

低消費電力マルチコア RP-X を用いた 1 ワット Web サービスの実現

古山 祐樹¹ 島岡 護¹ 見神 広紀¹ 林 明宏¹ 木村 啓二¹ 笠原 博徳¹

概要：一般に Web サーバの稼働時間の多くはアイドル状態であると言われるが、その際においても常に数十ワットの電力を消費し、大きな電力の浪費となっている。そこで本研究では、Web サーバのプロセッサに低消費電力情報家電用ヘテロジニアスマルチコア RP-X を用いることで、QoS (Quality of Service) を確保しつつ低消費電力で動作する Web サーバを開発した。評価の結果、提案する Web サーバを実際に早稲田大学 笠原研究室の Web サーバとして運用した所、平均 1.04 ワットの低消費電力で動作可能なことを確認した。また、様々なアクセス頻度のワークロードでシミュレートした結果、Web サービスとしての QoS(Quality of Service) を満足しつつ、1.66 ワットで動作できることも確認した。本稿では Web サーバの電力をリアルタイムでモニタリングし、電力の可視化を行うシステムについても言及する。

Realization of 1 Watt Web Service with RP-X Low-power Multicore Processor

YUUKI FURUYAMA¹ MAMORU SHIMAOKA¹ HIROKI MIKAMI¹ AKIHIRO HAYASHI¹ KEIJI KIMURA¹
HIRONORI KASAHARA¹

Abstract: Web servers are known to be in the idle state for most of their execution time though they consume tens of watts even in this situation. This causes a significant waste of power consumption. To satisfy both keeping QoS (Quality of Service) and low power consumption for web servers simultaneously, in this paper, a web server is built upon the low-power multicore processor for consumer electronics, RP-X. Using the proposed server system as the web server of Kasahara Laboratory in Waseda University, power consumption was 1.04 Watt on average. In addition, the power consumption of the web server is evaluated over several workload with different access frequency. As the results, the developed web server runs on 1.66 Watt with satisfying QoS. This paper also presents the real-time power monitoring system that allows the power consumption visualization of the web server.

1. はじめに

クラウドサービスに代表される、インターネット上で稼働するアプリケーションが幅広く活用されており、Web サーバへのリクエストは日々増え続けている。またスマートフォンやタブレット端末といった携帯機器の急速な普及も、Web サーバへのリクエストを増やす一つの要因となっている。

このように Web サーバの利用がますます広がっており、これらのサーバの低消費電力化は重要な課題であるもの

の、一般に Web サーバは稼働時間の内、リクエスト処理を行っていないアイドル状態が非常に多くの時間を占めており、現状ではアイドル状態であっても常に数十ワットの電力が消費されている。Web サーバの低消費電力化には、ハードウェアそのものを省電力化する方法と、ソフトウェアからハードウェアを制御し省電力化を図る手法がある。後者はサーバの負荷変動を予測、考慮し、動的に CPU の周波数や電圧を変更する Dynamic Voltage and Frequency Scaling(DVFS) が代表的な技術として挙げられる¹⁾²⁾。また省電力化の技術として、複数のサーバ群をサーバノードとして扱い、ノードの状態を細かく制御することでサーバ

¹ 早稲田大学
Waseda University

ノード全体の電力削減を行う手法や³⁾、さらに、デッドラインの時間からリクエストの優先度付けを行い、アプリケーションまたはデータベースの処理を行うバックエンドのサーバにリクエストを割り当てる手法が提案されている⁴⁾。しかしながら、一般にこれらの DVFS 等の技術で期待されるシステムの省電力化は CPU の最低動作電圧が限界値となり、通常のサーバ用プロセッサを用いる限り大幅な省電力効果は見込められない。

本稿では、低消費電力組み込みマルチコアプロセッサ RP-X を用いることで、アクティブ時において常に低消費電力で動作する軽量の Web サーバを提案する。RP-X は最高動作周波数 648[MHz] 時に、電圧値 1.308[V] で動作し、また周波数制御や電圧制御といった種々の省電力化機構を備えている。

