

内蔵センサを活用した情報機器の消費エネルギー計測手法

石島 悌^{1,a)} 平松 初珠¹ 山東 悠介² 岩田 晋弥²

受付日 2012年6月29日, 採録日 2012年12月7日

概要: 情報通信技術分野においても, 省エネルギー対応は社会的な要請である. それに応えるためには, サーバ機器などの消費電力や温度を適切に計測する必要がある. そこで, 我々は, サーバやUPSなどの情報機器に内蔵されたセンサを活用することで, 消費エネルギーを計測する手法を提案する. 提案方式により, 新たな計測機器を追加する必要がなくなり, 測定値の継続的な記録と可視化が容易となる. 提案方式の有効性を確認するため, 実際にハードウェアモニタによる消費エネルギーの計測を行った. その結果, 誤差は実用上問題にならない範囲に収まっており, 提案方式の有効性を確認できた.

キーワード: 内蔵センサ, 省エネルギー, 電力計測, 温度計測

Energy Consumption Measurement with Built-in Sensors on IT Equipment

DAI ISHIJIMA^{1,a)} HATSUMI HIRAMATSU¹ YUSUKE SANDO² SHINYA IWATA²

Received: June 29, 2012, Accepted: December 7, 2012

Abstract: It is inevitable to meet the social request of energy saving in information and communication technology. Therefore, it is very important to measure power consumption and temperature of IT equipment. In this paper, we propose an energy consumption measurement with built-in sensors on a server and a UPS. Our proposal does not need additional measurement instruments and makes it easy to record the measurement values continuously and visualize them. To verify our proposal, some experiments of energy consumption measurement with hardware monitors have been made. As a result, measurement errors have not been practical problem and the effectiveness of this method has been confirmed.

Keywords: built-in sensor, energy saving, power consumption measurement, temperature measurement

1. はじめに

日本は必要とするエネルギー資源を自国内でまかなうことができず, その多くを海外からの輸入にたよっている. 1970年代には2度のオイルショックを経験し, これをふまえて, 1979年には, エネルギーの使用の合理化に関する法律, いわゆる省エネ法が施行された[1]. これにより, 幅広い産業分野において, エネルギー消費の削減が図られた.

また, 近年では, 持続可能な社会の実現, あるいは温室効果ガス排出量といった環境負荷の低減など, 環境問題に対する意識が高まっている. 2001年には, 国等による環境物品等の調達に関する法律, いわゆるグリーン購入法[2]が施行された. 国や地方自治体, 大学や研究機関などの独立行政法人における物品の調達は, この法律の考えに沿ったものとなった. 情報機器においても, 省エネラベリング制度, トップランナー方式や国際エネルギースタープログラムの導入[3]など, 官民をあげての取り組みが実施されている.

さらに, 2011年には, 発電所の稼働停止などがあり, エネルギー需給がひっ迫している. これらの要因により, 省エネルギーに対する関心が非常に高くなってきている.

このように, 省エネルギーへの社会的要請と関心が高ま

¹ 地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所業務推進課 Duties Promotion Section, Technology Research Institute of OSAKA Prefecture, Izumi, Osaka 594-1157, Japan

² 地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所製品信頼性科 Product Reliability and Human Life Science Section, Technology Research Institute of OSAKA Prefecture, Izumi, Osaka 594-1157, Japan

a) ishijima@tri-osaka.jp

るなか、大学などのサーバ室やPC演習室、あるいはネットワーク機器の省エネルギー化についての研究が報告されるようになってきた [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10].

情報機器の省エネルギー化を図ることは、それらが排出する熱エネルギーの低減にもつながり、結果として、空調機器の省エネルギー化も期待できる。省エネルギー化を実現するには、まず、情報機器やそれらを冷却する空調機器の消費エネルギーに関する情報を収集し、可視化することが重要である。すなわち消費電力や温度の計測が必要となってくる。

先行研究では、エネルギー消費を抑える手段として、計画的に情報機器の運転を停止する方式 [5]、サーバ室で消費されるエネルギーの多くを占める空調の運用を改善する方式 [7] などが提案されている。また、それらの効果を評価するために、消費電力量や電流を計測 [4], [6], [8], [9], [10] したり、空調の改善効果を評価するために、温度分布を測定したり [4], [7], [10] するといったことがなされている。これらの先行研究では、温度計や電力計、電流計など多数の測定器を用いる方法がとられてきた。

しかしながら、昨今の情報機器には、障害発生の検知や予測など、その機器の状態を把握するために、多数のセンサが内蔵されることが一般的となってきた。そこで、本論文では、これらの情報機器に内蔵されたセンサを用いて、消費エネルギーに関連する値を計測する方式を提案する。

提案方式によって最終的に得られる値は、電力や温度といった物理量であり、[W] や [°C] といった単位で表される。そして、これらの値はある一定の誤差範囲の中で信頼でき、物理量の計測として問題がないこともあわせて示す。

提案方式を用いることにより、サーバ室などに多数のセンサを配置することは不要となる。また、電力計測においては、センサの着脱時に計測対象の電源を切る必要があるが、内蔵センサを用いれば電源を切る必要がなくなる。このことは情報機器の継続的運用にとって非常に有用である。さらに、センサから得られる計測値の取り込みや記録、可視化が非常に容易になる。

本論文では、まず2章において、これまで積極的に活用されることがなかった、情報機器に内蔵されているセンサと、それらの情報を取得する方法を紹介する。次に3章において、情報機器の消費電力を計測する際に用いるべき測定器とはどのようなものであるかを説明する。4章では、提案方式で用いるUPSのセンサが3章で説明した電力測定器としての要件を満たしていることを実験によって明らかにする。そして、提案方式によるサーバ機器の消費電力と温度の測定結果を報告する。あわせて、誤差の評価を行い、提案方式が先行研究で用いられていた計測器を代替しうることを示す。

