

## 分散型 Web サーバにおけるノード状態制御による省電力化の検討

今田 貴之<sup>†</sup> 佐藤 三久<sup>†</sup>  
堀田 義彦<sup>†</sup> 木村 英明<sup>†</sup>

近年、多数の Web サーバ等の計算機資源を有するデータセンタのような施設における消費電力の増加が問題となっている。一般に、Web サーバ運用時において実際のアクセスレートが低い場合が発生することがあるため、用意したサーバ資源の量よりも少ない量で QoS を満たせる可能性がある。そこで、本稿では複数のノードから構成される分散型 Web サーバへの負荷とその消費電力の関係を明らかにし、それに基づきプロセッサの DVFS(Dynamic Voltage and Frequency Scaling) 機構およびサーバのスタンバイ状態を利用してノード数を動的に制御することで QoS を満たしつつ省電力化を行う手法について提案を行う。提案した手法を実装し評価を行った結果、SPECWeb99 においてほとんど性能を落とすことなく約 10% のエネルギー削減を行うことができた。

### Reduction of Power Consumption by Controlling Server State on Distributed Web Servers

TAKAYUKI IMADA,<sup>†</sup> MITSUHISA SATO,<sup>†</sup> YOSHIHIKO HOTTA<sup>†</sup>  
and HIDEAKI KIMURA<sup>†</sup>

Recently, a problem of increasing power consumption on Web servers in data center has been arising. Usually, actual maximum access rate to the servers can be small in a period, so it may be possible to reduce the power consumption of the servers with QoS(Quality of Service) satisfaction. In this paper, we evaluate the power consumption and other information such as Web access loads or throughput on distributed Web servers. And we also propose a power reduction method based on the evaluation for the system by controlling processor's DVFS (Dynamic Voltage and Frequency Scaling) and the number of sever nodes using standby state of servers. As a result, we reduced 10% of power consumption without performance impact by using our algorithm in SPECWeb99 benchmark.

#### 1. はじめに

近年、多数の計算機資源を有する計算機センタやデータセンタのような施設において消費電力に関する問題が表面化し、これが計算機運用における課題の一要因となってきている。一般に、インターネットサービスやデータベース等に用いられる各種サーバは処理能力を優先する構成となっているため、それによって消費電力も増加してしまう。また、このような消費電力の増加がさらなる冷却装置の必要性を生み出すという悪循環の原因となっている。また、高解像度動画などのリッチコンテンツやサービスの多様化などアプリケーション側からの性能への要求は今後も増え続け、このような施設に対しさらに多くの計算資源が必要となる。しかし、これ以上サーバを増やすことは電

力そして容積的にも厳しくなっており、これらの面で性能-電力効率の良いシステムおよび効率を高めるための手法の必要性が高まってきている。このような性能-電力効率の良いシステムを構築するためには、

- 低消費電力なシステムの開発
- そのシステム上におけるさらなる省電力化

が必要であると考えられる。前者はハードウェアによるところが大きく、マルチコア等の技術による性能-電力効率の向上が挙げられる。また、後者についてはソフトウェアによるところが大きく、このようなソフトウェア側で省電力化を行う手法がモバイル用途を中心としてこれまでに提案されてきており、最近では各種サーバにもその省電力化の範囲が広がってきている。本稿ではサーバの種類として Web サーバに焦点を当て、特に Web サーバの性能向上のためによく用いられている分散型 Web サーバシステムにおいてリクエストレートや応答速度に対する消費電力の特性を明らかにし、プロセッサの DVFS 機構およびサーバのスタンバイ状態を利用してノード数の制御を行うこと

<sup>†</sup> 筑波大学大学院システム情報工学研究科  
Graduate School of Systems and Information Engineering,  
University of Tsukuba