本研究で開発した Web サーバに対して、静的ページと動的ページを対象にしたリクエストの評価を行い、Web サービスとしての QoS(Quality of Service) を満足しつつ、低消費電力で動作出来ることを確認した。さらに、RP-X の周波数制御を適用し DVFS を行うことで、更なる低消費電力効果を得ることが出来た。また本稿では、提案する Web サーバの電力をリアルタイムでモニタリングし、得られた電力値の可視化を行うシステムについても言及する。

2. 組み込みプロセッサを用いた Web サーバ

本章では、提案する Web サーバシステムの主要構成要素であるマルチコアプロセッサ RP-X について述べる。さらに、実際に運用している Web サーバの電力値をリアルタイムにモニタリングし、電力の計測及び可視化を行うシステムについても説明する。

2.1 情報家電用組み込みマルチコアプロセッサ RP-X

RP-X⁵⁾ は、NEDO “情報家電用ヘテロジニアス・マルチコア技術の研究開発” プロジェクトの一環として、早稲田大学、東京工業大学、ルネサステクノロジ^{*1}、日立製作所によって共同で開発された 15 コアのヘテロジニアスマルチコアプロセッサである。

2.1.1 アーキテクチャ概要

RP-X のアーキテクチャの概要図を図 1 に示す。RP-X は汎用 CPU コアである SH-4A を 8 基、その他種々のアクセラレータコア 7 基を搭載したヘテロジニアスマルチコアである。SH-4A コアは 4 基で 1 つの SMP クラスタを形成しており、2 つのクラスタはそれぞれオンチップバス (SHwy#0, #1) によって接続され、さらに両方のバスはエクステンダにより接続し、オフチップメモリ及びオンチップメモリを共有するアーキテクチャとなっている。本研究で開発した Web サーバは OS として RP-X に対応した

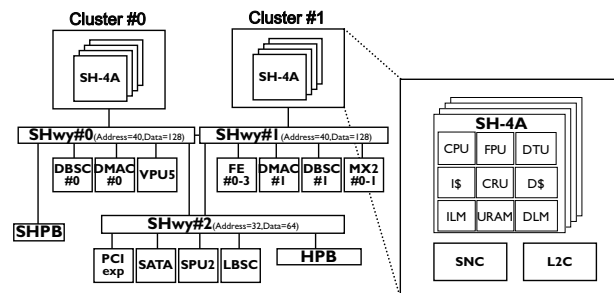


図 1 情報家電用マルチコア RP-X の構成

表 1 RP-X の CPU コアの周波数と供給電圧

周波数	648[MHz]	324[MHz]	162[MHz]	81[MHz]
供給電圧	1.308[V]	1.164[V]	1.020[V] (1.116[V])	1.020[V] (1.116[V])

SH-Linux⁶⁾ を用いており、Linux カーネルでは対称型マルチコアプロセッサ (SMP) モデルが採用されているため、2 つのクラスタの内片方のクラスタのみ認識され、4 コアのみが使用可能な状態となっている。

2.1.2 省電力化機構

RP-X は実行時に動的に制御できる種々の省電力化機構を備えており、ここでは SH-Linux から制御可能な省電力化機構を説明する。

RP-X の各コアは動作周波数として 648[MHz], 324[MHz], 162[MHz], 81[MHz] を独立に設定可能であり、チップ全体の電圧は、各コアの中で最も高い動作周波数に対応した電圧が供給される。各動作周波数に対応する電圧値 [V] を表 1 に示す。ただし、SH-Linux を介して実際に RP-X の動作周波数を変更した所、324[MHz] から 162[MHz]、もしくは 81[MHz] への変更時に、レギュレータの出力電圧にアンダーシュートが生じ、SH-Linux の動作が不安定になってしまう現象が見受けられたため、動作周波数 162[MHz] と 81[MHz] 時には、表 1 の括弧内に示す電圧を供給するように変更した。SH-Linux から RP-X の周波数制御は Linux カーネルの CPUFreq モジュールを介して制御している。

