

情報機器の消費エネルギー計測手法とその評価

石島 悌^{†1} 平松 初珠^{†1} 山東 悠介^{†1}

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り、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、本稿では、サーバや UPS に内蔵されたセンサなどを活用した簡易計測手法を紹介する。また、簡易計測と、トレーサビリティをとれる測定機器との相関や誤差を報告する。さらに、JIS などの規格による定格と実際の測定結果との関係について述べる。

Measurement of IT Equipment Energy Consumption and its Evaluation

DAI ISHIJIMA,^{†1} HATSUMI HIRAMATSU^{†1}
and YUSUKE SANDO^{†1}

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 equipments. Here, we will introduce a simple measurement method with built-in sensors in a server and a UPS. The correlation and the difference between the simple method and an accurate method with a traceable equipment is also reported. Finally, the relation between the rating of standards of JIS etc and the practical measurement results is described.

1. はじめに

日本はエネルギー資源に乏しい国である。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

^{†1} 大阪府立産業技術総合研究所情報電子部
Information and Electronics Department,
Technology Research Institute of OSAKA Prefecture

ルギー消費の削減が図られた。

また、近年では、環境意識の向上や温室効果ガス排出量の削減の気運が高まっている。これは、情報通信分野も例外ではない。インターネットと運用技術研究会においても、サーバ室や PC 演習室、あるいはネットワーク機器での省エネルギー化に関する発表が多数見られるようになってきた²⁾⁻⁹⁾。

情報機器の省エネルギー化については、それらの機器のエネルギー消費量を把握することが必要である。情報機器のエネルギー源は電気なので、消費電力を測定することとなる。また、サーバ室や PC 演習室全体においては、温度を評価することも必要となる。

そこで、本稿では、特別な計測機器を用意することなく、電力や温度を簡易計測する手法を紹介する。さらに、簡易計測の信頼性を確認するために、トレーサビリティを確保することのできる計測機器による測定値と、簡易計測で得られる値との相関ならびに誤差を検証する。

2. 情報機器に内蔵されたセンサによる簡易計測

PC やサーバ機器には、CPU 温度などをモニタするセンサが内蔵されている。また、サーバ機器などを停電から保護するための 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。本章では、これらのセンサを活用することにより、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する方法を紹介する。

2.1 サーバのセンサによる温度計測

最近の PC やサーバには、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
- クーリングファンの回転数
- CPU などに供給する電圧

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測定することは不可能である。しかし、CPU 温度は負荷に依存して上昇するため、消費エネルギーの多寡は推測できるだろう。

また、周囲温度は、温度センサがサーバ内のどこに配置されているかにより、機種によって差異が生じるが、サーバを配置した部屋のおおよその温度を把握することができる。もちろん、温度センサが吸気ファンの近傍にあれば、その値は、室温に近いものとなる。

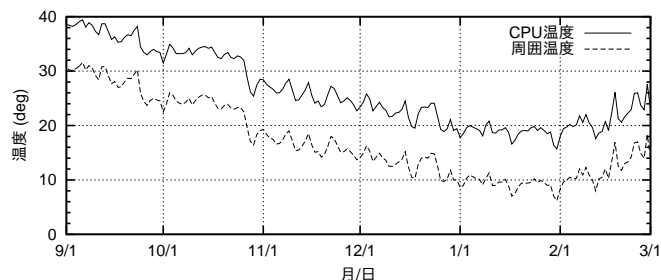


図 1 IPMI による CPU 温度と周囲温度の計測値

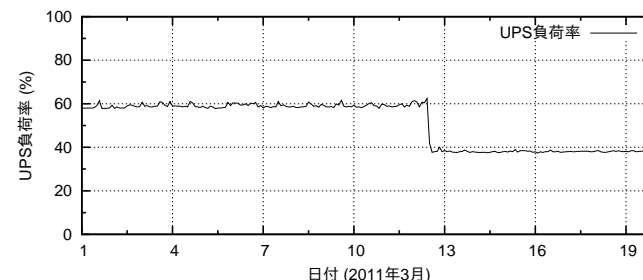


図 2 UPS 負荷率の変化

クーリングファン回転数は、CPU 温度や周囲温度により制御されていることが多く、こちらでも消費電力の多寡のおよその目安となりうる。

これらのハードウェアモニタ機構は、最近では OS 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¹⁰⁾。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 ipmitool¹¹⁾ 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バイスのレポジトリ情報を取得できる。