2. 情報機器の内蔵センサと計測値の取得

本章では、情報機器に内蔵されている各種センサなら

びに、そのセンサからデータを取得する方法を紹介する。2.1節と2.2節では、本論文で評価したセンサについて、2.3節ではそれ以外のセンサについて述べる。2.4節ではセンサからのデータを取得する方法について述べる。以上により、これらのセンサ類を活用し、新たに計測機器を導入することなく、情報機器の消費エネルギーに関するデータを取得、ならびに蓄積する方法を説明する。

2.1 サーバのセンサによるハードウェアモニタ

PCやサーバでは、2000年前後に発表されたモデルから、ハードウェアモニタ機能が装備されることが一般的である [11]。このハードウェアモニタ機能として、

- CPUに内蔵されたダイオードを使ったCPU温度
- マザーボード上のセンサを使った周囲温度
- ターリングファンの回転数
- CPUやバス、周辺機器に供給する電圧
- CPUやバスなどの動作速度を決めるクロック周波数を計測する機能がある。

残念ながら、以上の項目では、消費電流や消費電力を計測することは不可能である。しかし、最近発表されたサーバでは、消費電力をモニタできるものも存在する [12]。ただし、このモニタ機能で得られた値がどの程度信頼できるものなのかは、そのサーバの仕様などではよく分からない。3章や4章のような実験を行い、その値を検証する必要がある。

ハードウェアモニタ機能を利用するためには、モニタ機能を実装しているハードウェアやOSに応じてソフトウェアが用意されている。代表的なものとして、lm_sensors [13] や mbmon [14] といったソフトウェアがある。

最近では、このハードウェアモニタ機能はプラットフォームに依存しない形で実装されるようになってきた。現在よく使われているものにIPMI (Intelligent Platform Management Interface) がある [15]。また、各種OSでも、このIPMIに対応したソフトウェアが用意されており、それを使うことによって、各種センサの情報を取り出すことができる。代表的な実装として ipmitool [16] があり、「ipmitool sdr」とコマンドラインから入力することによってセンサデータのレポジトリ情報を取得できる。図1に、PCサーバ (HP ML115G5) でのセンサ情報の一部を示す。

CPU Fan	2035.00 RPM	ok
Rear Fan	2736.73 RPM	ok
CPU Diode	36.50 degrees C	ok
Front Ambient	27 degrees C	ok
System 12V	11.93 Volts	ok
System 5V	5.12 Volts	ok

図1 ipmitoolの出力例 (抜粋)

Fig. 1 Partial example: output of ipmitool.

MODEL	: APC CS 500
STATUS	: ONLINE
LINEV	: 102.0 Volts
LOADPCT	: 27.0 Percent Load Capacity
ITEMP	: 29.2 C Internal
LINEFREQ	: 59.0 Hz
NOMPOWER	: 300 Watts

図 2 apcaccess の出力例 (抜粋)

Fig. 2 Partial example: output of apcaccess.

2.2 UPS 内蔵センサによるモニタリング

情報機器などを停電から保護するための無停電電源装置 (UPS: Uninterruptible Power Supply) にも、電圧や電流をモニタするセンサが内蔵されている。

UPS では、入力電圧の超過、あるいは低下 (停電を含む) によって、接続した機器への供給元電源を商用電源入力からバッテリーに切り替えることが可能となっている。また、UPS に接続した負荷が UPS の電力供給能力を超えていないかどうかを判断し、バッテリー動作時には残り動作可能時間を予測する機能が内蔵されている。

これらの機能を実現しているのは、UPS に内蔵された電圧センサや電流センサである。センサから得られた情報は、停電時に自動的にシャットダウンするためのユーティリティソフトウェアを使うことによって、サーバに取り込むことができる。代表的なものに、APC (シュナイダーエレクトリック) 社の UPS 向けに開発された apcupsd [17] に付属する apcaccess がある。このようなソフトウェアを使うと、

- UPS に供給される商用電源の電圧と周波数
- UPS が負荷に供給している電力 (負荷率)
- UPS の内部温度

などを把握できる。UPS から負荷への供給電力は、最大供給能力のパーセンテージで示される。図 2 に、apcaccess コマンドの出力結果の一部を示す。

2.3 その他のセンサ

本論文では、利用ならびに評価しなかったが、以下のようなモニタリング機能も用意されている。

ハードディスクには、その障害の早期発見や故障を予測するために、SMART (Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology) というモニタリング機能が用意されている [18], [19], [20]。これは SCSI や ATA の仕様で規定されている。

SMART は、読み取りエラーの発生率や、出荷後の通算動作時間などを観測するために用いられることが多い。モニタリング項目には温度も含まれるため、温度センサとしての利用が期待できる。このモニタリング値を読み出すソフトウェアの代表的な実装に、smartmontools [21] に付属する smartctl がある。この smartctl コマンドの出力の一

Device Model: Hitachi HDS721032CLA362		
Serial Number: JPF440HJ12LN5T		
User Capacity: 320,072,933,376 bytes		
ATA Standard is: ATA-8-ACS revision 4		
ID#	ATTRIBUTE_NAME	RAW_VALUE
1	Raw_Read_Error_Rate	0
5	Reallocated_Sector_Ct	0
9	Power_On_Hours	11273
194	Temperature_Celsius	43

図 3 smartctl の出力例 (抜粋)

Fig. 3 Partial example: output of smartctl.

ID Sensor (Units)	Reading
1 Fan: Fan 1 (Rpm)	5237
2 Fan: Fan 2 (Rpm)	5157
7 Voltage: 3.3V (Volts)	3.369
9 Voltage: 12V (Volts)	11.938
10 Temp: Ambient (Degrees C)	26
11 Temp: Mid Internal (Degrees C)	40
12 Temp: Bk Internal (Degrees C)	32

図 4 スイッチの自己診断出力例 (抜粋)

Fig. 4 Partial example: output of self-diagnosis of a switch.

