

# 低コストかつ長期稼働性能を備えた 皮相電力計測用マイクロコントローラモジュールの試作

落合 隆夫<sup>1</sup>, 竹内 純人<sup>1</sup>

## Fabrication of Low-cost Device with High Stability based on Microcontrollers for Apparent Power Measurement

Takao OCHIAI, Sumito TAKEUCHI

### Abstract

We fabricated the prototype of an affordable device with high stability for apparent power measurement. Nowadays, many single-board computers with OS (Operating System) are easily available thanks to IoT (Internet of Things) evolution, and they are utilized for measurement system via the Internet. However, some drawbacks are weakness to fluctuations in power supply such as blackouts, and necessity of additional analog circuits. Our relatively low-cost (6,000 JPY) device achieved sustainable long-term operation by using the microcontrollers, and a promising equipment for room-level monitoring of electricity consumption.

Keywords: *Electronic circuit design, Microcontroller, Apparent Power Measurement, Power Saving*

## 1 はじめに

### 1.1 背景

教育研究技師部では 2013 年度より「消費電力計測プロジェクト」、通称 ECO プロジェクトとして、ICT システムを活用した学内の節電活動を推進している。これまでの成果として、2014 年度には学内施設の電力使用状況を電力線単位で Web ページから把握できるようになり [1]、また 2015 年度には、東 6 号館 1 階電気室の電線にセンサ設備の新規設置を行い、同館 4 階における消費電力量の計測を実現した [2]。同室に設置済の電力計測機器を図 1 に示す<sup>2</sup>。

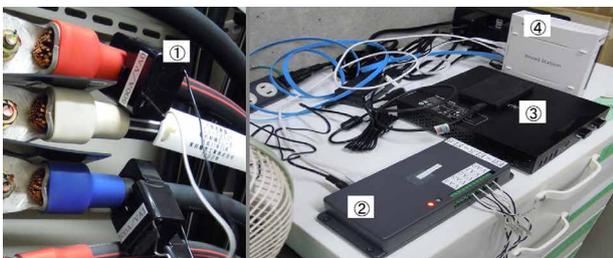


図 1: 東 6 号館 1 階電気室に設置済の計測設備

#### ① 電力計測センサ

計測対象の電線に取り付け、皮相電力値を計測するクランプ型交流電流センサ

#### ② IEEE1888 エネルギー診断メータ

株式会社フタバ企画<sup>3</sup>から購入したセンサコントローラ。電力計測センサから計測値を定期的に取り得し、IEEE1888 通信プロトコル [3] によりサーバに送信する

#### ③ 小型 PC

IEEE1888 エネルギー診断メータから送信される電力計測値の一次蓄積用として使用する PC

#### ④ ルータ

学内ネットワーク接続用のルータ

### 1.2 電力計測機器の論理構成と設置費用における懸案点

図 1 の電力計測設備からサーバ機器までの論理接続構成を図 2 に示す。本プロジェクトにて構築した電力計測システムは、図 2 の左端にある個々の電線に取り付け

Received on September 6, 2017.

<sup>1</sup> 教育研究技師部

<sup>2</sup> 計測状況は 2017 年 9 月現在、<http://eco.tech.uec.ac.jp/ecop/>にて Web 公開中 (学内専用) である。

<sup>3</sup> <http://www.futaba-kikaku.jp/>

た電力計測センサの計測値が、学内 LAN 設備を通じて最終的にデータ集積用サーバに送信される方式となっている。

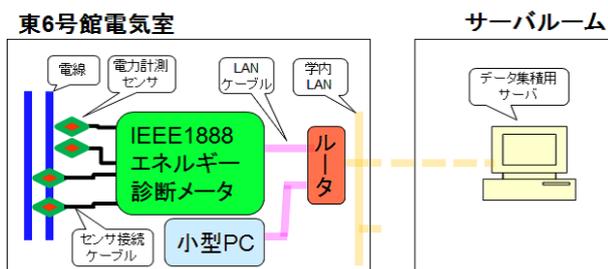


図 2: 電力計測設備一式の論理構成

東 6 号館に設置した上記機器のうち、ルータおよび小型 PC は、いずれも計測設備を配置する室内に各 1 台設置すればよく、かつ、購入価格もルータは数千円、小型 PC は高々 3 万円程度の市販品で充分実用に達することを確認している。対して、電力計測センサ/センサ接続ケーブル/IEEE1888 エネルギー診断メータの 3 点は、計測対象の電線の数に比例して増設してゆく必要がある。2015 年度導入時における、これら機器 3 点の型番および購入金額（税抜き）の実績を表 1 に示す<sup>4</sup>