また、RP-X の省電力化機構として各 SH-4A コアのホットプラグが可能なのが挙げられる。ホットプラグを行うと、該当 CPU コア上で実行していたプロセスは他の CPU コアにマイグレーションされ、該当 CPU コアの使用不可能状態が OS に通知される。しかしながら、SH-Linux から RP-X のホットプラグを行った場合、CPU コアに供給されるクロックは停止されず、省電力効果はあまり認められないため、本研究では使用しない。

2.2 サーバ消費電力リアルタイム計測/可視化システム

本節では、Web サーバの消費電力をリアルタイムに計測し、得られた電力値を可視化するシステムについて説明

^{*1} 現 ルネサス エレクトロニクス株式会社

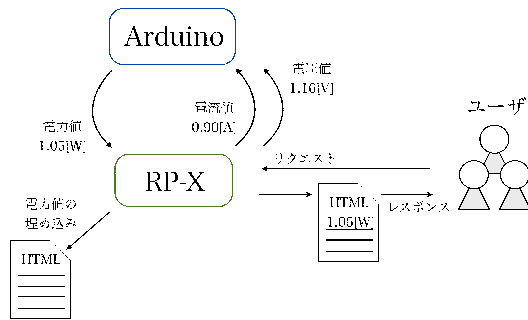


図 2 Web サーバの消費電力可視化システム

する。

Dimitris らは、サーバシステムで消費される電力の割合の内、CPU の電力値がアイドル状態、アクティブ状態ともに非常に大きな割合を占めることを示した⁷⁾。そこで、本研究では Web サーバシステムの電力値の指標として、CPU の電力値をサーバ全体の代表値として評価することとした。

CPU の電力値は、CPU チップに取り付けた電流センサ・電圧センサから得られた電流値・電圧値を、Arduino⁸⁾ と呼ばれるマイクロコントローラに入力し、そのマイコン上で算出する仕組みとなっている。また Web サーバの電力を可視化する方法として、ユーザからリクエストされた Web ページに、計測された電力値を埋め込み、ユーザのブラウザ内に現在の電力値を表示させるという方法を取った。こうすることで、ユーザは現在見ている Web ページを運用しているサーバの、リアルタイムな電力値を確認することが出来る。このシステムの概略図を図 2 に示す。電力が可視化されるまでのフローは、以下のステップからなる。

- (1) Web サーバから Arduino に対して定期的に (1 秒周期)、電力値更新リクエストが送られる。
- (2) リクエストを受け取った Arduino は RP-X チップの電流値と電圧値を測定し、測定値から算出された電力値をレスポンスとして Web サーバ側に返す。
- (3) Arduino からのレスポンスは特定の HTML ファイルに埋め込められ、ユーザからのリクエストに対してそのファイルが返される。

尚、現在このシステムを用いて、早稲田大学 笠原研究室の Web ページ⁹⁾ を運用している Web サーバの電力をモニタリングしている (図 3)。モニタリング結果は 3 章で詳細に述べる。

3. 性能評価

本章では提案する Web サーバの性能評価を行う。評価は大きく分けて、あらかじめ定められたワークロードに対する実験的な評価と、実際に当研究室の Web サーバとして運用を行った運用結果の 2 つの面から評価する。また実験的な評価では Web サーバに DVFS 制御を適用した場合の評価も論ずる。