表 1 仮想サーバおよび実サーバのスペック

仮想サーバ	
CPU	AMD Athlon MP 1800+(1.53GHz) Dual
Memory	DDR-266 1.5GB
Chipset	AMD-760MP
Network	Intel 82545EM Gigabit Ethernet
OS	Linux kernel 2.6.21
実サーバ	
CPU	AMD Turion 64 MT-34(1800MHz)
Memory	DDR-333 1GB
Chipset	Nvidia nForce 3 250Gb
Network	Intel 82541PI Gigabit Ethernet
HDD	HGST HDS721680PLAT80
OS	Linux kernel 2.6.21

で一定の QoS (Quality of Service) を満たしつつ省電力化を行う手法の提案を行う。

本稿の構成は、まず次章にて分散型 Web サーバについて説明する。そして 3 章では分散型 Web サーバにおける消費電力について述べ、4 章で分散型 Web サーバにおける省電力化手法の提案および評価を行う。5 章にて関連研究について説明し、最後にまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 分散型 Web サーバ

Web サーバにおける負荷分散は主にリクエストの負荷分散および冗長性の確保を目的として行われ、最近では Web サーバだけでなく、メールサーバや VPN サーバなども負荷分散の対象となっている。Web アクセスの負荷分散においてよく用いられるのがロードバランサによる手法と DNS ラウンドロビンによる手法である。

- ロードバランサ：ロードバランサと呼ばれる機能を有するフロントエンドサーバ（以下、仮想サーバ）が、送られてきたクライアントからのリクエストの送り先アドレスを書き換え、実際にリクエストの処理を行うサーバ（以下、実サーバ）へリクエストの分散を行う。現在はパケットの送り先 IP アドレスおよびポートでロードバランシングを行う Layer-4 での処理と、パケットの内容 (HTTP ではヘッダや URL 等) でロードバランシングを行う Layer-7 での処理が主流である。
- DNS ラウンドロビン：一つのドメインネームに対して複数の IP アドレスを対応させることによって、DNS サーバに問い合わせが来る度に異なる IP アドレスを返すようにする。このとき返される IP アドレスがラウンドロビンに沿った順番で返される。この手法ではクライアント側の DNS のキャッシュなどによりうまくロードバランサされない場合が生じる可能性がある。

高度なシステムになると、DNS ラウンドロビンで返される IP アドレスを複数の仮想サーバに設定し、さらにその仮想サーバ上のロードバランサによって負荷

分散を行わせるような複合的なものも存在する。

## 3. 分散型 Web サーバの消費電力特性

### 3.1 予備評価環境

予備評価として分散型 Web サーバにおけるアクセス処理時の消費電力特性を調べるために、ソフトウェアロードバランサを有する仮想サーバ 1 台とリクエスト処理を行う実サーバ 4 台を Gigabit Ethernet network でつなげた分散型 Web サーバシステムを構築した。今回の評価では負荷を発生させるクライアントとして実サーバと同じノード 4 台を使用した。表 1 にシステムのスペックを示す。仮想サーバ上で動作するソフトウェアロードバランサには Linux Kernel で提供されている Linux Virtual Server<sup>1)</sup> (以下、LVS) の実装である ipvs-1.2.1、およびその管理のためのツールとして ipvsadm-1.24 を用いた。LVS は Layer-4 におけるロードバランサであり、IP アドレスとポート番号によってロードバランシングを行う。また、ネットワーク構成には実サーバで処理されたりリクエストがロードバランサを介してユーザへ返される NAT 方式を使用し、負荷分散アルゴリズムには ipvs-1.2.1 で実装されている least-connect (以下、lc) アルゴリズムに改良を加えたものを使用した。lc アルゴリズムは新たなリクエストの到着時において各実サーバが処理しているコネクション数の中で最小値を持つ実サーバにそのリクエストを転送して処理をさせるが、ipvs-1.2.1 ではそのコネクション数を Active connection (TCP state が “STABLISHED” のもの) と Inactive connection (TCP state が “ESTABLISHED” 以外のもの) から算出するために、実際には処理を行っていない “TIME\_WAIT” 状態もコネクション数に反映されてしまうためである。