表 1: 購入したセンサ機器の型番と金額

機器名	個数	単価	合計
電力計測センサ 500A 用 (CTL-36-CLS)	4	¥4,300	¥17,200
センサ接続ケーブル	4	¥1,200	¥4,800
IEEE1888 エネルギー診断メータ (有線版)	1	¥21,750	¥21,750

ECO プロジェクトでは今後も、施設課などの要望に基づき、学内の電力計測対象を順次拡大してゆく予定であり、近い将来、計測対象の電線は数十～数百系統とすることが見込まれる。そのため必然的に、上記 3 点の機器購入費用の割合も増加してゆくこととなる。計測電線数に比例して増設を要する機器の中でも、特に IEEE1888 エネルギー診断メータは、購入単価が税抜きでも 2 万円超と突出している。このため、本製品と同等以上の機能を有する、より安価なセンサコントローラを開発し、代替できるようになれば、今後の計測設備の増設において、その費用増加量を最も効果的に抑制する手段となり得る可能性がある。

<sup>4</sup>表 1 の機器 3 点は、機器間の接続保証および IEEE1888 エネルギー診断メータの精度検査作業と併せて、株式会社フタバ企画より一括購入した。また、2015 年度に計測を開始した 2 系統の電線はいずれも単相 3 線式であり、電流量計測につき各々 2 個のクランプ型センサを要する。そのため、電力計測センサの購入個数は合計 4 個となっている。また、IEEE1888 エネルギー診断メータには同一種類の電力計測センサを最大 5 個まで接続/計測が可能となっている。

### 1.3 IEEE1888 エネルギー診断メータの仕様

ここで、IEEE1888 エネルギー診断メータの仕様について述べる。本機器は、接続された電力計測用センサに対して（60 秒毎など）定期的にデータ計測を行い、取得した計測値を IP ネットワーク経由でサーバに自動送信する機能に特化したマイコンボードである。ボード内に次に挙げる諸機能を備えており、本装置を用いることで、IEEE1888 規格に対応した ICT システムへ、センサ計測値を取り込むことができるようになっている [4]。

- 一般的な LAN (IP ネットワーク) 経由で、計測値を IEEE1888 サーバに定期送信する (ただし、計測データの蓄積 (一次記憶) はできない)
- IP アドレス/DHCP/DNS/NTP などの IP(v4) ネットワーク設定が可能<sup>5</sup>
- 1 台につき、同一種類のセンサを最大 5 個まで接続可能
- 対応電圧は 100V~440V
- 単相 3 線式の電線用に、特定の 2 個のセンサの合計値を自動算出する<sup>6</sup>

### 1.4 電力計測用マイクロコントローラモジュールの試作

上述のとおり、IEEE1888 エネルギー診断メータは、その購入金額が他の機器に較べて突出している。しかしながら同機器の実体は、市販のマイコンボードに専用のプログラムを組み込み、センサコントローラとして稼働させているものである。そこで本プロジェクトの活動として、同機器と同等 (以上) の機能性、信頼性および可用性を備えつつ、より安価 (高くとも 1 万円以内) に構築可能なセンサコントローラを独自開発することとした。

本稿では、以上の経緯を踏まえ、2016 年度における ECO プロジェクトの活動として試作した『皮相電力計測用マイクロコントローラモジュール』の設計、テスト過程について詳説する。また、本モジュールを活用した今後の活動展望を最後に述べる。

## 2 試作モジュールの概要

### 2.1 開発方式の選定

前述のとおり、大学キャンパス内の複数箇所における消費電力を把握するためには、測定箇所分の交流電流セ

<sup>5</sup>IP ネットワークへの接続方式の違いにより、有線版/無線版の 2 種類が販売されている。本プロジェクトでは割安な有線版を購入し設置している。

<sup>6</sup>電圧値の内部設定を調整することで 3 相 3 線式にも対応可能

ンサおよびセンサ電圧から電力を計算するセンサコントローラ（センサ計測端末）が多数必要である。近年、IoT(Internet of Things)の普及によりカードサイズの教育用シングルボードコンピュータを利用したセンサ計測端末が簡単に実現できる体制が整いつつある。しかし、教育用のシングルボードコンピュータには下記のような短所がある。

