

CPUクロック制御によるサーバの ピークエネルギー消費削減の試み

石島 悌¹ 平松 初珠¹ 山東 悠介² 岩田 晋弥²

概要: 東日本大震災を端緒とする電力逼迫問題は、2012年夏に関西地域において大きな問題となった。関西電力の域内では2010年比10%の電力削減が要請された。本稿では、CPUクロックを制御することにより、サーバの消費電力を10%程度削減する試みについて報告する。ノートパソコンやスマートフォンなどのモバイル機器では動作クロックを制御することによって、消費電力の低減が図られている。この仕組みをサーバにおいて導入することにより、サーバの消費電力を削減した。

Reduction of Peak Energy Consumption by Controlling CPU Frequency on Server

DAI ISHIJIMA¹ HATSUMI HIRAMATSU¹ YUSUKE SANDO² SHINYA IWATA²

Abstract: In the Kansai region, power shortage originated with the Great East Japan Earthquake, became a big problem in this summer. In the region of Kansai Electric Power, reduction of power consumption by 10% compared to that in 2010 was requested. In this paper, we report an attempt to reduce 10% of power consumption of the server by controlling the CPU clock. In mobile devices, such as note PCs and smart phones, reduction of power consumption is achieved by same method. By applying this method into a server, power consumption of the server has been reduced.

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災発生時においては、著者らの職場や住居が位置する関西地域には、ごく一部の例外を除いて直接的な被害は発生しなかった。しかし、この震災を端緒とする電力逼迫の問題は2012年になって関西地域において非常に大きな問題となった。

2012年5月19日には、関西電力がその域内の事業者や家庭に対してきわめて厳しい節電要請を出すこととなった[1]。この要請では、猛暑を記録した2010年比で15%の節電が求められただけではなく、その節電要請を満たしたとしても、最大需要電力が供給能力を上回ってしまい、深刻な電力不足に陥ることが示唆されていた。

電力不足に伴う大規模な停電を避けるため、関西電力はその域内を小さなグループに別けて輪番で停電を実施する計画停電の準備を開始した[2]。著者らの属する研究所でも、計画停電が実施された際にどのような対応をとるかが2012年6月下旬に急遽検討された。

その後、発電所の運転再開や他社からの電力融通、さらに発電能力の増強などがあり、深刻な電力不足は回避できることが予想された。それと同時に2010年比15%減という非常に厳しい節電要請は緩和され、その目標は10%に改められた[3]。

電力逼迫時での節電において重要な点は、電気料金に直結する電力量を減らすことではなく、ある瞬間における瞬時電力を減らすことである。一瞬であっても消費電力が発電能力を上回るとは、大停電へつながる。

電力使用のピークは、工場やオフィスでの電力需要が増加する昼間の13時から16時までの時間帯であり、このピーク時における電力をいかに削減するかが重要である。

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

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

ピーク時における電力の削減は、今夏の節電という観点から注目を集めたが、中長期的なマネジメントの観点からも有効である。これは大口の電力需要者の電気料金が、ピーク電力量から決定される契約体系となっているからである。すなわち、ピーク時の電力を削減することは、結果として電力会社に支払う電気料金の削減につながる。

以上の点を踏まえ、関西電力管内では、不要な照明の消灯や、エアコンの設定温度の変更といった細かな対応だけでなく、工場などの事業所の土日操業といった大規模な対策があわせてとられることとなった。

一方、社会の情報基盤について目を向けると、サーバ室において不要な照明をこまめに消したり、エアコンの設定温度を支障のない範囲で上げる、あるいは、ディスプレイの輝度を下げるといった対応がよくとられていた。また、ノートパソコンのバッテリーを活用し、電力使用のピーク時に電力消費を抑える方法なども採用された [4]。しかし、情報基盤そのものを支えるサーバなどの情報機器における積極的な省エネルギーについては大きな話題とはならなかった。

本稿では、サーバそのものの消費電力を 10% 程度削減する試みについて報告する。

2. サーバ機器の低消費電力化

ノートパソコンやスマートフォンに代表されるモバイル機器では、限られたバッテリー容量で、高い処理能力と長い駆動時間の両立を図るため、クロック周波数のきめ細かな制御がなされている。

情報機器に使用されている半導体スイッチング素子は、一般的に、その動作する周波数に比例して電力を消費する [5]。処理能力を上げるためには、クロック周波数を上げる必要がある。逆に、駆動時間を延ばすためには、クロック周波数を下げる必要がある。