基本的なアクセスパターン時の消費電力を調べるにあたり、ベンチマークソフトウェアには SPECWeb99<sup>2)</sup> を使用した。SPECWeb99 は Web サーバが対応できる最大同時セッション数を計測するための Web サーバベンチマークソフトウェアであり、Web サーバへのアクセス分布を表すものとしてよく用いられる Zipf 分布<sup>3)</sup> に基づいて静的な html ファイルと Perl による動的な CGI スクリプトにアクセスを行う。実サーバにおける CGI の処理では、通常の Perl のインタプリタによる処理速度を向上させるためにサーバ側で FastCGI プロトコルの実装の一つである FCGI-0.67<sup>4)</sup> による高速化を行っている。

また、サーバの消費電力測定には我々が開発した PowerWatch<sup>5)</sup> を使用した。PowerWatch はホール素子を使用することで電源コードを断線させることなく電流値の測定をすることが可能である。本評価ではマザーボードへ供給される ATX+12V DC, ATX+5V DC, ATX+3.3V DC, CPU+12V DC, そして HDD

表 2 実サーバで使用可能な Gear および TDP

	Voltage	Frequency	TDP
Gear0	1.2V	1800MHz	25W
Gear1	1.15V	1600MHz	24W
Gear2	1.1V	1400MHz	-
Gear3	1.05V	1200MHz	-
Gear4	1.0V	1000MHz	-
Gear5	0.9V	800MHz	7.7W

へ供給されている+12V DC および+5V DC それぞれの電流値を測定し、これらの値より消費電力を算出した。

### 3.2 予備評価結果

SPECWeb99 ベンチマークで要求同時セッション数を変化させていき、異なるプロセッサ周波数-電圧の組合せ（以下、Gear）とノード数（1-4 台）の場合においてその性能および消費電力を測定した。表 2 に実サーバのプロセッサで使用可能な Gear および TDP（Thermal Design Power）を示す<sup>6</sup>。本稿ではこのうち Gear0, Gear2, Gear4, Gear5 を使用した場合の結果について示す。

#### 3.2.1 Web サーバ性能およびその傾向

表 3 に条件（各セッションの平均スループットが 32kbps 以上）を満足したセッション数の割合が 90% 以上のときの最大要求同時セッション数の関係を示す。上段は最大要求同時セッション数、下段はそのときの条件満足セッション数の割合を表す。ここで、要求同時セッションとはクライアントプログラムがサーバへの要求として生成する同時セッション数のことである。表 3 より同一プロセッサ周波数の場合にはノード数が増えるにつれて条件を満足する最大要求同時セッション数が増加しており、使用ノード数を増やすことで実サーバの処理能力がスケールアップしていることが分かるが、プロセッサ周波数が高くなると台数分だけスケールアップしていない<sup>\*</sup>。さらに、同一ノード数ではプロセッサ周波数が高くなるにつれて最大要求同時セッション数が大きくなっている（もしくは条件満足セッション数の割合が高くなっている）ことからこのベンチマークが CPU-bound ではないかと考えられる。また、図 1 に各ノード数で Gear0 および Gear5 における要求同時セッション数に対する平均応答時間の関係を示す。すべての条件において要求同時セッション数がある値を超えると平均応答時間が増大する（以下、このような要求同時セッション数を飽和セッション数と呼ぶ）。これは実サーバがクライアントからのリクエストを処理し切れなくなためである。また平均応答時間の傾向として、要求同時セッション数が飽和セッション数より低い場合では平均応答時間はほぼ一定であるが、飽和セッション数に達すると平均応答時間が急激に増加していることが分かる。なお、これらはすべて