- 本体価格（基板のみ）は約数千円
- 別途アナログ回路の追加が必要
- 電気系統トラブル（停電）の際に、自力では再起動不可能

このためシングルボードコンピュータは、低価格PCとしては十分有用であるが、計測用途への応用にはコストと長期安定動作が求められるため、必ずしも最適な解とは言えない。特に、多数の分電盤を測定対象とした場合には、停電などの電源変動のたびに再起動を手動で行う必要があるため、そのたびに人手が必要となる。無停電電源装置（UPS）の使用も考えられるが、計測端末の数や分電盤の数に比例してコストがかさむため、有効な手段となりえない。そこで本プロジェクトでは、低コストと長期安定動作の両要件を満たすべく、マイクロコントローラ（通称マイコン）を用いて消費電力測定モジュールを試作することとした。試作品の完成図を図3に示す。

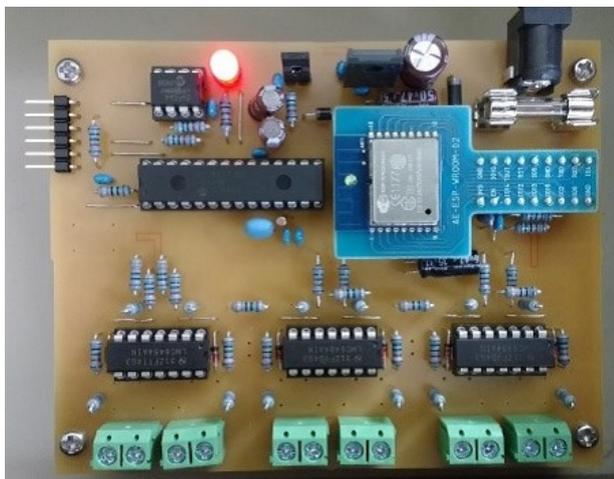


図 3: マイクロコントローラを用いた消費電力測定モジュール

今回のセンサ計測端末のように、必要機能がある程度限定した場合にはOSを搭載したコンピュータよりもマイクロコントローラが力を発揮する場合がある。マイクロコントローラは基本的に中央演算処理装置（CPU）、主記憶メモリ（RAM）、内蔵タイマー、入出力周辺機能（デ

ジタル/アナログ）からなる。PCのOSに代表される大規模・複雑なプログラムではなく、必要な処理の手順のみが記述された小規模なプログラムにしたがって動作させることが可能である。価格も8bitマイコンであれば数百円程度で購入可能である。また、停電による電源変動が起こっても電気系統が元通り復帰すれば自動的に再起動するため、多数の端末の管理・運用に適している。

## 2.2 仕様

表2に試作したモジュールの主な仕様を示す。

表 2: 皮相電力量計測モジュールの仕様

項目	仕様
入力	6チャンネル, $\pm 1.5\text{ V}$
アナログ回路部	全波整流回路+非反転増幅回路
A/D変換部	逐次比較型(12bit)
出力(デジタル値)	皮相電力の平均値(10分毎)
備考	WiFi通信機能 内部時計機能(うるう年対応)

本モジュールでは、交流電流センサの出力電圧（実効値で1V程度）をマイコン内部でデジタルデータへ変換、実効値計算を行う。さらに交流電流とセンサ電圧の線形性を利用して電流値（実効値）を求める。最後に電力配線系統の種別（電圧の振幅値、単相3線など）を考慮し算出した皮相電力値（単位VA）をIEEE1888サーバにWiFi通信で定期的送信することを目標仕様とする。

## 2.3 事前調査・検討

本モジュール利用の目的は、安価な材料費で実現することで多くの配電盤を測定し、学内の電力使用状況の把握と節電へ貢献することにある。我々が普段利用している電気は交流という時間とともに大きさと符号が変わる電気の波である。ドーナツ形状の磁性体でできた交流電流センサの穴の部分に配線を通すことで、電流を電圧値として知ることができる。先述した交流電流センサの単価は4千円程度である。例えば電力の分配方式の1つである、単相3線を1系統測定するためには2個必要である。先述したIEEE1888エネルギー診断メータのような、有線LAN通信が可能で単相3線2系統が測定できる市販の電力測定モジュールは2万円台から入手可能だが、センサ費用を考慮すると設備一式の合計金額は4万円以上になってしまう。交流電流センサの単価を下げするには大量購入（目安として1000個以上）が考えられるが、初期費用がかかるため現実的な解ではない。そのた