図 3 早稲田大学 笠原研究室ホームページ上での電力表示

3.1 評価環境

本評価で対象とする Web サーバはプロセッサとして前述の RP-X を用い、メモリは 4GB DDR3-SDRAM、ディスクは SSD 80GB を備える。また OS は SH-Linux 2.6.27、Web サーバソフトウェアとして Apache httpd 2.2.22 と PHP 5.3.10 を使用する。PHP に関しては、ページの生成を高速化させるため、Alternative PHP Cache¹⁰⁾ という PHP の中間コードをキャッシュするモジュールを PHP に組み込んだ。また実験的なワークロードの評価では、ワークロードジェネレータとして Apache JMeter¹¹⁾ を使用し、リクエスト要求を作成した。

Web サーバの基本要件として最も大事なことは、どれだけユーザに対して適切なレスポンスタイム以内にレスポンスを返しているかという点である。そこで QoS(Quality of Service) を本評価内で設定し、この Web サーバが提供するサービスが、設定した QoS をどの程度満足しているかを評価のポイントとする。

ここで、QoS(Quality of Service) の定義は SPECweb2009¹²⁾ の定義を基準とし策定する。SPECweb2009 では、以下のように QoS が定義されている。

「2 秒以内にレスポンスが返される状態を GOOD、4 秒以内にレスポンスが返される状態を TOLERABLE とする。Web サーバに対して高負荷な状態を与えたとき、全リクエストの内 95%以上が GOOD であり、かつ全リクエストの内 99%以上が TOLERABLE である時、QoS が満足される。」

上記の定義は高負荷な状態を想定しているが、本評価では低負荷から高負荷に渡って一様に上記の定義を満足することを QoS の定義として定める。

また、リクエスト対象のファイルは、実験的なワークロードの評価では、静的ファイルとして早稲田大学 笠原研究室のトップページ⁹⁾ を、動的ファイルとして PHP で生成される Pukiwiki¹³⁾ のページを選択した。

表 2 実験の評価に用いるワークロードの詳細なパラメータ

	同時接続数	リクエスト数/秒	合計リクエスト数
低負荷	2	2	20
低負荷 から 高負荷	4	4 ～ 200	200
高負荷	30	300	300
高負荷 から 低負荷	4	200 ～ 4	200

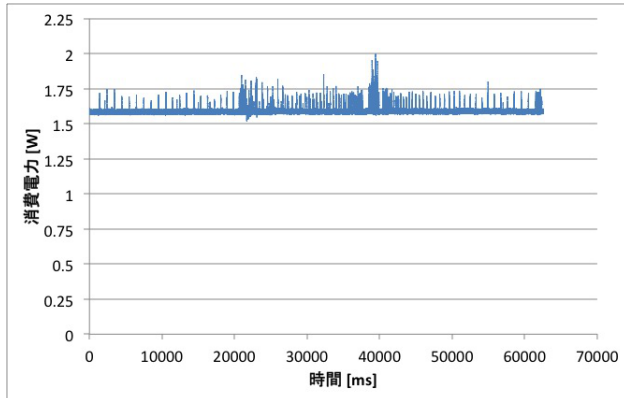


図 4 648MHz 時の静的ファイルリクエストの消費電力

3.2 実験的なワークロード評価

ここでは実験的なワークロードにおいて、周波数固定の場合と DVFS 適用した場合の電力について評価を行う。

3.2.1 動作周波数 648MHz 固定での評価

負荷変動をシミュレートしたワークロードを作成し、そのワークロードを基に Web サーバに対してリクエストを送る実験的な評価を行った。作成したワークロードは低負荷と高負荷を連続して 2 サイクル繰り返すものとなっており、また負荷が変動する際には段階的に変更するように設定した。表 2 に 1 サイクル当たりのワークロードの詳細なパラメータを示す。

リクエスト対象のファイルは、静的なファイルのみの場合、動的なファイルのみの場合、そして静的なファイルと動的なファイルを同時にリクエストする場合の、3 種類のファイルセットに分けて評価を行う。なお、RP-X の動作周波数は 648[MHz] 固定の状態とする。