表 3 ノード数およびプロセッサ周波数に対する条件満足セッション数が 90% 以上のときの最大要求同時セッション数

# of nodes	Processor Frequency			
	800MHz	1000MHz	1400MHz	1800MHz
1	300	400	400	500
	(94.7 %)	(90.2 %)	(94.8 %)	(94.8 %)
2	600	700	900	900
	(93.0 %)	(93.9 %)	(90.1 %)	(93.3 %)
3	900	1100	1100	1200
	(90.1 %)	(90.8 %)	(94.5 %)	(92.4 %)
4	1200	1300	1400	1500
	(90.9 %)	(92.1 %)	(92.2 %)	(91.7 %)

の Gear において同じ傾向であった。

#### 3.2.2 消費電力およびその傾向

図 2 に各ノード数で Gear0 および Gear5 における要求同時セッション数に対する平均消費電力の関係を示す。この評価は処理させる実サーバの平均消費電力のみを測定し、処理させるノード数と実サーバのプロセッサ周波数を変化させたときの平均消費電力の結果である。図 2 よりどのノード構成においても飽和セッション数よりも小さい値までは平均消費電力が増加する一方で飽和セッション数に達すると平均消費電力は減少に転じる。つまり、サーバシステムの処理能力がユーザからのリクエストを処理しきれなくなると平均消費電力が減少することが分かる。また、ノード数とプロセッサ周波数の組合せがそれぞれ  $(N-1, Gear0)$ ,  $(N, Gear5)$  の場合に同一の要求同時セッション数（飽和セッション数を超えない範囲とする）を処理することを考えると、それらの消費電力  $P$  は  $P(N-1, Gear0) < P(N, Gear5)$  という関係が成立し、 $N-1$  ノード使用時の平均消費電力に未使用ノードのスタンバイ状態（ACPI における S3 モード）のときの平均消費電力約 5W を考慮してもその関係は変わらない。つまり、同一の要求同時セッション数を処理するときにはノード数を少なくしてプロセッサ周波数を高くする方が消費電力の削減に効果的であるということが分かる。これは使用しているプロセッサの TDP の絶対値が高いエンドサーバに用いられているプロセッサよりも低いことから妥当な結果であると考えられる。

## 4. 省電力化機構を持つ分散型 Web サーバ

### 4.1 省電力化機構の概要

前章で述べたように、ノード数およびプロセッサ周波数の組合せによって同一の要求同時セッション数を処理するとき、より少ない消費電力で処理を行うことが可能な場合が生じる。一般に、Web サーバは時間帯によってはアクセス数が少ないために、利用できる最大のサーバ台数より少ない台数でスループットや応答時間等の QoS 条件を満たしつつ処理が可能となる場合が十分にあり得る。つまり、このような条件下において余剰となったサーバをスタンバイ状態にする、ま

<sup>\*</sup> 調査の結果、原因はネットワーク帯域幅であることが分かった。

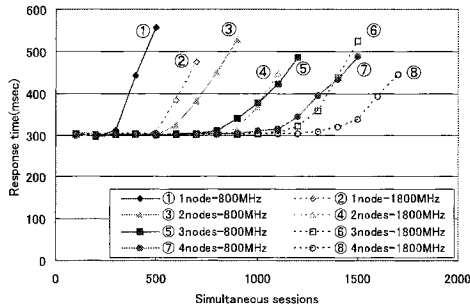


図 1 要求同時セッション数と応答速度の関係

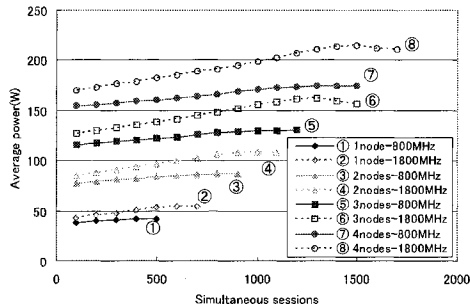


図 2 要求同時セッション数と消費電力の関係

たは QoS のためにそのような状態へすることが困難な場合でもプロセッサの Gear を変更することで条件を満たしつつ消費電力の削減を行いながら Web サーバの運用が可能になると考えられる。なお本稿では実サーバのみの省電力化を考え、仮想サーバおよびネットワークスイッチ等の省電力化については考えないこととする。