また、IPMI を実装していない PC やサーバにおいても、lm_sensors¹²⁾ や mbmon¹³⁾ といったソフトウェアを用いて、CPU 温度などの情報を取得することが可能である。

これらのハードウェアモニタ機構を用いると、サーバ室内のラックなどに同一機種を複数配置した場合、空調のばらつきや熱だまりの把握が可能となる。さらには、その計測結果から空調の最適化が期待できる。

図 1 に、IPMI を用いて計測した、2010 年 9 月から 2011 年 3 月までの CPU 温度と周囲温度 (IPMI では Front Ambient Temperature) を示す。これは、一般家屋における、常時空調ではない部屋に設置した HP ML115G5 での値である。周囲温度は、室温とほぼ一致している。

2.2 UPS による消費電力の把握

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、接続した機器への電源供給元を商用電源入力からバッテリーに切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 の電力供給能力を越えていないかどうかを判断する機能が内蔵さ

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 社の UPS 向けに開発された apcupsd¹⁴⁾ 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 (電流)
- 内蔵蓄電池の温度

などを把握できる。

UPS から負荷へ供給している量は、最大供給能力のパーセンテージで示される。この値が電流を示しているのか電力を示しているのかは、カタログなどからは判別できなかった。インバータの能力からすると、最大供給可能電流に対する現在の供給電流の割合と考えるのが妥当かもしれない。

図 2 に 2011 年 3 月の APC CS500 の負荷率を示す。この APC CS500 には、前述の ML115G5 ともう一台の PC サーバを接続している。12 日に負荷率が減少しているが、これは、この日に PC サーバをシャットダウンしたためである。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きる。

2.3 簡易計測値の可視化

ここまで述べてきたセンサから得られる値は、定期的にポーリングして計測し、可視化することができる。可視化には文献 9) で示されるように MRTG や RRDtool を用いるのが簡

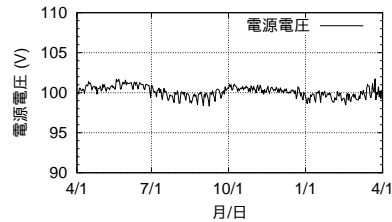


図 3 電源電圧の年較差

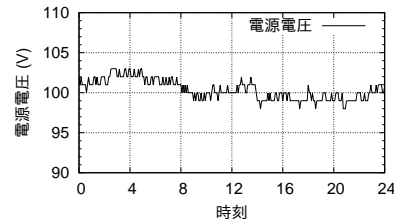


図 4 電源電圧の日較差

単である．なお，図 1 や図 2 は，MRTG でログに記録された値を用いた．

2.4 商用電源における日較差と年較差

日本国内の電力供給は，非常に品質が高く，落雷や災害などが起こらなければ，瞬時電圧低下や停電などの事故はほとんど発生しない．

ただし，消費される電力の変動により，供給される電圧は変動する．冷暖房による電力消費が大きくなる夏季と冬季には電圧が若干低下する．これを電圧の年較差と呼んでいる．また，一日のうちでも，時間帯によって電力消費量に違いが発生するため，やはり電圧に変動が発生する．これを電圧の日較差と呼んでいる．

この年較差と日較差は UPS の電圧モニタリングにより把握できる．2010 年度の電源電圧の変化を図 3 に，2011 年 4 月 4 日の変化を図 4 に示す．なお，計測している電圧は，一般家屋におけるコンセントでの値であり，契約種別は従量電灯 A（関西電力）である．

3. 消費電力における簡易計測の評価

既存研究での電力計測は，電力計を用いて正確に消費電力を測定しているもの⁷⁾，消費電力を反映していると考えられる電流を電流計を用いて計測しているものがある^{4),8)}．また，コンセントと情報機器の間に接続することにより，情報機器の消費電力を簡易計測できる機器を用いているものなど，さまざまな方式がある．本章では，電流測定と簡易電力測定器具の検証を行う．

3.1 交流回路における消費電力

交流回路において，負荷が消費する電力 P は，印加した電圧の瞬時値 $v(t)$ と流れる電流の瞬時値 $i(t)$ の積を積分した値，

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

で表される．ここで T は電圧の周期である．

電圧および電流が周波数 f （ただし $f = 1/T$ ）の正弦波であり，それらの実効値をそれぞれ V と I とし， V と I の位相差が ϕ とすると，電力 P は

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2} V \sin(2\pi ft) \cdot \sqrt{2} I \sin(2\pi ft + \phi) dt \quad (2)$$