め、なるべく安価な部品を用いて電力測定モジュールを作製することが重要となる。

今回は、目標原価を市販の教育用シングルボードコンピュータの価格と同程度の6-8千円に設定した。この目標原価の範囲で、電力測定に必要な十分な機能をもつ皮相電力測定モジュールを作製するためにまず考えるべきことは、モジュールのコストを決める要因の列挙である。これらの要因としては、次の3点が挙げられる。

1. 部品の特殊性
2. 部品数
3. 部品の大きさ (基板の大きさと相関)

上記1は自明であり、2および3は部品を実装する基板の面積に関係がある。そこで定番・汎用部品の使用、部品数の削減の2点を基軸として回路構成を検討した。また、今回の目的は低コスト・長期安定稼働するモジュールの実現であることから、はんだ付け不良などの歩留まり悪化を考慮して、携帯電話などによく使用される微小部品(チップ部品)は極力使わないこととした。

## 3 構想設計および詳細設計

### 3.1 構想設計

図4に皮相電力測定モジュールのブロックダイアグラムを示す。

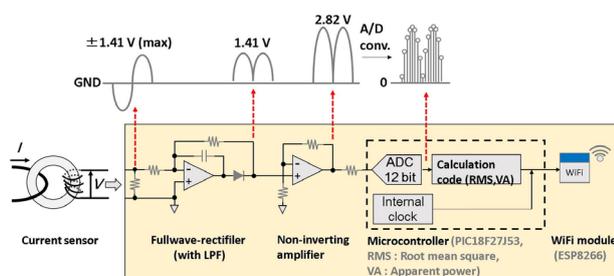


図4: モジュールの構成

皮相電力測定モジュールに必要な主な機能は、交流電流センサ電圧のデジタル値への変換(A/D変換)、実効値計算、皮相電力への換算およびIEEE1888サーバとの通信である。今回は、実効値計算を担う信号処理部とネットワーク通信部を各々マイクロコントローラとWiFiモジュールに割り当て、処理に伴う負荷を分散する形態をとった。

信号処理部はアナログフロントエンド(全波整流回路+非反転増幅回路)とマイクロコントローラ回路からなる。汎用部品の使用と部品数の削減を目的として、アナログ

フロントエンドでは信号対ノイズ比の向上を目的とした電圧レベル変換・増幅のみに限定し、実効値計算・所望の物理量への演算処理をマイコンのプログラムで行うことにした<sup>7</sup>。センサ電圧の最大値を $1\text{Vrms}(\pm 1.41\text{V})$ とし、初段の全波整流回路でセンサ電圧を正の電圧(0-1.41V)に変換する。次段の非反転増幅回路ではマイコンのA/D変換器の入力電圧範囲(0-3.0V)を有効に利用するために2倍の電圧増幅を行うことにした。今回の試作で用いた全波整流回路は単電源オペアンプLMC6484<sup>8</sup>の応用回路[5]である。この回路は、電子回路の教科書で頻出する定番回路の半分の部品数で済み、複数の抵抗値間で値の整合をとる必要がないなど、コストや作製時の微調整を簡素化できるメリットを持つ。また、オペアンプの入力端子の電流が $\pm 5\text{mA}$ の範囲内であれば負電圧の入力も可能なため、負電源電圧回路も省略可能である<sup>9</sup>。マイクロコントローラには8bitマイコンPIC18F27J53<sup>10</sup>(Microchip社)を用いた。同機器は、12bit A/D変換機能、ハードウェア乗算機能、シリアル通信機能、外付け32.768kHz水晶振動子を用いた内部時計機能(時刻の初期値要、うるう年対応2099年まで)を搭載し、400円程度で入手可能である。

次にネットワーク通信部の回路について述べる。IPネットワーク上に用意したIEEE1888サーバとの通信には有線方式と無線方式がある。分電盤での運用を考慮すると配線が少なく、学内の無線LAN用アクセスポイントが利用可能な無線方式が望ましい。無線LANのモジュールはXBee<sup>11</sup>(SWITCH SCIENCE社)、ESP8266<sup>12</sup>(Espressif Systems社)などいくつか入手可能であるが、マイコンとのシリアル通信が可能でかつ数百円程度で購入可能なESP8266を用いることにした。