部を図 3 に示す。

最近のネットワークスイッチにも、ハードウェア診断機能の 1 つとして、モニタリング機能が用意されているものがある。取得できる情報は、電圧、温度、ファンの状態 (回転数あるいは動作してるか否か) などである。図 4 に、アライドテレシス社のレイヤ 3 スイッチである、AT-x900-12XT/S のシリアルコンソールで取得した情報の一部を示す。

2.4 モニタリングデータの継続的取得

ここまで、情報機器に内蔵されたセンサを用いたハードウェアモニタ機能を使って、エネルギー消費に関するデータを取得する方法を紹介した。実際には、定期的にポーリングしてログファイルに記録するといった処理が必要になる。これらは、定期的にプログラムを実行する仕組みである cron を使い、シェルスクリプトなどで処理を記述することで可能となる。データを保存し続ける必要のない場合は、文献 [10] に書かれているとおり、MRTG や RRDtool を用いると、一定期間のデータ管理や可視化が容易に実現できる。モニタリングの対象がスイッチやルータなどのネットワーク機器の場合、SNMP (Simple Network Management Protocol) などが必要な情報を取得できれば、実装はより簡単になるだろう。

現在のところ、IPMI などで行われる情報はハードウェアモニタ機能の実装に大きく依存している。このため、監視対象ごとにデータを処理するスクリプトを作りかえる必要がある。

3. 情報機器の消費電力と計測に必要な機器

ある機器（負荷）が消費する電力は、それに印加している電源電圧と流れる電流の積として計算することができる [22]。しかし、電子部品を多用している情報機器においては、その消費電力は、電圧計と電流計で得られた計測値の単純な積とは一致しない [23]。本章では、情報機器の電力計測にはひずみ波形に対応した電力計が必要であることを説明する。そして、実際の情報機器に流れる電流がひずみ波であることを示す。さらに、提案方式でセンサとして用いる UPS に接続する負荷に関する注意点もあわせて紹介する。

3.1 交流回路における電力の計算と電力計の必要性

周期が T である交流回路において、時刻 t における印加電圧と負荷電流の瞬時値がそれぞれ $v(t)$, $i(t)$ であれば、電力 P は、瞬時電力 $v(t) \cdot i(t)$ を周期 T において平均した値、

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (1)$$

である。

この電力 P を計測するためには、電力計が必要であり、電圧計や電流計を用いて、個別に電圧と電流を測定するだけでは不十分である。その理由は以下のとおりである。

電圧計で示される測定値 V は、瞬時値の 2 乗平均値（実効値）

$$V = \sqrt{\int_0^T \frac{1}{T} (v(t))^2 dt} \quad (2)$$

である。電流 I も同様である。通常、電力 P は電圧ならびに電流の実効値の積 $V \cdot I$ 以下の値となり、力率 PF を用いて、

$$P = PF \times V \cdot I \quad (3)$$

で表される。力率は、電圧 $v(t)$ と電流 $i(t)$ の波形の一致度を示す値であり、波形の相似性が高く、時間のずれ（位相差）が小さければ 1 に近い値をとる。力率は通常の負荷では 0 から 1 の値をとる。力率は機器ごとに異なるだけでなく、同一の機器であっても消費電力によって変化する。

電力計を用いずに、電圧計と電流計による測定値のみを行うと、力率を知ることはできない。すなわち、電力 P を測定するためには、電圧計や電流計による測定では不十分であり、瞬時電力の時間平均を測定できる電力計が必要となる。

また、電圧計や電流計には、2 乗平均値ではなく、絶対値の平均値を計測し、それが正弦波の場合に実効値と一致するように波形率（Form Factor） FF を乗じた値を表示するものがある。この平均値を計測する計測器を平均値整流型と呼び、その表示値 I' は

$$I' = FF \times \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt \quad (4)$$

である。

情報機器に代表される電子機器の場合、負荷に流れる電流は正弦波とはならず、印加電圧が極大値あるいは極小値となる前後に電流が集中するひずみ波形となることが多い。正弦波や方形波を除くと $I' \leq I$ となることが知られており、平均値整流型計器を用いると、機器の電力を低く見積もってしまう可能性がある。

さらに、サーバールームなど、多数の情報機器が集中する場所では、配電システムの抵抗成分による電圧降下の影響により、電圧が低下する。電流は電圧の極大値、極小値前後に集中するため、この部分で電圧降下が発生し、電圧波形は正弦波ではなくなり台形波に近づく。この電圧の低下と波形ひずみは電圧測定の実効値誤差要因となる。

これらの理由から、情報機器の電力計測には、式 (1) で示される値を表示できる測定器を用いるべきである。また、使用する機器は、JIS C 1102, JIS Z 8402 などの規格に基づく測定精度や誤差範囲が示されているものを使用することが望ましい。

別の表現をするなら、要求される測定精度に応じて、測定方法や計測器を選定することが求められる。たとえば、省エネルギー対策の実施前後の電力を比較するのであれば、その対策によって削減できる消費電力値よりも、誤差が十分小さい測定方法と測定器を選択しなければならない。測定精度や誤差範囲が示されていない測定器を、検証しないまま用いることは、得られた結果の信頼性を損ねることになる。

電力の計測では、一般的には誤差を 2.5% 以下とすることが望ましいとされている。提案方式がどの程度の誤差範囲に収まっているのかは 4.1 節で詳しく説明する。

3.2 ノート PC 用 AC アダプタの消費電力と電流波形

電流波形が正弦波ではないひずみ波となる負荷の電力を調べるため、表 1 に示す機器を用いて、電力と波形を計測した。

電力の測定には、デジタルパワーメータだけではなく、手軽に消費電力を測定できる簡易電力測定器、いわゆる

表 1 実験に使用した機器

Table 1 Instruments used for experiments.