と書くことができる．なお，実効値 V と瞬時値 $v(t)$ の関係は

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v(t))^2 dt} \quad (3)$$

である．

式 (2) は，積分項を計算すると，

$$P = VI \cos \phi \quad (4)$$

と表すことができる．ここで $\cos \phi$ は力率と呼ばれる¹⁵⁾．

つまり，電圧も電流も正弦波であり，かつ，その位相差が既知であるという仮定のもとでは，電流を測定すれば，それは電力を測定したことに変わらない．

しかし，内部では直流で動作している電子機器の電源に供給される電流 $i(t)$ は一般的には正弦波にはならない¹⁶⁾．このため，電力は式 (4) のような単純な形では表すことが不可能である．

さらに，交流電圧や交流電流を測定する計測器では，内部で直流に整流した値に正弦波の波形率を乗じた値を表示するものがある．そのような測定器で正弦波ではない電圧や電流を計測すると，表示される値は，上に書いた実効値である V や I とは異なったものとなる．

3.2 PC 用電源の波形と電力の測定

電流による簡易計測と，実際の消費電力との相関を検証するために，オシロスコープとデジタルパワーメータ，そして電流センサとデジタルマルチメータを用いて，電圧・電流波形と電力を測定した．測定対象はノートパソコン用の AC アダプタである．さらに，簡易電力測定器（ワットモニター⁸⁾）についても検証した．使用した機器の一覧を表 1 に示す．

3.2.1 電圧および電流波形の観測

コンセントと 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観測した．抵抗 R_1 と R_2 は，それぞれ 10k と 1k 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 1 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．

表 1 実験に使用した機器

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 2523
ワットモニタ	サンワサプライ TAP-TST8
マルチメータ	共立電気計器 デジタルマルチメータ 2000
マルチメータ	共立電気計器 デジタルマルチメータ 2012R (真の実効値表示)
オシロスコープ	Tektronix DPO4034

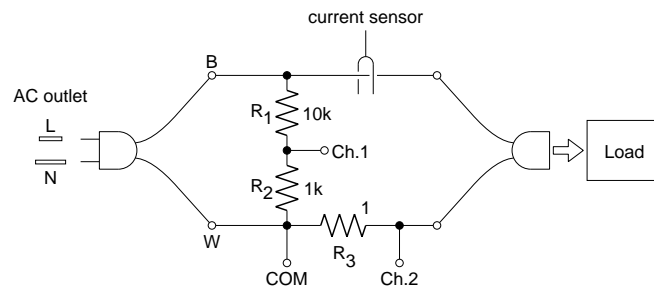


図 5 波形測定回路

AC アダプタには、負荷としてノートパソコンではなく、33 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。

図 6 に負荷抵抗を接続しない場合の波形を、図 7 に負荷抵抗として 33 を 4 本並列接続した場合の波形を示す。いずれの場合も、供給電圧はほぼ正弦波であるが、電流波形はパルス状であることがわかる。このことから、単に電流値を計測するだけでは、消費電力を精度よく求めるには不十分であることがわかる。

3.2.2 デジタルパワーメータによる電力測定

次にデジタルパワーメータを用いて、負荷抵抗の数を変化させた場合の AC アダプタの消費電流と消費電力を測定した。結果を表 2 に示す。

負荷を増やすと、消費電流と消費電力は増加し、負荷の数とはほぼ比例関係にあることがわかる。しかし、測定電圧と電流の積は電力より大きな値であり、電流測定だけでは、消費

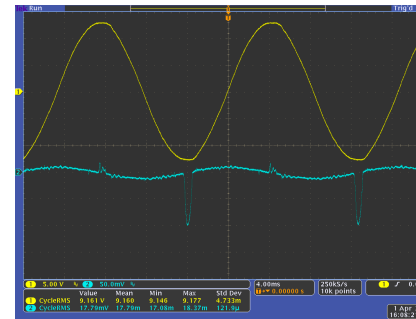


図 6 無負荷時の電圧・電流波形

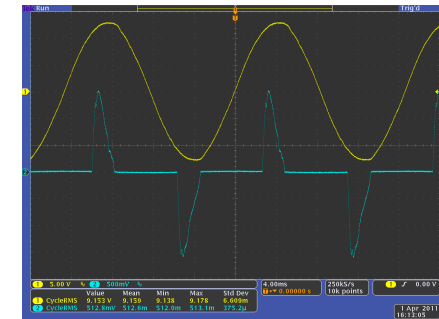


図 7 負荷抵抗を接続したときの電圧・電流波形

表 2 デジタルパワーメータでの計測値

負荷抵抗数	電圧 (V)	電流 (A)	電力 (W)	力率
0 (無負荷)	101.0	0.016	0.4	0.254
1	101.0	0.148	8.2	0.542
2	101.0	0.273	15.7	0.563
3	100.7	0.393	23.1	0.584
4	100.7	0.511	30.8	0.594