処理能力と駆動時間は互いに矛盾する問題であるため、ノートパソコンなどでは、処理能力が要求される場面ではクロック周波数を上げ、そうでない場面では下げるといった手法が取られる。それを実現するために、CPU や周辺チップセットを含めたマザーボード、それらを統括する BIOS や OS では、稼働中に動的にクロックを変更する機能をサポートしている。

これらの機能はインテル SpeedStep テクノロジー [6] や AMD PowerNow! テクノロジー [7] として知られている。

現在普及している PC サーバの基本的な構成は、上述のノートパソコンと大差はない。そのため、CPU やマザーボード、BIOS が稼働中のクロック変更に対応していれば、サーバ機器においてもノートパソコンと同等のクロック周波数の制御による電力制御が可能となっている。サーバ機器で利用される OS においても、Linux においては cpufreqd [8]、FreeBSD では powerd [9] といった実装によ

表 1 HP ML115G5 仕様

項目	形式・仕様
CPU	AMD Athlon 1640B 2.7GHz
メモリ	DDR2 SDRAM 1G バイト
HDD1	Seagate ST3500413AS 500G バイト
HDD2	Seagate ST3500413AS 500G バイト
HDD3	GB0160EAPRR 160G バイト

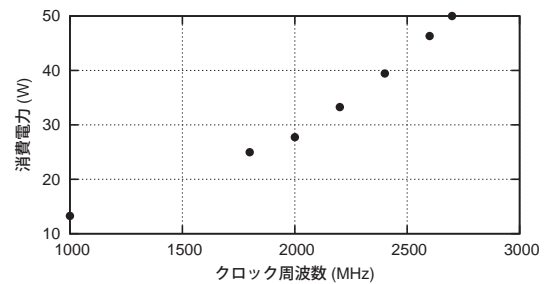


図 1 Athlon 1640B のクロック周波数と消費電力

```
# sysctl -w debug.cpubfreq.lowest=1800  
# powerd -a min -b min -n min
```

図 2 CPU 動作クロック周波数の設定方法

て、クロック周波数の制御が可能となっている。つまり、これらの実装を用いれば、省エネなどの電力制御が可能となる。

3. 低消費電力化の実験方法

実験には表 1 に示す PC サーバ HP ML115G5 を用いた。このサーバの CPU である AMD Athlon 1640B は、1000MHz から 2700MHz までの範囲で動作クロック周波数を変更することができる。この CPU の熱設計電力 (TDP: Thermal Design Power) は 45W であり [10]、動作クロック周波数と CPU 消費電力の関係は図 1 で示される。

このサーバは、OS として FreeBSD 7.3R/amd64 を利用し、ウェブサーバ、メールサーバとして用いている。ウェブサーバへの平均月間アクセス回数は 10 万回程度、メールの月間送受信回数は 6 千回程度である。

このサーバの OS である FreeBSD では、前章で述べたとおり、powerd コマンドを用いることによって電力制御を行うことができる。その制御方法には、性能を重視してクロック周波数を最大値とする、電力消費を最少とするためにクロック周波数を最小値とする、性能と電力消費のバランスをとるために、CPU 負荷に応じて動的に変化させるという 3 つの選択肢がある。

CPU で選択可能なクロック周波数から、任意のものを設定するには、以下に述べる方法をとればよい。

まず、カーネル変数 debug.cpubfreq.lowest に MHz 単位で動作周波数を設定する。これにより、powerd が設定する動作周波数の下限を設定できる。次に、システム電源制

御ユーティリティである powerd コマンドを電力消費を最少とするモードで起動することによって、OS の稼働中に CPU クロックを変更することができる。たとえばクロック周波数を 1800MHz とするとき、図 2 のようにする。サーバの動作クロック周波数は、カーネル変数 dev.cpu.0.freq で参照できる。

今回は、1000MHz、1800MHz、2400MHz、2700MHz の 4 周波数でサーバを動作させ、サーバの消費電力や CPU 温度を測定した。測定時は、サーバを設置した部屋で、エアコンを 25℃ に設定して運転し、外気温によって消費電力などが変動しないようにした。