省電力化手法を適用するためのシステムには、前章と同じくソフトウェアロードバランサを備えた仮想サーバとユーザからのリクエストを実際に処理する複数の実サーバからなる分散型 Web サーバシステムを考える。図 3 に省電力機構を備えた分散型 Web サーバの概要を示す。このような分散型 Web サーバにおいて仮想サーバ上で動作するロードバランサがそれぞれの実サーバの負荷状況とユーザからのリクエスト状況を判断して実サーバの動作状態（プロセッサの Gear, スタンバイ）を制御して（電源の ON/OFF は時間的ペナルティが高いため利用しない）、ユーザからのリクエストを分散させていく。これを既存のソフトウェアロードバランサと協調して動作する実サーバ状態制御のデーモンプログラムによって実現する。具体的にはソフトウェアロードバランサが保持しているユーザリクエストの負荷分散状況（それぞれの実サーバが処理している接続数）をデーモンプログラムが取得し、制約条件（スループットや応答速度等）を満たしつつ消費電力が最小になるようにそれぞれの実サーバ

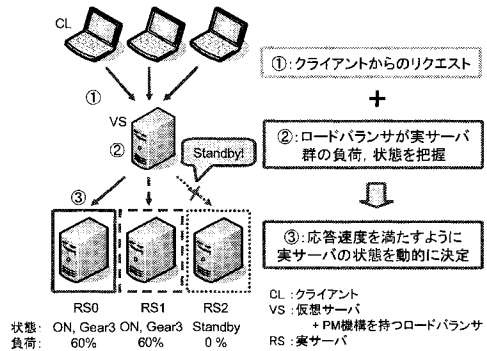


図 3 省電力機構を持つ分散型 Web サーバの概要

バ状態を算出してネットワークを通じて実サーバに状態制御の命令を発行する。プロセッサの Gear の変更には CPUFreq 等の API を利用する。スタンバイ状態への移行には Linux で用意されている pm-utils を利用し、スタンバイ状態からの復帰は仮想サーバからの Wakeup on LAN 命令によって行う。

## 4.2 省電力化アルゴリズムの検討

### 4.2.1 消費電力削減手法

前章でのベンチマークと消費電力傾向の結果をふまえ、プロセッサの Gear および実サーバのノード数に対する消費電力を計測したデータを元にスループットや応答時間等の QoS をなるべく満たしつつ消費電力の最適化を行うアルゴリズムについて検討を行う。省電力化対象のシステムには前章での NAT 型ロードバランサを用いる分散型 Web サーバを想定する。さらに、環境設定として以下の 2 点について仮定を加える。

- クライアントから Web サーバシステムへの要求される最大コネクションレート  $C_{max}$  が既知であり、この値がサーバ性能の飽和をもたらすコネクションレートを超えない
- 1 秒間に増加するコネクションレートの平均値  $C_{slope}$  が既知である

一般的に、これらの値を基準にして Web サーバを構築していく場合が多いことからこのような仮定の設定は妥当であると考えられる。また、本稿ではリクエスト負荷分散アルゴリズムについて既存のものを利用することを考え、ノード数およびプロセッサの Gear のみを制御することに焦点をあてる。以下に、アルゴリズムの概要について述べる

- 前章での予備評価実験と同様に、ノード数  $N(N = 1, 2, \dots, N_{max})$ 、プロセッサの Gear  $g$  のすべての組合せに対して QoS を満たす最大の接続数  $C_{max}(N, g) (\leq C_{max})$  のときの Web サーバの消費電力  $P(C_{max}(N, g))$  をそれぞれ測定する。特に、分散アルゴリズムが least-connect のようなそれぞれの実サーバに対して均等に負荷分散を行うものと仮定できる場合、 $C_{max}(N, g) =$