電力を正確に把握することはできない。

しかし、消費電流と消費電力は十分な相関があり、電流を測定する際の条件などを揃えておけば、電流測定だけでもおおよその消費電力は推測可能である。

3.2.3 ワットモニタとデジタルパワーメータの比較

次に、手軽に消費電力を測定することのできるワットモニタの精度を調べるために、デジタルパワーメータと AC アダプタの間にワットモニタを接続した。このときの測定値を表 3 に示す。

表 3 の結果から、デジタルパワーメータで得られる消費電力値とワットモニタの表示の誤差は非常に小さいことがわかる。ワットモニタを用いる場合は、測定対象の電源を落とし、コンセントから抜くといった作業が必要となるが、精度の高い測定が可能である。

3.2.4 実効値型計測器と平均値型計測器の比較

デジタルマルチメータなどの計測器では、正弦波ではない信号を計測したときに、真の実効値が表示されるものと、平均値に正弦波の波形率（平均値に対する実効値の比）を乗

表 3 デジタルパワーメータとワットモニタの計測値の比較

負荷個数	電圧 (V)	電流 (A)	電力 (W)	力率	ワットモニタの表示 (W)
ワットモニタのみ	100.5	0.024	0.1	0.061	0.0
0 (無負荷)	100.8	0.036	0.6	0.186	0.5
1	100.7	0.155	8.5	0.536	8.4
2	101.3	0.275	15.8	0.564	15.7
3	101.2	0.394	23.5	0.585	23.3
4	101.4	0.521	31.3	0.595	31.0

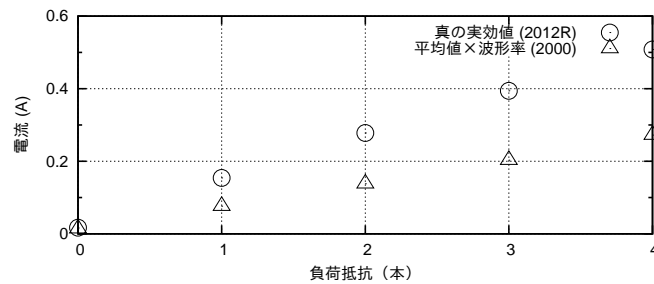


図 8 真の実効値型と平均値型の測定値の相違

じた値を表示するものがある。前者が実効値型の計測器であり、後者が平均値型の計測器である。

多くの場合、交流測定で対象となるのは正弦波なので、いずれの計測器を用いても問題はない。しかし、本稿で述べるような測定対象の消費電流は図 7 のような歪んだ波形であり、計測には真の実効値を表示できる計測器を使うことが望ましい。

図 5 に示す回路を用いて、実効値型のデジタルマルチメータ 2012R と、平均値型のデジタルマルチメータ 2000 での電流値を比較した。この結果を図 8 に示す。

いずれの結果も負荷と電流測定値はほぼ比例していることがわかるが、平均値型では電流の測定値がおよそ半分となっている。消費電力の簡易計測を目的として電流計を用いる場合は、用いる電流計のタイプを統一しておく必要がある。言い換えると、電流計のタイプを揃えてさえおけば、消費電力の大小関係や変化をとらえることは可能である。

3.2.5 定格表示と出力電力の相違

ここまでの測定に用いた AC アダプタには、定格出力電圧が 15.1V、出力電流が 2.6A と

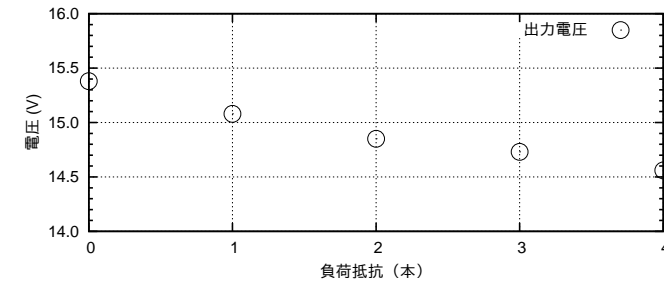


図 9 出力電圧の負荷依存性

表示されている。この定格表示は、JIS や電気用品安全法（以前は電気用品取締法）によるものである。また細かな測定条件はメーカーが規定している。このため、定格表示と実使用環境での測定値とは異なることが一般的である。図 9 に、負荷による AC アダプタの出力電圧の変化を示す。定格表示とは異なり、測定した範囲においては、出力電圧は 15.4V から 14.6V である。