消費電力や温度の測定には既報である UPS やサーバの内蔵センサによる計測方法を用いた [11]。UPS には APC (現・シュナイダーエレクトリック) の CS500 を使い、UPS にはこのサーバだけを接続した。UPS が示す消費電力はこのサーバの消費電力となる。

4. 内蔵センサによる電力と温度の測定

文献 [11] において、情報機器に内蔵されたセンサを用いることにより、消費電力や温度を計測できることを紹介した。

UPS の内蔵センサを用いると、接続した機器の消費電力を計測することができる。サーバには温度センサが内蔵されており、これにより CPU 温度と周囲温度を計測することができる。

図 3 に、今回の計測で用いた UPS の後継機種である RS550 での電力測定値を示す。横軸は負荷の消費電力を横河電機のデジタルパワーメータ 2523 で計測した値であり、縦軸は UPS での測定値である。

負荷の力率が 1 のときは、消費電力と UPS での計測値はほぼ一致する。力率が 1 より小さいときは誤差が増加するものの、±5% の範囲で測定可能であることがわかる。CS500 では、RS550 と比較すると、力率が小さいときに誤差が増加するが、似た結果が得られている。今回使用した HP ML115G5 は力率改善 (PFC: Power Factor Correction) 電源を用いているため、十分信頼できる測定が可能である。

図 4 に、サーバの内蔵センサで得られる周囲温度測定値を示す。横軸は A&D 社の温度計 AD-561 で計測した温度、縦軸は内蔵センサで得られた値である。温度計は、HP ML115G5 の前面吸気口付近に配置した。

サーバなどに使われる温度センサは ±2℃ 程度の誤差がある。図 4 は、温度計と内蔵センサの測定値の差がこの誤差範囲に収まっていることを示している。

5. クロック制御による省エネ効果の測定結果

図 5 にクロック周波数とサーバの消費電力の時系列変化を示す。今回の測定では、2 時間ごとにクロック周波数を制御した。まず最初は 2700MHz、次に 1000MHz、1800MHz、

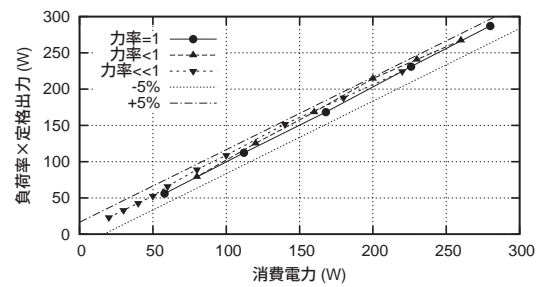


図 3 消費電力と UPS 負荷率の関係

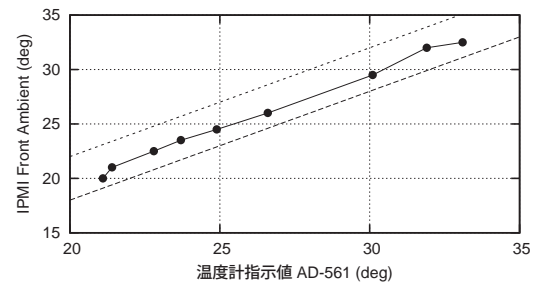


図 4 消費電力と UPS 負荷率の関係

2400MHz、2700MHz の順である。最後の 2 時間は powerd により、CPU 負荷に応じて動的にクロック周波数を変化させた。測定時間は合計で 12 時間である。

図 6 に、クロック周波数を変化させたときの消費電力の測定結果を示す。クロック周波数が 2700MHz のときのサーバの消費電力は 92W 程度である。クロック周波数を 1000MHz に下げたときはサーバの消費電力は 11W 低下し 81W となった。およそ 12% の節電を行うことができたことがわかる。

クロック周波数を固定とせず、powerd による動的な制御とした場合は、サーバの平均消費電力は 87W 程度であり、本サーバにおいては、処理能力をできるだけ犠牲にしない場合でも 5W、5% 程度の省エネルギー化が可能であった。

図 7 に、CPU 温度と周囲温度の変化を示す。25℃ 設定でエアコンを運転していたため、周囲温度は 22.5℃ で安定している。測定開始直後はエアコンの運転開始から時間が十分経過していなかったために周囲温度は若干高くなっている。また、測定終了直前にエアコンの運転を停止してしまったために、やはり周囲温度が高くなってしまった。