消費電力とレスポンス時間の割合の結果を、静的ファイル、動的ファイル、そして静的ファイルと動的ファイル同時リクエストのそれぞれに対して、図 4～図 9 に示す。消費電力の図に関しては、1 サイクル当たりの電力結果となる。

静的ファイルリクエストの場合、図 4 より、アイドル時は 1.57[W]、リクエスト処理中は 1.75[W] であり、稼働時の平均電力は 1.59[W] であることがわかる。また図 5 より、リクエストの 96% が 100[ms] 以内に処理され、かつ全リクエストは 2000[ms] 以内に返ってきているため、QoS を満たしていることが確認出来る。

動的ファイルリクエストの場合、図 6 より、アイドル時は 1.57[W] で、リクエスト処理中は静的ファイル時と比べて 25% 高い約 2.2[W]、そして平均電力は静的ファイル時と

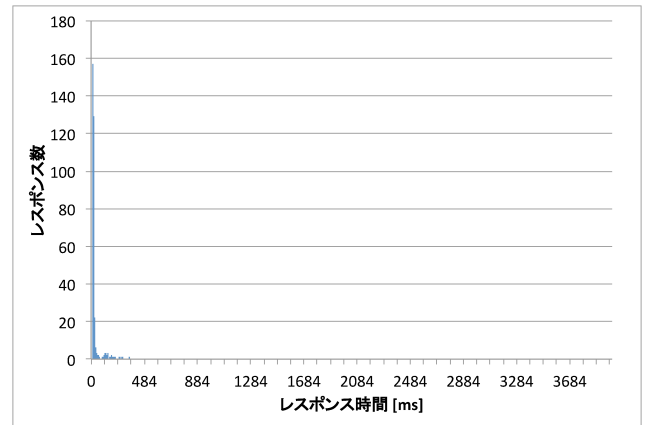


図 5 648MHz 時の静的ファイルリクエストのレスポンス時間の割合

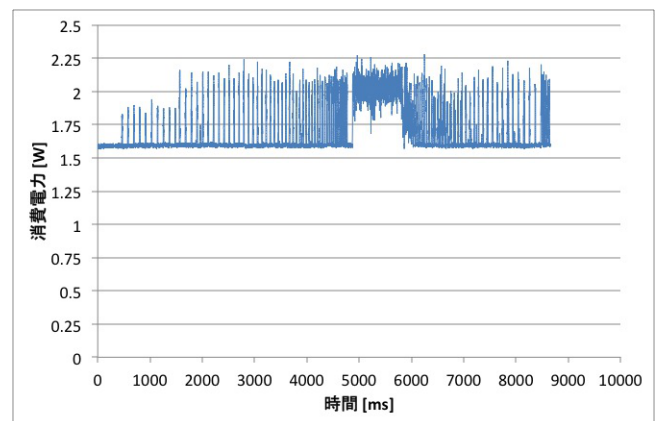


図 6 648MHz 時の動的ファイルリクエストの消費電力

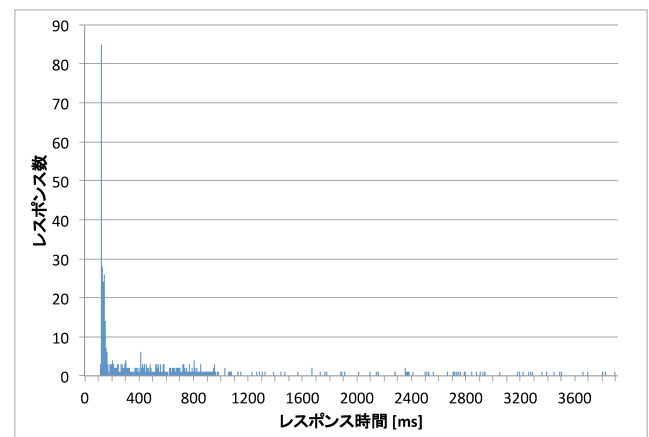


図 7 648MHz 時の動的ファイルリクエストのレスポンス時間の割合

比べて 7.5% 高い 1.71[W] となっていることがわかる。また図 7 より、レスポンスの多くは 1000[ms] 以内に返されているが、いくつかのリクエストに関しては定義した GOOD の値である 2000[ms] を超えてしまっている。しかし 2000[ms] 以内のレスポンスは全体の 96.5% であり、かつ 4 秒以内のレスポンスは 100% であるため、動的ファイルリクエストの場合も QoS は満たしている。