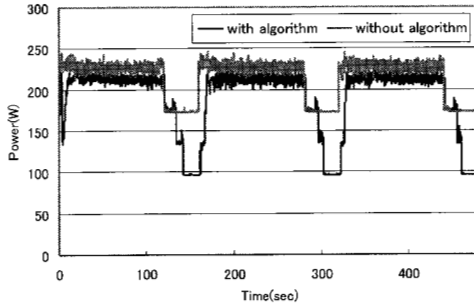


図4 要求同時セッション数 1400 実行時の消費電力変化

$N * C_{max}(1, g)$  であるから

$$P(C_{max}(N, g)) = N * P(C_{max}(1, g))$$

と、1台の場合の測定だけで計算が可能である。

- 時刻  $t$  における接続レートが  $C_t$  であるとき、QoS を満足するために必要なノード数  $N_t$  およびプロセッサ Gear  $g_t$  はそれぞれ

$$\begin{aligned} \min_{N, g} & P(C_{max}(N, g)) \\ \text{s.t.} & C_t \leq C_{max}(N, g) (\leq C_{max}) \end{aligned} \quad (1)$$

となる  $N$  および  $g$  より求めることができる。しかし、ノード数の制御を行うとき実サーバの削除および追加に費やす時間を考慮しなければ QoS を維持することはできない。そこで、一定時間に増加する接続レートの平均値が既知（ここでは 1[sec] あたりに増加する接続レートの平均値を  $C_{slope}$  とする）であるとき、実サーバの削除から追加までの最小時間を  $D$ [sec] とすると、ある時刻  $t$  から  $t + D$  までの時間において考えられる平均的な接続レートの増加は  $D * C_{slope}$  であるから、すでに時刻  $t$  において  $C_t + D * C_{slope}$  以上の接続レートを処理できるようにすることを考える。このとき、式 (1) の制約条件式を

$$C_t + D * C_{slope} \leq C_{max}(N, g)$$

に変えて最小化を行えばよい。

そしてこの  $P(C_{max}(N, g))$  に関する最小化を時間間隔  $T_{period}$  で行うことで QoS を下げることなく消費電力の削減をすることが可能となる。

#### 4.2.2 予備評価

上記のアルゴリズムを前章と同じ分散型 Web サーバシステム上へ実装し、SPECWeb99 を用いて評価を行った。なお、SPECWeb99 では実行直後に接続レートが増加していき、その後一定時間接続レートを保ち続けるようなワークロードとなっている。本評価では、ある Gear およびノード数での SPECWeb99 実行時において飽和が起らない最大の要求同時セッション数で実行したときの接続

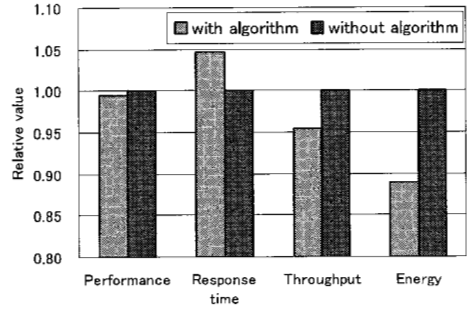


図5 性能、平均応答時間、平均スループット、エネルギーの比較

レートを ipvs-1.2.1 上で計測したものを  $C_{max}(N, g)$  としている。また、今回使用したシステムではスタンバイ状態の消費電力が 5W 未満と非常に低い値であるにもかかわらず復帰時間が通常の電源 OFF-ON 処理に比べて短いので、スタンバイ状態を用いることで接続レートが増加した際の追従性能の向上に加えて低電力状態の時間を増やすことが可能となる。なお、実サーバの削除-追加に必要な最小時間  $D$  は 15[sec] であった。