### 3.2 詳細設計

モジュール各部の機能を大まかに決定した後、詳細設計に移行した。始めに試作機の回路図とマイコンのプログラムの作成に着手した。マイコンのプログラミングコード作成ではMicrochip社が無償提供している総合開発環境MPLAB X IDE, 8bit PIC マイコン用Cコンパイラxc8 compiler<sup>13</sup>(Free Edition)を用いて行った。マイ

<sup>7</sup>同じ機能を実現する別な手段として、交流入力信号をその実効値と等しい大きさの直流電圧に変換するICを使用する方法もある。しかし測定チャネル数×数100円分のコストが余分にかかるため、候補から除外した。

<sup>8</sup><http://www.tij.co.jp/product/jp/LMC6484>

<sup>9</sup>LMC6484は定番ICの一つであるため、4回路入りで1個300円程度で入手可能である。これらの特徴に加えて、出力端子と反転入力端子にコンデンサを1個追加するだけでアンチエイリアスフィルタ回路つき全波整流回路としても機能する。

<sup>10</sup><http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F27J53>

<sup>11</sup><https://www.switch-science.com/catalog/list/7/>

<sup>12</sup><http://espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview>

<sup>13</sup><http://www.microchip.com/ja/mplab/compilers>

コンが担う処理は毎分、交流電流センサの電圧の A/D 変換およびその実効値を計算した後、10 分ごとに時刻データと皮相電力の平均値データを WiFi モジュールへ送信することである。表 3 にマイコンが行う処理を示す。

表 3: 本モジュールの処理内容

項目	内容
(起動時)	設定データ読み込み WiFi モジュールとの通信設定 時刻サーバからの時刻取得 内部時計の計数開始
(通常時)	
毎分	センサ電圧の A/D 変換 (6ch) (標本周期 $625\mu s$ ) ソフトウェアによる実効値計算
10 分毎	皮相電力の平均値の計算
毎月	サーバへ時刻と電力データ送信 所定の日に 1 回再起動・時刻合わせ

今回のモジュールのプログラムコードで重要な位置づけにある処理は、WiFi モジュールを介した IEEE1888 サーバとの通信である。マイコンと WiFi モジュールはシリアル通信によりデータの送受信を行う。WiFi モジュールへ送信する命令コマンドやデータは文字列に変換した後、シリアル通信経由で送信される。命令送信後、WiFi モジュールからの応答メッセージを解析することで次の動作に移行する形となる。シリアル通信では文字列が ASCII コードで表現され、1 文字の大きさが 1 バイト (8bit) に相当する。一般にマイコンのシリアル通信モジュールの内蔵バッファは文字 2 個分 (2 バイト) しかないため、新しい文字が到着すると最も先に到着した文字が上書きにより消失する。そこで円滑な通信を担保するために、データ受信通知割込み機能とリングバッファ (512 バイト) により到着した受信データを一時的に保存する記憶領域を確保した。また、リングバッファに改行コードのカウンタ機能を追加しバッファ内にいくつかのメッセージが存在するかを簡易に判定できるようにして、文単位での読み出しを可能にした。ここまでで受信メッセージの取りこぼしを防ぐ仕組みができたので、次にメッセージ解析プログラムを作成した。このプログラムは、通常我々が文章を理解する際に行っている分析 (文を文節や単語に分解するなど) をプログラムコードにしたものである。WiFi モジュールからの応答を解析し、その内容に応じた処理を実行する。これらをネットワーク通信用コードに組み込み、シリアル通信経由で IEEE1888 サーバとのメッセージ送受信 (最大数百 B/s 程度) とその内容解析を安定して行えるようにした。また、IEEE1888 通信プロトコルに適合したメッセージ送

信機能を PIC マイコン用に作成し、実装した。

## 4 モジュールのテスト

### 4.1 モジュールの入出力特性のテスト

詳細設計の後、本モジュールのセンサ電圧入力部からマイコン内部の A/D 変換・実効値計算部までの入出力特性を測定した。交流信号波形発生器を用いて 50Hz の正弦波を本モジュールに入力し、入力信号の実効値を 6 桁表示デジタルマルチメータで、マイコン内の A/D 変換値の実効値を USB 経由で PC に集録することで入出力特性を調べた。図 5 に交流入力信号 (実効値) と A/D 変換値 (実効値, 6 チャンネル分) の関係を示す。本モジュールの特性は 0.011.0Vrms の範囲で良い線形性を示した。抵抗  $10\Omega$  を並列接続したときの交流電流センサの最大出力電圧は 1Vrms 程度であることから、電流センサの動作範囲内で良い線形性を示した。センサ電圧入力部から A/D 変換器までの伝達関数の理論直線 (図 5 の破線) を求め、グラフに記載した。伝達関数の理論直線と実測値が 0.01-1.0Vrms の範囲内で良い一致を示した。また、この結果から利用可能な領域を拡大するために入力短絡条件下でのオフセット電圧に対する補正の必要性も示唆された。