項目	形式・仕様
測定対象	Panasonic AC アダプタ CF-AA1527C1 定格出力 15.1V 2.8A
電力計	横河電機デジタルパワーメータ YEW2535 表示確度 0.4%rdg+0.1% of range
ワットメータ	サンワサプライ TAP-TST8 測定精度 2%±1W
オシロスコープ	Tektronix DPO4034

るワットメータも併用した。これにより、ワットメータの測定値が信頼に値するかどうかを判定できる。

測定の手順は以下のとおりである。

まず、デジタルパワーメータを商用電源に接続する。そしてデジタルパワーメータの計測用コンセントにワットメータを接続する。ワットメータ自身の消費電力が十分低く、誤差がなければ、デジタルパワーメータとワットメータの表示は等しくなる。

次にワットメータと測定対象負荷である AC アダプタの間に図 5 に示す回路を接続し、印加される電圧と電流波形をオシロスコープで観測した。抵抗 R_1 と R_2 は、それぞれ $10\text{k}\Omega$ と $1\text{k}\Omega$ を用いた分圧回路であり、 R_2 の両端電圧をオシロスコープのチャンネル 1 に入力した。抵抗 R_3 は 1Ω の抵抗であり、この両端電圧をチャンネル 2 に入力した。 R_3 の両端電圧は、AC アダプタの消費電流に相当する。オシロスコープの電源は、絶縁トランスを介して商用電源に接続し、漏電や地絡などの事故が起こらないようにした。

図 5 には、コンセントの極性 (N と L) を表示している。このうち N は変圧器の二次側で接地されており、通常は電圧がかかっていない。オシロスコープへの接続点を N 側にすることにより、感電事故を回避することができる。

AC アダプタには、負荷としてノートパソコンではなく、 33Ω の抵抗を 0~4 個並列接続した。現実の負荷であるノートパソコンではなく、抵抗を用いたのは、計測値の揺らぎを減らすためである。AC アダプタの出力は直流なので、負荷はノートパソコンであっても抵抗であっても本質的な違いはない。

表 2 に、デジタルパワーメータで計測した電圧と電流の実効値、皮相電力、電力、力率、そしてワットメータで計測した電力を示す。AC アダプタを接続していないとき

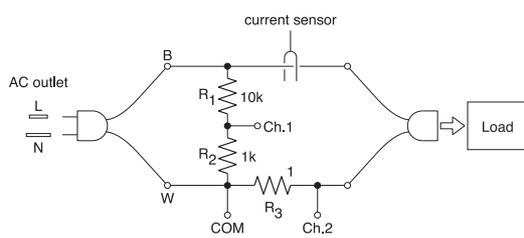


図 5 波形測定回路

Fig. 5 Circuit for waveform measurement.

の計測値は、ワットメータと波形観測用回路の待機電力を示している。AC アダプタを接続し、負荷抵抗を接続していない無負荷状態での値は、AC アダプタの待機電力に対応している。負荷抵抗を増やしていくと、AC アダプタの消費電力は負荷にほぼ比例して増加する。

この結果から、測定中に電圧が変動していることが分かる。電圧が変動しているということは、電流測定だけでは、電力測定に電圧の変動成分が誤差として加算されることを意味している。

力率は 0.6 程度であるが一定値ではない。軽負荷時には 0.55 まで下がっており、このことは、力率を一定値と仮定することが現実的ではないことを示している。

図 6 に負荷抵抗が 4 本のときの AC アダプタの電圧と電流波形を示す。オシロスコープに表示されている波形のうち、上側が電圧波形、下側が電流波形である。電圧波形はほぼ正弦波であるが、前節で述べたとおり、電流波形は大きくひずんでいることが分かる。このことは、表 2 で力率が低いことと矛盾しない。

そして、今回の計測で使用したワットメータの計測値はデジタルパワーメータでの計測値と大きな差がないことが分かる。ワットメータはその仕様で誤差範囲が示されており、表 2 の測定結果は、誤差がその範囲に収まっていることを示している。電力測定には、このような誤差範囲が明記されている測定器を用いることが望ましい。



図 6 AC アダプタの電圧・電流波形

Fig. 6 Voltage and current waveforms of input to an AC adapter.

表 2 ノート PC 用 AC アダプタの負荷特性

Table 2 Load characteristics of an AC adapter for a laptop PC.

負荷個数	電圧 (V)	電流 (A)	皮相電力 (VA)	電力 (W)	力率	ワットメータの表示 (W)
AC アダプタなし	102.3	0.024	2.5	0.1	0.067	0.0
0 (無負荷)	102.1	0.038	3.9	1.6	0.419	1.5
$33\Omega \times 1$	101.9	0.167	16.9	9.4	0.556	9.2
$33\Omega \times 2$	101.9	0.285	28.8	16.8	0.584	16.7
$33\Omega \times 3$	101.8	0.398	40.4	24.5	0.606	24.2
$33\Omega \times 4$	101.4	0.507	51.8	32.4	0.595	31.9

表 3 PFC 電源の負荷特性

Table 3 Load characteristics of a PFC power supply.

負荷抵抗	抵抗値	電圧 (V)	電流 (A)	皮相電力 (VA)	電力 (W)	力率	ワットメータの表示 (W)
0	∞	101.3	0.153	15.5	9.7	0.625	9.5
$33\ \Omega \times 2$	16.5	101.3	0.254	25.7	21.7	0.844	21.6
$33\ \Omega \times 4$	8.25	101.1	0.341	34.4	31.4	0.911	31.2
$15\ \Omega \times 4$	3.75	102.4	0.546	56.0	54.4	0.973	54.2
$33\ \Omega \times 2 + 15\ \Omega \times 4$	3.06	102.5	0.643	66.1	63.8	0.967	63.7
$33\ \Omega \times 4 + 15\ \Omega \times 4$	2.58	102.4	0.749	76.5	73.3	0.957	73.1

3.3 力率改善された電源の消費電力と電流波形

前節で示したノート PC 用の AC アダプタは、その電流波形が大きくひずんでいたが、これは印加した 60 Hz の正弦波の高調波を多く含んでいるためである。一般的なスイッチング電源の入力電流はこのような傾向である。

電流に高調波が増えると、それは電源系統にノイズとして漏洩する。このノイズが多いと電源系統のトランスなどに悪影響を与える恐れがあり、また、他の電子機器に誤動作などの悪影響を引き起こす可能性がある。

そこで、最近では、スイッチング電源の入力電流ができるだけ正弦波に近くなる、すなわち、高調波成分が少なくなるような回路構成をとることが増えてきた。このようなスイッチング電源では、入力電流の波形が電圧波形に近くなるため、結果として力率が改善され、1 に近くなる。このような回路構成をスイッチング電源における力率改善 (PFC: Power Factor Correction) と呼ぶ [24]。