静的・動的ファイル同時リクエストの場合は、図 8 より、

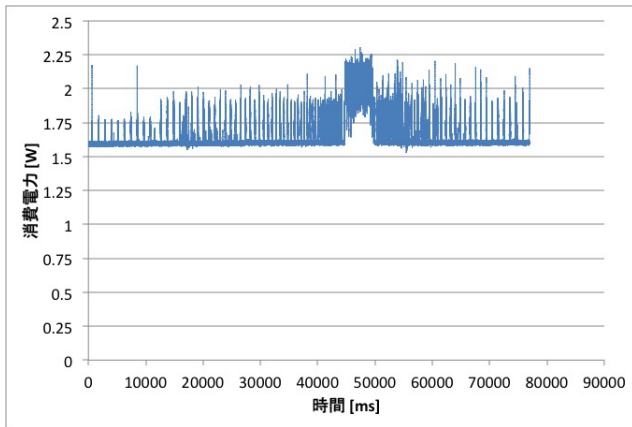


図 8 648MHz 時の静的・動的ファイル同時リクエストの消費電力

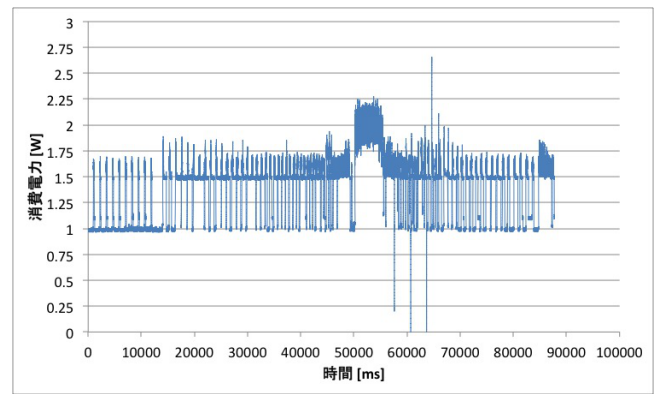


図 10 DVFS 時の静的・動的ファイル同時リクエストの消費電力

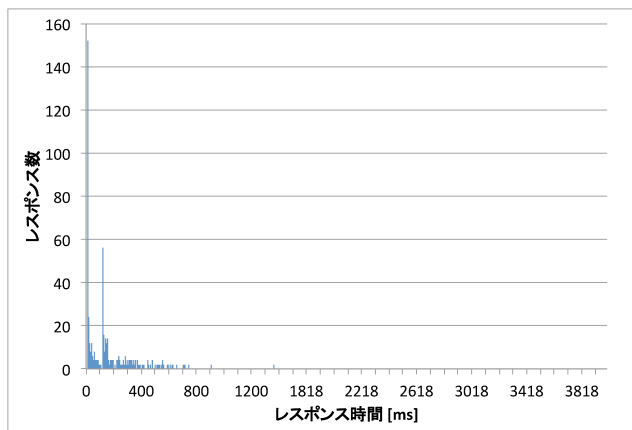


図 9 648MHz 時の静的・動的ファイル同時リクエストのレスポンス時間の割合

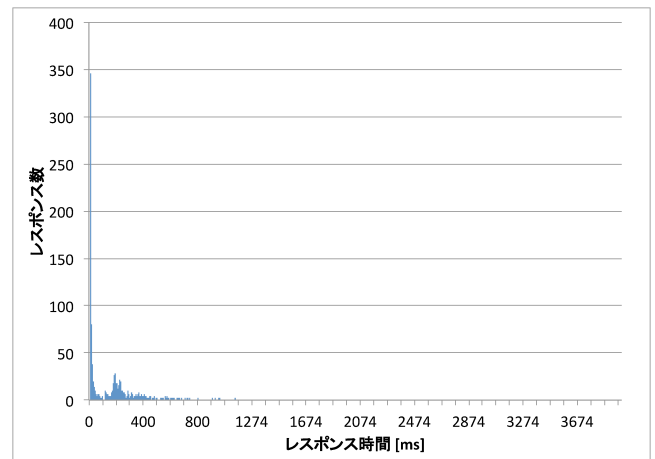


図 11 DVFS 時の静的・動的ファイル同時リクエストのレスポンス時間の割合

リクエストを処理している間は、静的ファイルと動的ファイルリクエスト時のおおよそ平均値となる 2.0[W] で稼働していた。また平均電力も同様に静的ファイルと動的ファイルの場合の平均値に近い 1.66[W] で稼働することが確認出来た。レスポンス時間を示す図 9 では、静的ファイルリクエスト時の 100[ms] 以内のレスポンスと、動的ファイルリクエスト時の 100[ms] 以後のレスポンスが合わさった形となり、どちらのファイルリクエストも同等に処理が出来ていることがわかる。また、2 秒以内のレスポンスが 100% を占めたため、この場合も同様に QoS を満たすことが確認出来た。

3.2.2 動作周波数変動 (DVFS) での評価

より一層の低消費電力化を図るため、Web サーバに対し DVFS を適用した場合の電力評価も行った。DVFS は Linux カーネルの CPUFreq モジュールを用い、CPUFreq のポリシーとして負荷変動に対して素早く順応する *ondemand* ポリシーを選択した。こちらは、静的・動的ファイル同時リクエストの場合のみ評価を行い、消費電力とレスポンス時間の割合の結果をそれぞれ図 10、図 11 に示す。図 10 から、アイドル時間は約 1[W] で、リクエスト処理中は 1.5[W] 以上の電力で稼働していることがわかる。DVFS を行った