CPU 温度と周囲温度の差は、CPU の発熱に起因する。クロック周波数が高い場合は、CPU の発熱が増えるために温度差が大きくなる。CPU の発熱が増えると、サーバ背面からの排出される空気の温度が上昇する。クロックを下げた発熱を減らすことは、エアコンの熱負荷の減少につながり、エアコンの消費電力の軽減につながると予想される。今回、エアコンの消費電力を測定することはできなかったため、クロック周波数を下げることが、エアコンでの節電にどれくらい寄与したかを測定することはできなかった。

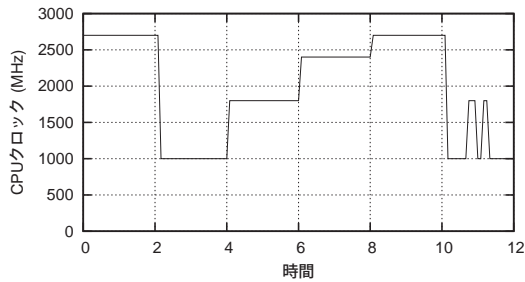


図 5 CPU クロックの時系列変化

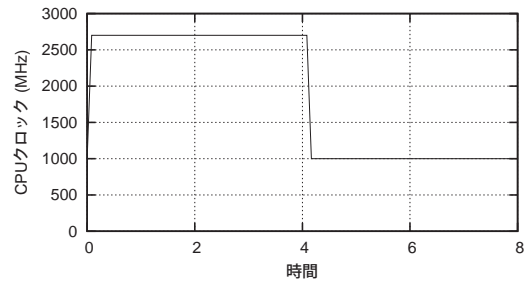


図 8 CPU クロックの時系列変化

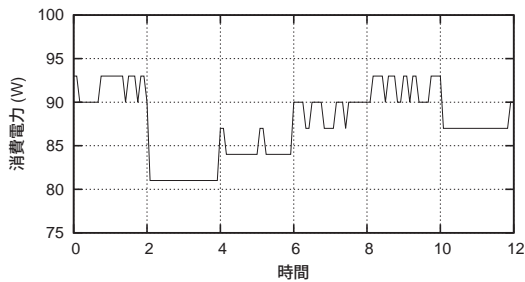


図 6 消費電力の時系列変化

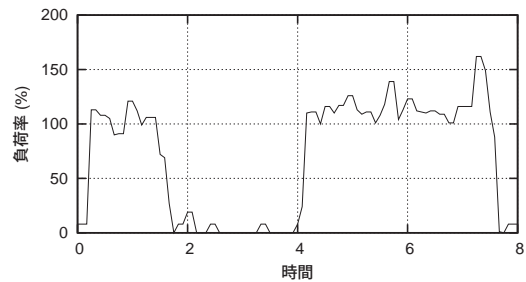


図 9 サーバ負荷率の時系列変化

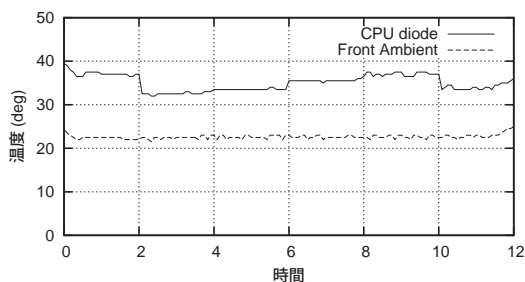


図 7 CPU 温度の時系列変化

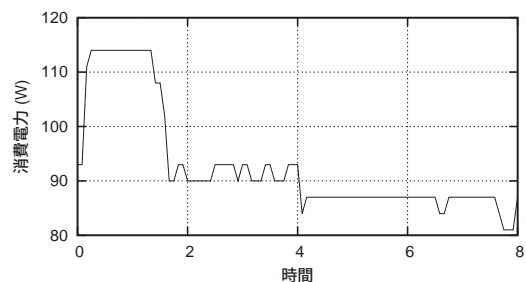


図 10 消費電力の時系列変化

6. 重負荷時の省エネ効果の計測

計測に用いたサーバはあまり負荷がかかっておらず、クロックを下げなくても CPU の HALT 動作により消費電力が少なかったことが予想される。そこで、負荷をかけた場合の省エネルギー効果を測定した。