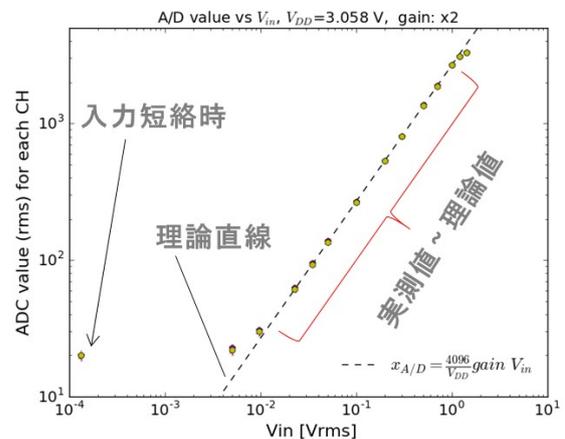


図 5: 交流入力信号の大きさを変化させたときの A/D 変換値 (どちらも実効値)

### 4.2 モジュールの WiFi 通信テスト

入出力テストと並行して、本モジュールの通信テストを行った。ネットワーク設定情報や測定に関する設定データを反映し分電盤内部での運用を想定して環境を整え、実験を行った。WiFi モジュールは 2.54GHz 周波数帯を使用しており、その波長は約 12 cm である。波の

特性として進行方向と偏波方向(電場の振動方向)に垂直な方向に少なくとも半波長程度の空間があれば電磁波はその空間を通過することができる。例えば通常、分電盤の扉は10cm × 数mm程度の間隙があることから、分電盤内にモジュールを置いた場合でも原理的には外のWiFiアンテナと通信可能と考えられる。このような状況を想定して、引き出しの中にモジュールを格納し、1.5m離れたWiFiルータ(中継器)と通信テストを行った(図6)。



図6: 通信テスト環境

図7にモジュールからIEEE1888サーバに送信された1日ごとのデータの数を示す。送信開始した期日が2017年6月12日午前11時頃であるため、データ数が他の日と比較して87と少ない。モジュールが毎日10分ごとにデータを送ると1日当たり144個のデータがサーバに送信されることになる。図7に一か所、データの欠損がある部分は7月11日のもので、データ数が120個となった。この理由は、1か月に1回、所定の期日に時刻合わせ用の自動再起動コードにバグがあり、所定の期日に毎時再起動する形になっていたことに起因する。バグの混入はあったが自動再起動機能が有効に働いていることを確認できた。このバグについては速やかに修正した。分電盤を想定した疑似的な密閉空間内部からのWiFi通信が可能であることを確認した。また、1か月間支障無く連続稼働したことを確認した。

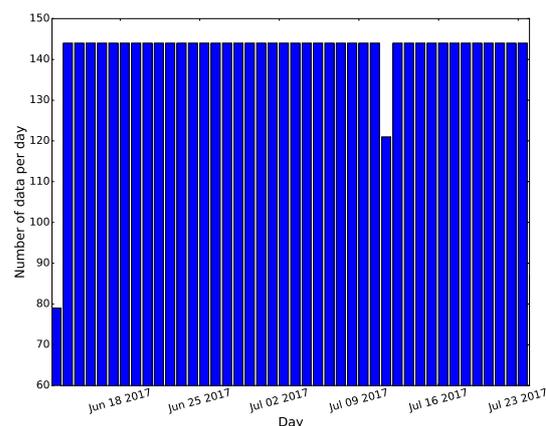


図7: 通信テスト結果:1日毎のデータ送信回数(6/12より)