場合の平均電力は 1.39[W] であり、DVFS を行わない場合と比べて 19% の省電力効果が得られた。図 10 では、電圧が一時的に大きく上昇・下降している箇所があるが、これはコアの周波数の変更時に、電圧が不安定になることがあるためである。レスポンス時間は図 11 より、約 99% のリクエストは 1000[ms] 以内に終わり、かつ全てのリクエストは 2000[ms] 以内に終わっていることから、DVFS を行った場合でも、QoS を満たすことが確認された。

3.3 実際の運用における評価

本稿で提案した Web サーバシステムは現在、早稲田大学 笠原研究室の Web サーバとして稼働している。これは 2.2 節で述べた Web サーバの電力の計測及び可視化システムを備えたものとなっている。

実運用データとして、早稲田大学 笠原研究室ホームページの 2012 年 5 月 1 日から 2012 年 5 月 7 日の一週間のデータを公表する。この期間の RP-X は 4 つの SH-4A コアを動作周波数 324MHz で動作させていた。表 3 は Web サーバのアクセスログと電力値のログの解析結果である。一週間に渡って平均電力は 1.04[W] と約 1[W] の Web サービスを提供することが出来ている。この RP-X を用いた

表 3 2012 年 5 月 1 日から一週間の Web サーバの運用結果

総アクセス数	1 日平均アクセス数	平均電力	最大電力
3767	538	1.04[W]	1.3[W]

Web サーバを導入する前には, Intel の 4 コア CPU である Xeon X3430¹⁴⁾ を持つ Web サーバを稼働していたが, Xeon X3430 の TDP の公表値は 95[W] であるため, 電力消費を約 91 分の 1 に抑えられることが確かめられた.