このサーバで現在行っている処理のうち、もっとも負荷のかかるものは、データのバックアップとそれともなうデータ圧縮処理である。データのバックアップ処理は表 1 に示した HDD1 と HDD2 のデータを圧縮して HDD3 に保存するというものである。この処理をクロック周波数 2700MHz のときと 1000MHz のときで動作させ、そのときの消費電力ならびに処理時間を計測した。

図 8 に CPU クロック周波数の時系列変化を示す。今回の測定では、2700MHz でサーバを 4 時間動作させ、次に 1000MHz で 4 時間動作させた。

図 9 にサーバの負荷率の時系列変化を示す。2700MHz でサーバを動作させた場合、負荷率が高くなっている期間はおよそ 1 時間 25 分である。1000MHz でサーバを動作さ

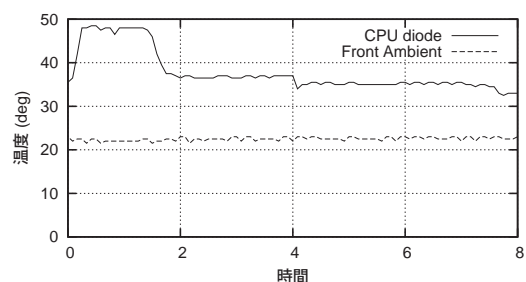


図 11 CPU 温度の時系列変化

せた場合、負荷率が高くなっている期間はおよそ 3 時間 25 分である。

図 10 にサーバの消費電力の時系列変化を示す。クロック周波数が 2700MHz のときは、サーバの消費電力は 114W 程度であるのに対し、1000MHz の場合は 87W 程度であった。およそ 27W、24%の電力削減が可能であった。

一方、処理時間は 2700MHz のときは 1 時間 25 分で処理が完了しているのに対し、1000MHz の場合は 3 時間 25 分を要した。省エネルギーの代償として処理時間は 2.4 倍となった。

図 11 に CPU 温度と周囲温度の時系列変化を示す。図 7

と比較すると、重負荷時には CPU からの発熱が増えていることがわかる。

7. 今夏におけるサーバの運用

サーバのクロック周波数を 2700MHz から 1000MHz に下げることにより、軽負荷時にはおよそ 12%、重負荷時にはおよそ 24%の節電が可能であることを示した。また、クロック周波数を固定とせず、負荷変動に応じて自動的に変更する設定においては、およそ 5%の節電が可能であることを示した。

以上の点を踏まえ、電力消費ピーク時には可能な限りの省エネルギー化を実施し、それ以外の時間帯においても無理のない範囲で省エネルギー化を試みた。

具体的には、平日（月曜日～金曜日）の 11 時から 16 時までは、クロック周波数を 1000MHz に固定することとした。それ以外の時間帯と土曜日、日曜日には、負荷変動に応じてクロック周波数を自動的に変化することにした。

これらの取り組みにより、電力消費のピーク時にはしっかり節電を行い、それ以外は無理のない運用とした。

8. 省エネとユーザの便益の低下について

関西電力管内における今夏の節電は、10%という目標を達成することができた。これは大規模事業所における土日操業といった大規模な取り組みから、こまめな照明の消灯、エアコンの温度設定の変更といった小さな努力の積み重ねの上により、ようやく達成できたものである。

以上のような取り組みは、少なからずユーザの便益の低下をもたらしている。製造業のような事業所においては、事業の継続がぎりぎり可能などころまで節電の取り組みが実施されたとも聞いている。その取り組みの中には、ユーザの便益を必要以上に損なったものがあるかもしれない。

本稿では、サーバの動作クロックを下げることによって、省エネルギー化が可能であることを示した。しかし、重負荷時には、必要とされる処理に時間がかかりすぎることも判明した。著者らは、必要以上にユーザの便益を損ねるような形で情報基盤での省エネルギーが実施されることは望まない。

また、省エネルギーの取り組みにおいては、実際には省エネルギーになっておらず、単にユーザの便益を損ねただけになっているものもある。たとえば、エレベータの部分停止などは、条件によっては消費電力削減効果は微々たるものであり、ユーザの便益を大きく損ねただけになっていることが震災発生よりずっと前に報告されている [12]。このようなナンセンスな取り組みとして、本稿で示した手法が取られることがないことを切に願う。