### 4.3 運用に向けて

今回、皮相電力計測モジュールの試作機の前価は取引代理店などの手数料込みで5800円であった。また、民間の会社へ基板作製および部品実装を依頼した場合は合計で約12000円程度(参考価格)であった。概ね前価については市販品の25%程度で実現することができた。実際の運用においては予め電流センサの入出力特性の傾きのデータの登録が不可欠である。また、複数の皮相電力値間で定量的な比較を行うためにモジュールが示す値にどれくらいのばらつき(不確かさ)が見込まれるか、値の提示が必要である。今後、分電盤ごとに必要な電流センサの種類を選択とそれらの入出力特性の傾きを統計手法により求めること、加えて計測系の不確かさの算出例[6]をもとに電流センサの入力範囲での不確かさの見積もりを行うことに重点をおき、簡便に運用が可能な計測システムとして完成度を高めていく。

## 5 まとめ

### 5.1 本活動の貢献

本稿では2章にて試作モジュールの概要を、3章にて同モジュールの詳細設計を述べ、当初想定するセンサコントローラ機能を低コストで実現可能であることを示した。また、4章にてモジュールのテスト過程を述べ、試作の段階でも同モジュールが十分な長期稼働性能を有することを示した。

先述のとおり、今後のECOプロジェクトでは電力計測範囲を順次拡大し、数十~数百系統の電線を計測対象にしてゆく見込みである。近く試作したモジュールを

実用稼働させ、十分な安定稼働と計測精度が得られることが判明すれば、その後は、計測対象拡大の度に追加購入しなければならなかった（実売単価 2 万円を超える）市販のセンサコントローラを、原価数千円程度の同モジュールで代替することが可能となる。

## 5.2 今後の展望

ECO プロジェクトでは今後、電力計測対象の範囲拡大と並行して、引き続き試作モジュールの精度向上とサイズの縮小に取り組み、狭い空間の分電盤の中にでもより柔軟にセンサ設備を設置できるよう、工夫と改良を重ねる予定である。

また 2017 年現在、実売価格が 1000 円弱程度のシングルボードコンピュータの発売が確認されており、同コンピュータ上で Linux OS がサーバ用途として支障なく長期間稼働することが Web などでも報告されている。図 2 で示した電力計測設備の小型 PC についてはこれまで、耐故障性能を高めるため、SSD を内蔵し内部に実稼働部品を持たない、いわゆるスピンドルレス PC を利用していた。そのため、小型 PC の購入価格は安くても 3 万円を下回るのには難しい状況であったが、これを低価格シングルボードコンピュータに置き換えることができれば、センサ設備増設費用のさらなる抑制と柔軟な機器構成の選択が可能となる。

今後も引き続き、マイクロコントローラおよびシングルボードコンピュータの動向などに目を配りつつ、稼働性能および計測性能などを落とさずにセンサ設備の総コストの削減を図れるよう、最適なシステム構成を検討してゆく予定である。

## 謝辞

教育研究技師部 消費電力計測プロジェクトは電気通信大学業務改善プロジェクトの支援を受けて活動しています。実際の電力計測にあたっては、先進理工学専攻、共通教育部、施設課各位のご協力をいただいています。また、学内ネットワークの利用には情報基盤センターおよび東 6 号館ネットワーク管理係各位のご協力をいただいています。この場を借りて感謝申し上げます。最後に、プロジェクトの推進に尽力いただいている教育研究技師部のプロジェクトメンバー諸氏に感謝申しあげ、謝辞とします。

## 参考文献

- [1] 竹内純人：“コンセント単位での計測を可能としたフリーソフトウェアツールによる消費電力値自動収集システムの実装と改善”，電気通信大学紀要，28(1)，pp.61-69，2015
- [2] 落合隆夫，和田 紀子，竹内 純人：“フロア単位の電力計測を実現するための大型電流計測センサの動作テストおよび導入”，電気通信大学紀要，29(1)，p.290106，2016
- [3] 落合秀也（江崎浩監修）：“スマートグリッド対応 IEEE 1888 プロトコル教科書”，初版，株式会社インプレスジャパン，2012，p8.
- [4] 株式会社フタバ企画：“IEEE1888 多回路エネルギー診断メータ イーサーネット（有線）版 取扱説明書”，<http://manualzilla.com/doc/6719406/>（2017 年 9 月 1 日閲覧）.
- [5] テキサス・インスツルメンツ・インコーポレイテッド：“Full Wave Rectifier with Input Current Protection (RI)”，<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc6484.pdf>（2017 年 9 月 1 日閲覧）.
- [6] 吉岡 正裕：“ハイドロホン感度の校正と不確かさ評価”，産総研計量標準報告 Vol. 5, No. 3，pp.189-197，2006