4. まとめ

本稿では, 低消費電力マルチコアプロセッサ RP-X を使用した Web サーバの評価を行い, 組み込み 15 コアヘテロジニアスマルチコア上の 4 コアで Web サーバを稼働させる有効性を検証した. Web サーバの QoS を満たしつつ, 実験的なワークロードでは静的・動的ファイル同時リクエストにおいて平均 1.66[W], DVFS を行うと平均 1.39[W] で稼働できることが確かめられた. 実際の運用では平均 1.04[W] と, 約 1[W] の低消費電力で稼働できることを確認した.

この Web サーバの利用範囲は, 通常の太陽電池でも駆動できるため様々な利用形態が考えられる. 例えば, 災害時などで電源が確保出来ない状況下での太陽電池駆動 Web サーバ等, 十分な電源確保が困難な状況における情報提供サーバとして利用することが可能である.

謝辞 SH-Linux に関する様々な情報を御提供頂いたルネサスエレクトロニクス 田原康宏様に感謝致します.

参考文献

- 1) Mootaz Elnozahy., Michael Kistler. and Ramakrishnan Rajamony.: Energy Conservation Policies for Web Servers, *In Proceedings of the 4th USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems* (2003).
- 2) Ramakrishna Kotla.: Scheduling Processor Voltage and Frequency in Server and Cluster Systems, *In Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS' 05)* (2005).
- 3) 今田 貴之, 佐藤 三久, 木村 英明, 堀田 義彦: 分散型 Web サーバでの負荷変動を考慮した省電力化のためのノード状態制御, 情報処理学会論文誌. コンピューティングシステム, Vol. 2, No. 2, pp. 75–88 (2009-07-02).
- 4) Vivek Sharma., Arun Thomas., Tarek Abdelzaher., Kevin Skadron. and Zhijian Lu.: Power-aware QoS Management in Web Servers, *Proceedings of the 24th IEEE International Real-Time Systems Symposium, RTSS '03*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp. 63– (2003).
- 5) Y. Yuyama., M. Ito., Y. Kiyoshige., Y. Nitta., S. Matsui., O. Nishii., A. Hasegawa., M. Ishikawa., T. Yamada., J. Miyakoshi., K. Terada., T. Nojiri., M. Satoh., H. Mizuno., K. Uchiyama., Y. Wada., K. Kimura., H. Kasahara. and H. Maejima.: A 45nm 37.3GOPS/W heterogeneous multi-core SoC, *IEEE International Solid-State Circuits Conference, ISSCC*, pp. 100–101 (2010).
- 6) Renesas Electronics.: SH-Linux, <http://oss.renesas.com/>.
- 7) Dimitris Tsirogiannis., Stavros Harizopoulos. and Mehul A. Shah.: Analyzing the energy efficiency of a

database server, *Proceedings of the 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of data*, SIGMOD '10, New York, NY, USA, ACM, pp. 231–242 (2010).

- 8) Arduino.: Arduino, <http://www.arduino.cc/>.
- 9) 早稲田大学 基幹理工学部 情報理工学科 笠原研究室: 笠原研究室, <http://www.kasahara.cs.waseda.ac.jp/>.
- 10) Alternative PHP Cache.: Alternative PHP Cache, <http://pecl.php.net/package/APC>.
- 11) Apache Jmeter.: Jmeter, <http://jmeter.apache.org/>.
- 12) Standard Performance Evaluation Corporation.: SPECweb2009, <http://www.spec.org/web2009>.
- 13) Pukiwiki.: Pukiwiki, <http://pukiwiki.sourceforge.jp/>.
- 14) Intel.: Intel Xeon CPU X3430 2.40GHz, [http://ark.intel.com/products/42927/Intel-Xeon-Processor-X3430-\(8M-Cache-2_40-GHz\)](http://ark.intel.com/products/42927/Intel-Xeon-Processor-X3430-(8M-Cache-2_40-GHz)).