力率改善はノイズの低減に役立つだけでなく、電源系統での損失低減にも役立つ。消費電力が同一のとき、力率が低い負荷では、回路に流れる電流がより大きくなる。電源系統で発生する抵抗性の損失は電流の 2 乗に比例して大きくなるため、力率の高い、すなわち、余分な電流を必要としない負荷のほうが、損失は小さくなる。

この力率改善回路を用いた ATX 電源の 12 V 出力に負荷抵抗を接続し、表 2 同様に消費電力や力率などを測定した。その結果を表 3 に示す。使用した ATX 電源は KEIAN の KT-F500-12A (1XA) である。

表 3 から、この電源は消費電力がおおよそ 30 W を超えると力率が 0.9 以上となっていることが分かる。力率が改善され、電流波形が正弦波に近づいていることを確認するため、波形を観測した。結果を図 7 に示す。電流波形はひずんではいるものの、正弦波に近づいている。前節の AC アダプタ同様に、力率は負荷によって変動することが分かる。このため、力率を一定値と仮定して電流測定だけにより電力を換算することはやはり誤差の発生要因となる。力率が改善された電源においても、力率の変動による誤差が問題となるのであれば、電力の測定には電力計を用いるべきである。

提案方式において得られる値は、力率の変動が問題とならない電力計測によるものである。このことは 4.1 節にお

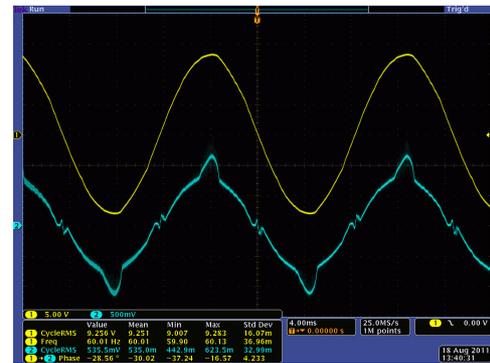


図 7 PFC 電源の電圧・電流波形

Fig. 7 Voltage and current waveforms of input to a PFC power supply.

ける実験で明らかにする。

なお、力率改善回路を搭載したスイッチング電源は、入力電圧が正弦波であることを仮定して設計されていることが多い。このため、バッテリー駆動時に、インバータ出力が正弦波ではない UPS で用いると、UPS が過負荷の警告を出したり、UPS あるいは電源が故障したりすることもある。

入力電圧が正弦波であることを仮定しているものは、このようなスイッチング電源だけではない。多くの電球型 LED ランプやインバータ方式の蛍光灯なども正弦波でない電源を接続すると故障の可能性がある。このような照明器具には「調光器非対応」と書かれている。多くの調光器はサイリスタやトライアックなどの半導体素子を用いて、位相制御やスイッチングを行うため、出力が正弦波ではなくなる。

このように、電源が正弦波であることを仮定している電子機器には、正弦波出力型の UPS を用いることが重要である。今後のパワーエレクトロニクス素子や回路構成の進歩により、これらの問題は解消される可能性がある。事実、一部の電球型 LED ランプやインバータ蛍光灯は調光器に対応している。

4. 提案方式による電力と温度の計測

前章では、負荷電流がひずみ波となる場合の電力計測においては、電力計が必要であることを示した。そして実際の情報機器に流れる電流がひずみ波であることを紹介した。

表 4 白熱電球を負荷としたときの UPS の電力計測値

Table 4 Power supply measurement of the UPS with incandescent lamps as loads.

負荷数	YEW2535				CS500		誤差		
	電圧 (V)	電流 (A)	力率	電力 (W)	負荷率 (%)	電力 (W)	電力 (W)	相対値 (%)	定格比 (%)
0	102.4	0.00	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	101.9	0.59	1.00	60.6	19.0	57.0	-3.6	-5.9	-1.2
2	101.4	1.15	1.00	116.7	38.0	114.0	-2.7	-2.3	-0.9
3	101.1	1.72	1.00	172.8	57.0	171.0	-1.8	-1.0	-0.6
4	100.6	2.27	1.00	228.9	76.0	228.0	-0.9	-0.4	-0.3
5	100.3	2.82	1.00	283.2	95.0	285.0	1.8	0.6	0.6

表 5 調光器により負荷を変化させたときの UPS の電力計測値

Table 5 Power supply measurement of the UPS with varying a PF by a triac light dimmer.

負荷数	YEW2535				CS500		誤差		
	電圧 (V)	電流 (A)	力率	電力 (W)	負荷率 (%)	電力 (W)	電力 (W)	相対値 (%)	定格比 (%)
0 + (2)	101.7	0.60	0.33	19.8	11.0	33.0	13.2	66.7	4.4
0 + (2)	102.6	0.77	0.51	40.0	13.0	39.0	-1.0	-2.5	-0.3
0 + (2)	102.3	0.89	0.66	59.9	21.0	63.0	3.1	5.2	1.0
0 + (2)	102.4	0.99	0.80	80.5	25.0	75.0	-5.5	-6.8	-1.8
1 + (4)	101.3	1.17	0.67	79.4	27.0	81.0	1.6	2.0	0.5
1 + (4)	101.1	1.72	0.69	120.6	42.0	126.0	5.4	4.5	1.8
1 + (4)	100.9	1.91	0.73	140.6	53.0	159.0	18.4	13.1	6.1
1 + (4)	100.6	2.22	0.81	180.8	60.0	180.0	-0.8	-0.4	-0.3
1 + (4)	100.5	2.35	0.85	200.0	65.0	195.0	-5.0	-2.5	-1.7
1 + (4)	100.2	2.59	0.92	239.7	80.0	240.0	0.3	0.1	0.1
1 + (4)	100.4	2.71	0.96	261.4	91.0	273.0	11.6	4.4	3.9
1 + (4)	100.3	2.81	1.00	281.4	94.0	282.0	0.6	0.2	0.2