今夏の関西地方における節電目標は、関西電力が準備できる電力供給能力を根拠として算出されていた。その一方で、何の根拠もなく、たとえば対前年比 5%減のような目

標設定をしているような組織もある。このような組織においては、中長期的なマネジメントの観点から、何のために省エネルギーを行うのかを明確にするべきである。根拠や展望もなく、実現可能化どうかも判然としないただの数値目標を掲げてても何の意味もない。

9. おわりに

本稿では、2012 年に顕在化した関西地方における電力不足の問題について、情報基盤を支えるサーバ機器における対処方法の一つを紹介した。関西電力管内においては、2010 年比で 10%の節電要請がなされたが、サーバのクロック周波数を下げて運用することにより、サーバにおける節電は、その要請に応えることができることを示した。さらに、その節電により、サーバの発熱が抑えられるため、空調機器においても節電を期待できる。

サーバにおける省エネルギー化は、ノートパソコンやスマートフォンに代表されるモバイル機器で実現されている、限られたバッテリーによる長時間稼働の方法と本質的に何ら変わるところはない。動作クロック周波数を下げることによって、性能は低下するが、省エネルギー化を実現することができる。

本稿では、CPU クロックが 2700MHz で動作しているサーバを 1000MHz で動作させることにより、軽負荷時には約 12%、重負荷時には約 24%の省エネルギー化が可能であることを示した。

サーバによっては、CPU クロックの可変範囲が異なるため、本稿で示した方法と結果がそのまま適用できるとは限らない。今後、さまざまなサーバで同様の実験を行い、どのような環境でどの程度の省エネルギー化が図れるのかを調査したい。

本稿では、サーバ一台だけの環境を評価した。これは中小事業者が動作させている情報基盤にはうまく適用できる可能性がある。その一方で、大学のサーバ室やデータセンタなど、大規模な環境において、空調機器の消費電力を含めた大規模な実験を行いたい。

参考文献

- [1] 関西電力株式会社：今夏の需給見通しと節電のお願いについて、
http://www.kepco.co.jp/pressre/2012/pdf/0519_1j_01.pdf
- [2] 関西電力株式会社：万が一の備えとしての計画停電の準備について、
http://www.kepco.co.jp/pressre/2012/pdf/0622_4j_02.pdf
- [3] 関西電力株式会社：大飯発電所 3 号機の再稼動に伴う明日からの節電内容の見直しについて、
<http://www.kepco.co.jp/pressre/2012/0709-2j.html>
- [4] 篠原 昌子, 村上 雅彦, 岩根 秀直, 高橋 悟, 山根 昇平, 穴井 宏和, 園田 俊浩, 湯上 伸弘：ノート PC を活用したピーク電力削減のためのバッテリー充放電統合制御シ

- ステムの開発, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム論文集, pp. 1754 - 1761, 2012.
- [5] 大幸 秀成: 基本・C-MOS 標準ロジック IC 活用マスタ, トランジスタ技術スペシャル, No. 58, CQ 出版, 1997.
- [6] インテル株式会社: 拡張版インテル SpeedStep テクノロジー,
<http://www.intel.com/jp/support/processors/sb/cs-028855.htm>
- [7] AMD: AMD PowerNow! テクノロジー,
<http://www.amd.com/jp/products/technologies/amd-powernow-technology/Pages/amd-powernow-technology.aspx>
- [8] Gentoo Linux: Gentoo Linux ドキュメント — 電力管理ガイド,
<http://www.gentoo.org/doc/ja/power-management-guide.xml>
- [9] FreeBSD jpmán プロジェクト: powerd(8) — システム電源制御ユーティリティ,
<http://www.jp.freebsd.org/cgi/mroff.cgi?subdir=man&lc=1&cmd=&man=powerd&dir=jpman-7.3.2%2Fman§=0>
- [10] AMD: Athlon プロセッサ モデルナンバー & 機能比較,
<http://www.amd.com/jp/products/desktop/processors/athlon/Pages/AMD-athlon-processor-model-numbers-feature-comparison.aspx>
- [11] 石島 梯, 平松 初珠, 山東 悠介: 情報機器の内蔵センサによる消費エネルギー計測手法, インターネットと運用技術シンポジウム 2011 (IOTS2011) 論文集, pp. 67-74, 2011.
- [12] 上野 剛, 中野 幸夫, 中島 慶人: エレベータの運転台数変更による省エネルギー効果と利用者便益の変化に関する定量的分析—オフィスビルにおける事例検討—, 電力中央研究所 研究報告書, 2006.