共通仕様化に向けて, 情報処理, Vol.51, No.8, pp.934-942 (2010).

[20] Ueno, T., Inada, R., Saeki, O. and Tsuji, K.: Effectiveness of an energy-consumption information system for residential buildings, *Applied Energy*, Vol.83, No.8, pp.868-883 (2006).

[21] Yoshihisa, T., Fujita, N. and Tsukamoto, M.: HEMS toolkit: A toolkit for constructing a home energy management system, *Proc. IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2011)*, pp.822-823 (2011).

[22] Yoshihisa, T., Fujita, N. and Tsukamoto, M.: A rule generation method for electrical appliances management systems with home EoD, *Proc. IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2012)*, pp.248-250 (2012).

[23] 株式会社ユビキタス: iRemotap, 株式会社ユビキタス (オンライン), 入手先 <<http://www.ubiquitous.co.jp/products/conceptlaboratory/iremotap/>> (参照 2013-04-24).



森本 尚之

平成 18 年 3 月京都大学理学部卒業。
平成 23 年 3 月京都大学大学院情報学
研究科博士後期課程単位取得認定退
学。同年 4 月株式会社エネゲート入
社。「情報通信・エネルギー統合技術
の研究開発」に従事。



藤田 有

平成 22 年 4 月株式会社エネゲート入
社。エネルギーマネジメント用電力計
測センサの開発, 同システム関連機器
の試作・開発, 電力会社向け電子式電
力量計 (スマートメータ) の開発, 市
販向け電子式電力量計の開発に従事。



吉田 雅昭

平成 7 年 4 月東光精機株式会社 (現,
エネゲート) 入社。配電システムの運用・
メンテナンスを行うための業務支援シ
ステム (配電自動化システム), 事務
所・工場・家庭の電気使用量を測定し,
電気使用量の見える化を目的としたエ
ネルギーマネジメントシステムの開発に従事。



吉水 宏幸

平成 7 年 4 月東光精機株式会社（現、エネゲート）入社。エネルギーマネジメント用電力計測センサの開発，同システム関連機器の試作・開発，電力会社向け電子式電力量計（スマートメータ）の開発，市販向け電子式電力量計

の開発に従事。



滝山田 昌文

昭和 63 年 4 月東光精機株式会社（現、エネゲート）入社。家庭内の電気使用量を測定し消費目標値との比較や金額等を表示するシステム（省エネナビ）の開発や，事務所・工場・家庭の電気使用量を測定し，電気使用量の見える

化を目的としたエネルギーマネジメントシステムの開発に従事。



明比 輝一

昭和 59 年 4 月東光精機株式会社（現、エネゲート）入社。家庭内の電気使用量を測定し消費目標値との比較や金額等を表示するシステム（省エネナビ）の開発や，事務所・工場・家庭の電気使用量を測定し，電気使用量の見える

化を目的としたエネルギーマネジメントシステムの開発に従事。



田中 真実

平成 13 年 4 月東光精機株式会社（現、エネゲート）入社。エネルギーマネジメント用電力計測センサの開発，同システム関連機器の試作・開発，電力会社向け電子式電力量計（スマートメータ）の開発，市販向け電子式電力量計

の開発に従事。