本章では、提案方式によって、ある誤差の範囲内で電力を計測できることを示すため、UPS に接続した負荷の消費電力と UPS が示す負荷率の関係について述べる。そして、その結果により、UPS を用いて実際の情報機器の電力測定結果を報告する。また、内蔵温度センサを用いた温度計測の結果についても述べる。

4.1 UPS による電力の計測の評価

本節では、UPS に内蔵されたセンサが、電力計測に利用できることを検証する。3.1 節では、測定精度や誤差範囲が示されているものを使用することが望ましく、一般電力計測では誤差を 2.5% に収めることが望ましいと述べた。そこで、提案方式がどの程度の誤差を有するのかを評価する。

また、3.3 節では力率変動が誤差要因となる電流計測は望ましくなく、電力計測が必要であると述べた。提案方式が電力計測として問題ないことを検証し、UPS (APC CS500) が示す負荷率に定格出力値を乗じた値が、接続した負荷の消費電力と一致することを確かめるため、UPS の負荷側にデジタルパワーメータ (YEW2535) と白熱電球を接続して測定実験を行った。

まず、UPS の負荷として 60 形白熱電球 (Panasonic 製 シリカ電球) を 0~5 個接続し、そのときの消費電力と負

荷率を測定した。結果を表 4 に示す。表には左から順に、負荷である白熱電球の個数、デジタルパワーメータで測定した電圧、電流、力率、電力、そして、UPS が示す負荷率、負荷率から求めた消費電力、デジタルパワーメータとの誤差、UPS の定格出力に対する誤差の比率を示す。

測定条件は負荷の数により 5 通りである。これは JIS C 1102-9 に定める電力計の校正方法に準じた条件設定である。表 4 の結果から、誤差は 3.6 W 以下であり、その 2 乗平均値は 2.1 W である。UPS の定格電力 (300 W) に対する誤差の 2 乗平均値の比は 0.71% である。JIS C 1211 によれば、一般型電力量計の誤差は力率が 1.0 のときには 2.0% 以下と規定されており、今回の場合は十分その範囲内となる。

UPS から得られる負荷率は 0.1% 単位であるが、実際には小数部は使用されておらず、つねに 0 である。つまり、負荷率の分解能は 1% であり、電力に換算すると分解能は 3 W 単位となる。これは、±3 W の誤差は避けられないことを意味している。

次に、力率を変動させた場合であっても電力が精度良く測定できることを検証するため、位相制御型の調光器 (大洋電機産業製ライトコントローラ PC-31) を用いて電力を変化させ測定を行った。結果を表 5 に示す。白熱電球の個

数のうち、括弧書きで示したものは調光器を介して接続したものの数である。

この結果から、負荷電流がひずみ波形であっても、誤差の2乗平均値が7.9W以下であることが確認できた。定格電力比では2.6%である。これもJIS C 1211によれば、力率が0.5までの場合、誤差は2.5%以下であることが求められているが、今回の実験結果は、その範囲から大きく逸脱していないことを示している。なお、消費電力が140.6Wのときの誤差が18.4Wと大きくなっているが、これはUPSが調光器のように非常にひずんだ電流となる負荷を想定していないためと考えられる。本来、このUPSには相制御型の負荷を接続するべきではない。

本節の実験では、UPSの内蔵センサによる計測値に含まれる誤差を評価するために、UPSと負荷の間にデジタルパワーメータを接続した。このように、一般的に電力計測を専用の測定器で実施する際には、計測器の接続のために負荷を電源から切り離す必要がある。しかし、提案方式ではUPS単体で電力を計測することが可能となり、負荷の電源を一時的に切る必要はない。これは、情報機器の継続的な運用という観点から非常に有用である。

4.2 サーバの消費電力の計測

図8に2011年3月のUPS (APC CS500) の負荷率を示す。この図は2.4節で説明した、MRTGで記録したログから、2時間ごとの負荷率の平均値を取り出して表示している。具体的には図2の「LOADPCT」で示される値である。このUPSには、前述のPCサーバ (ML115G5) ともう1台のPCサーバ (M/B: AOpen MX3S-T)、そして、ルータやスイッチを接続している。

3月12日に負荷率が減少しているが、これは、この日に1台のPCサーバ (MX3S-T) をシャットダウンしたためである。負荷率はおよそ59%から38%に減少した。これは停止したPCサーバの負荷率がおよそ21%であることを示している。このUPSの定格出力は300Wなので、停止したPCサーバ (MX3S-T) の消費電力は約63Wであると計算できる。

このように、UPSの負荷率を計測することにより、そのUPSに接続した機器の消費電力の変化を把握することがで

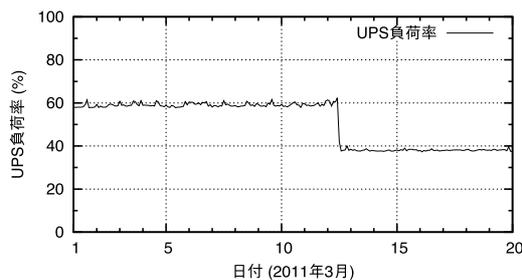


図8 UPS 負荷率の変化
Fig. 8 Variations of a load factor of the UPS.