4. サーバ室の断熱性の測定

サーバ室の空調を設計する際には、その断熱性を調査しておくことが重要である。特に夏場の冷房に要する消費電力を抑制するためには、屋外の温度の影響を受けないよう、断熱性が高いほうが有利である。

断熱性能は、空調を停止した際に、室内温度が室外温度にどの程度に時間で近づいていくかで評価できる。室温が T_i 、外気温が T_e とすると、温度差 ΔT は $\Delta T = T_e - T_i$ と書ける。温度差 ΔT は、時間とともに減少していくが、時間と温度差の関係は

$$\frac{d\Delta T}{dt} = -\Delta T \quad (5)$$

で表すことができる。仮に冬場で室温が外気温より高い場合、 $T_i(t)$ は式 (5) から、

$$T_i(t) = T_e + (T_i(0) - T_e) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (6)$$

と書ける。ただし、外気温 T_e は一定であり、空調を停止した時刻を $t = 0$ とする。 τ はその部屋の断熱性能を示す時定数である。

図 10 と図 11 に、一般家屋（鉄骨スレート葺構造）において、空調を止めたときの IPMI

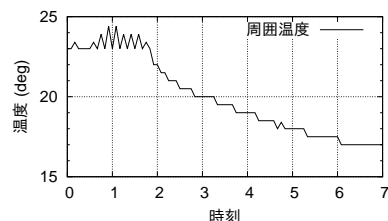


図 10 空調停止時の温度変化

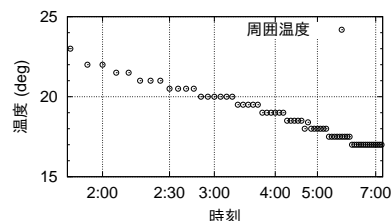


図 11 空調停止時の温度変化 (時間軸は対数)

による ML115G5 の周囲温度の変化を示す。測定は 2011 年 3 月 28 日に行い、19:50 から翌日未明 1:50 までの 6 時間、設定温度 22 度でエアコンを運転した。エアコンが 1:50 に停止したあとに、徐々に測定温度が低下していることがわかる。また、図 11 は横軸を対数軸としたものであるが、ほぼ直線的に測定温度が低下し、式 (6) に近い結果が得られた。

大学や企業などの事業所においても、法定点検などの機会に、空調を停止した際の温度変化を計測すると、断熱性能の評価が可能であろう。また、その結果は断熱材の追加など、改装工事の基礎データとすることができると考えられる。

5. おわりに

本稿では、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、温度や消費電力といった、エネルギーに関するデータを取得できることを紹介した。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、既存研究における簡易測定の評価を目的として、オシロスコープとデジタルパワーメータを用いて、電流波形や消費電力を計測した。用いた計測機器は、それぞれのメーカーに校正書類を発行してもらうことにより、計測機器のトレーサビリティを確保できるものである。測定の結果、条件さえ揃えておけば、電流測定によって簡易的に消費電力量を十分評価できることがわかった。

本稿では、大学のサーバ室や PC 演習室など、大規模な環境での評価は実施しなかったが、同種の測定を行うことによって、簡易測定の信頼性が増すものと考えられる。

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), <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S54/S54HO049.html>
- 2) 小原 泰弘, 岡本 忠男, 宇多 仁: JAIST におけるサーバーーム構築: 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 三原 義樹, 永井 明, 堀田 直巳: 太陽光エネルギーと DC (直流) 給電設備を活用したセンターシステム, 情報処理学会研究報告, Vol. 2010-IOT-10, No. 9, pp. 1-4, 2010.
- 6) 岡本 昌幸, 小林 俊満, 赤井 光治, 久長 穰, 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Intel: Intelligent Platform Management Interface, <http://www.intel.com/design/servers/ipmi/>
- 11) Duncan Laurie: IPMItool, <http://ipmitool.sourceforge.net/>
- 12) Lm_sensors - Linux hardware monitoring, <http://www.lm-sensors.org/>
- 13) 清水 良文: Mother Board Monitor Program for X Window System, <http://www.nt.phys.kyushu-u.ac.jp/shimizu/download/xmbmon/READMEj-xmbmon205.html>
- 14) Apcupsd a daemon for controlling APC UPSes, <http://www.apcupsd.com/>
- 15) 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.
- 16) 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.