きる。

また、UPSにPCサーバ (ML115G5) のみを接続した場合、負荷率は28%前後であった。このことは、PCサーバ (ML115G5) の消費電力は約84Wであることを示している。PCサーバ以外のルータやスイッチの消費電力は約30Wと計算できる。

本論文では、1種類のUPSによる結果しか示すことができなかった。提案方式の信頼性、信用性を高めるためには、別メーカーを含めた複数のUPSで同様の測定を行う必要がある。また、同一機種であっても、個体差による測定結果のばらつきがあることも予想できる。UPSのサンプルを増やして検証を行うことは今後の課題の1つである。

前節で行ったUPSの評価には、校正用のデジタルパワーメータと力率を変化させることのできる負荷を用いた。評価のための測定は1日で終了した。今後、運用を継続することにより測定値や誤差の経年変化なども検証する予定である。

4.3 サーバの温度計測

図9に、IPMIを用いて計測した、2011年6月から2012年5月までのCPU温度と周囲温度を示す。これは、図1の「CPU Diode」および「Front Ambient Temperature」で示される値を、2.4節で説明したとおり、MRTGを使って保存し、そのログから1日の平均温度を1年分取り出して表示したものである。気象庁が公開している過去の観測記録データ [25] も外気温としてあわせて示す。

計測値は常時空調ではない部屋に設置したPCサーバ (ML115G5) での値である。CPU温度は周囲温度よりも約10度高い。周囲温度と外気温の間には相関関係がみられ、その差の年間平均は約3.8度である。春季、夏季、秋季、冬季の気温差はそれぞれ、4.6度、2.1度、3.2度、5.3度である。夏季のみ部屋の温度が上がりすぎないように空調を動かしているため、温度差は他の季節と比較して小さな値となっている。

周囲温度 (Front Ambient Temperature) は、気象観測データより高い値となっているが、これはサーバのケース内部と気象観測での条件の違いによるものと考えられる。

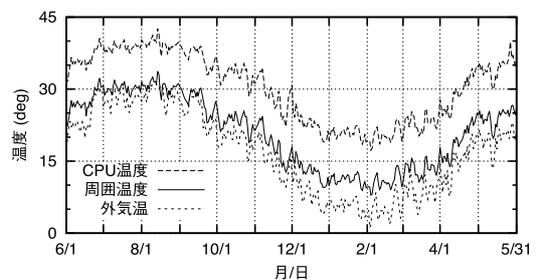


図9 IPMIによるCPU温度と周囲温度の計測値
Fig. 9 Measurement of the CPU temperature and its ambient temperature by IPMI.

また、PC サーバの温度センサは、機種によって設置場所が異なるため、違うサーバでは違った計測値となることが予想される。

4.4 温度測定における誤差

ハードウェアモニタ機能で用意されている温度計測においても、計測した値に誤差が含まれる。温度計測に用いているセンサ IC の型番が分かれば、その誤差はデータシートに明記されている。たとえば、文献 [11] で紹介されている、温度センサとしてよく用いられたナショナルセミコンダクタの LM79 であれば、その誤差は ± 3 度である [26]。その後の改良品である LM75A では、その誤差は ± 2 度である [27]。

JIS Z 8704 によれば、情報機器を含む一般的な工業向けの応用では、温度計測の誤差を ± 2 度程度に抑えることが望ましいとされている。現在、広く利用されているサーバ機器の内蔵センサは、この要求事項を満たしていると考えてよい。

ハードウェアモニタ機能で計測できる温度は、その温度センサが配置された場所の温度である。情報機器によって、温度センサの種類や配置場所は変わるので、同じ環境に配置した複数の情報機器で得られる温度は違った値となるだろう。

温度計測における誤差をより詳しく調べるためには、恒温槽のような任意の周囲温度環境を再現できる空間にサーバを配置して実験を行う必要がある。そのような環境において、サーバの外気温と内蔵センサによる計測値を比較するだけでなく、内蔵センサにも熱電対のような高精度の温度センサを取り付け、誤差を比較することが求められる。このような実験を行うことも、今後の課題の 1 つである。

これは、前節までに述べた電力測定における誤差の検証と同じである。十分な精度を持った温度計との比較や校正が終われば、ハードウェアモニタ機能を活用して、温度の時系列変化を把握することが可能となる。

4.5 サーバ室などでの応用

本論文では、1 台の UPS で計測した電力および 1 台のサーバで計測した温度の結果を報告しただけである。しかし、提案方式はサーバ室のように複数の UPS やサーバを設置した環境でも使用できる。

サーバ室内で複数の UPS での電力計測を行うことによって、UPS に接続されているサーバの総消費電力量を積算することが可能となる。また、複数のサーバで温度計測を行うことによって、温度分布を測定することが期待できる。提案方式は、UPS 自身やサーバを計測器として活用しているため、多数の計測機器は不要となり、結果として計測にかかるコストを大幅に削減することが可能である。

5. おわりに

本論文では、サーバや UPS などに内蔵されているセンサを活用することにより、消費電力や温度といった、エネルギーに関係するデータを取得する手法を提案した。これらのセンサを用いると、特別な計測機器は不要であり、かつ、データを継続的に蓄積し、可視化することも非常に容易である。おがかりな計測機器を導入する前に、これらのセンサを活用することは検討に値する。

次に、提案方式の評価を目的として、UPS による測定値にどの程度の誤差が生じるのかを評価した。専用の高精度な計測器には及ばないものの、内蔵センサによる電力計測は実用上問題のない性能であることが分かった。温度計測についても、内蔵センサの誤差をその仕様書から調査した。

いずれの内蔵センサも計測器としての使用を想定しているものではないため、専用の計測器のような高精度測定を行うことには無理がある。しかし、提案方式では追加でセンサを導入する必要はなく、電力計測にともなう一時的な電源断が不要となる。提案方式はコストの面においても、情報機器の継続的運用という観点からも有用である。

本論文では、電力計測については 1 台の UPS、温度計測については 1 台のサーバで得られた結果しか示すことができなかった。提案方式の信頼性、信用性を高めるためには、さまざまな情報機器を使って計測を行い、そこで得られる値を比較、検証する必要がある。これについては、大学など関連機関と協力し、サーバ室や PC 演習室など、大規模な環境での評価により解決したい。

より具体的には、複数の UPS とサーバに内蔵されているセンサを用いて、サーバ室全体の消費電力を積算することが考えられる。また、サーバごとの温度を計測することにより、室内の温度分布を計測し、熱だまりの検知やその解消を図ることもできるだろう。

さらに、得られた結果から、情報機器と空調などの周辺設備の省エネルギー化を図る方法を検討したい。

参考文献

- [1] エネルギーの使用の合理化に関する法律（昭和五十四年六月二十二日法律第四十九号）（オンライン），入手先 <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S54/S54HO049.html>（参照 2012-06-28）。
- [2] 環境省：グリーン購入法について（オンライン），入手先 <http://www.env.go.jp/policy/hozen/green/g-law/index.html>（参照 2012-06-28）。
- [3] 資源エネルギー庁：省エネルギー政策について・トップランナー制度（オンライン），入手先 <http://www.enecho.meti.go.jp/policy/saveenergy/save03.htm>（参照 2012-06-28）。
- [4] 小原泰弘，岡本忠男，宇多 仁：JAIST におけるサーバールーム構築：負荷と電力消費の関係，空調，インターネットと運用技術シンポジウム 2009（IOTS2009）論文集，pp.31-36（2009）。
- [5] 西垣 桂，齊藤明紀：省電力のための運休スケジュール参照機能を持つ機器監視システムの試作，情報処理学会

研究報告, Vol.2010-IOT-8, No.2, pp.1-6 (2010).

[6] 櫻田武嗣, 萩原洋一: 大学ネットワーク機器更新のための消費電力の簡易測定, 情報処理学会研究報告, Vol.2010-IOT-10, No.1, pp.1-5 (2010).

[7] 岡本昌幸, 小林俊満, 赤井光治, 久長 稔, 小河原加久治: サーバ室の空調に関する省エネルギーの取り組みについて, インターネットと運用技術シンポジウム 2010 (IOTS2010) 論文集, pp.25-29 (2010).

[8] 繁田浩功, 間下以大, 竹村治雄: 大学施設における消費電力の可視化—大阪大学 CMC グリーン IT プロジェクト, 情報処理学会研究報告, Vol.2011-IOT-12, No.19, pp.1-5 (2011).

[9] 櫻田武嗣, 萩原洋一, 新 善文: キャンパスネットワークの省電力化と管理省力化の取り組み, 情報処理学会研究報告, Vol.2011-IOT-12, No.29, pp.1-6 (2011).

[10] 西垣 桂, 辻井高浩, 砂原秀樹: 計算機室における省エネルギーのための消費電力可視化システム, 情報処理学会研究報告, Vol.2011-IOT-12, No.35, pp.1-6 (2011).

[11] 飯山健一: 440BX チップ・セットのマザー・ボード構成, トランジスタ技術, Vol.36, No.9, pp.178-182, CQ 出版 (1999).

[12] DELL 株式会社: Dell テックセンター Blog, ipmitool のサーバ消費電力の確認方法 (オンライン), 入手先 <http://ja.community.dell.com/techcenter/b/weblog/archive/2011/05.aspx> (参照 2012-06-28).

[13] Lm_sensors - Linux hardware monitoring (online), available from <http://www.lm-sensors.org/> (accessed 2012-06-28).

[14] 清水良文: Mother Board Monitor Program for X Window System (オンライン), 入手先 <http://www.nt.phys.kyushu-u.ac.jp/shimizu/download/xmbmon/READMEj-xmbmon205.html> (参照 2012-06-28).

[15] Intel: Intelligent Platform Management Interface (online), available from <http://www.intel.com/design/servers/ipmi/> (accessed 2012-06-28).

[16] Laurie, D.: IPMITool (online), available from <http://ipmitool.sourceforge.net/> (accessed 2012-06-28).

[17] Apcupsd a daemon for controlling APC UPSes (online), available from <http://www.apcupsd.com/> (accessed 2012-06-28).

[18] 岡村博司, 服部正勝: SMART 機能, ハード・ディスク装置の構造と応用, pp.182-183, CQ 出版 (2010).

[19] Small Form Factor Committee: Specification for Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology, SFF-8035i (1995).

[20] Small Form Factor Committee: Specification for S.M.A.R.T Application Guide for the ATA and SCSI interfaces, SFF-8055i (1996).

[21] smartmontools (online), available from <http://smartmontools.sourceforge.net/> (accessed 2012-06-28).

[22] 押本愛之助, 岡崎彰夫: 電気・電子工学概論, 第3章「交流回路」, pp.44-74, 森北出版 (1987).

[23] 佐藤守男: 特集最新・電源回路設計技術のすべて, トランジスタ技術スペシャル, No.28, CQ 出版 (1991).

[24] 森田浩一: 力率改善回路の目的と種類, グリーン・エレクトロニクス, No.3, pp.59-68, CQ 出版 (2010).

[25] 気象庁: 過去の気象データ検索 (オンライン), 入手先 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/> (参照 2012-06-28).

[26] National Semiconductor: LM79 - Microprocessor System Hardware Monitor (online), available from <http://www.national.com/pf/LM/LM79.html> (accessed 2012-06-28).

[27] National Semiconductor: LM75A - Digital Temperature Sensor and Thermal Watchdog with Two-Wire Interface (online), available from <http://www.national.com/pf/LM/LM75A.html> (accessed 2012-10-04).



石島 梯 (正会員)

1995年京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科博士後期課程修了。同年大阪府立産業技術総合研究所入所。電子工学ならびに情報通信分野での企業支援と研究業務に従事。研究所の独立行政法人化により、現在、地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所業務推進課主任研究員。日本物理学会、プラズマ・核融合学会、軽金属学会各会員。博士 (学術)。



平松 初珠 (正会員)

2001年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。2005年大阪府立産業技術総合研究所入所。企業支援および研究業務、所内ネットワークの設計管理運用に従事。研究所の独立行政法人化により、現在、地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所業務推進課主任研究員。工学修士。



山東 悠介

2003年筑波大学第三学群工学基礎学類卒業。2005年筑波大学大学院数理物質科学研究科中途退学。2007年大阪府立産業技術総合研究所入所。企業支援および研究業務、電気・電子機器の信頼性試験に従事。研究所の独立行政法人化により、現在、地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所製品信頼性科研究員。日本光学会会員。工学修士。



岩田 晋弥

2011年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士後期課程修了。同年東京大学生産技術研究所特任研究員。2012年地方独立行政法人大阪府立産業技術総合研究所入所。現在、同研究所製品信頼性科研究員。電気試験およ

びMEMS分野の研究・開発に従事。日本物理学会，電気学会，日本表面科学会各会員。博士（工学）。