図4にアルゴリズムを適用して要求同時セッション数を 1400 として SPECWeb99 を 3 回実行したときの消費電力の時間変化を示す。なお、各実行の間にはクライアントからのアクセスが存在しない時間が数十秒存在している。図4よりアルゴリズムを適用した場合ではアクセス負荷時の消費電力が適用しない場合と比べて低くなっていることが分かる。これは、要求同時セッション数 1400 を QoS を満たす範囲で実行するにはノード数を 4 台、プロセッサ周波数を 1400MHz で実行すればよく、アルゴリズム適用によって最適なプロセッサ周波数で処理をしていることを示している。また、接続レートが低くなると処理を行わせるノード数を少なくすることでシステム全体の消費電力が削減していることが分かる。

図5に同条件においてアルゴリズムを適用したときの性能、平均応答時間、平均スループット、およびエネルギーをアルゴリズムを適用しない場合（4台の実サーバ、プロセッサ周波数は最大に固定）で正規化した値を示す。ここで、SPECWeb99 における性能とはサーバが同時に処理できるスループットが 32kbps 以上のセッション数の要求同時セッション数に対する割合のことである。図5よりアルゴリズムを適用した場合における SPECWeb99 の性能低下はほとんど見られず、一方でエネルギーを約 10% することができている。また、平均応答時間および平均スループットが約 5% 悪化しているが、これは接続レート増加の考慮の際においてその最大値ではなく平均値を用いているからだと考えられる。

## 5. 関連研究

Elnozahy らは Web サーバがそれぞれのリクエストに費やした応答時間を記録しておき、目標となる応答時間との関係により DVFS 機構を制御して省電力化を行う手法を提案している<sup>7)</sup>。また、“Request batching”と呼ばれるプロセッサが低電力状態に到着したパケットの処理を遅らせることでプロセッサ状態を idle よりもさらに低電力な状態にさせておき、消費電力の削減を行う手法についても述べている。また、大谷らは Web サーバクラスタにおいて静的または動的コンテンツへのリクエストを区別し、それらを同一サーバ上で処理することで電力効率の向上が可能であることを示している<sup>8)</sup>。

Rajamani らはノード追加時間を考慮し、さらに追従性能向上のためにスベアノードを保持しておく手法について提案している<sup>9)</sup>。この手法ではコネクション数の時間増加量をそれぞれの時点におけるプロファイルとして保持しており、DVFS は利用せずノードの追加/削除のみを対象としている。また、Rusu らはヘテロジニアスな Web サーバクラスタにおいて静的および動的コンテンツの平均 CPU 負荷とそれに対する消費電力プロファイルを利用してノード数最適化を行い、さらに DVFS 制御を実サーバ側で行う手法を提案している<sup>10)</sup>。Bertini らはヘテロジニアスな Web サーバクラスタにおいて DVFS 変更時の消費電力プロファイルを用いて制約応答時間を満たしながら消費電力を削減する手法について提案し<sup>11)</sup>、約 10%の消費電力削減が可能であることを示している。

また、Fan らは大規模データセンタにおける消費電力のプロビジョニングについて述べ<sup>12)</sup>、データセンタにおいて与えられた使用可能消費電力量で計算資源の量を最大化する手法について述べている。サーバの消費電力をモデル化することで、スペック定義の消費電力と実際の消費電力との差が大きいために同じ電力予算内でスペック定義から導出される以上の資源を使用することが可能であることを示している。

## 6. おわりに

本稿では複数のサーバによって処理を行う分散型 Web サーバを対象として、アクセス負荷をかけたときの基礎的な消費電力特性の評価およびそれに基づく QoS を満たすような省電力化手法の提案および評価を行った。Web サーバのアクセス負荷に対する消費電力情報を用いたアルゴリズムにより SPECWeb99 を用いた実験では性能をほとんど落とすことなくエネルギーを約 10%削減できることを示した。

今後の課題としては様々なコネクションレートの変化に対する提案アルゴリズムの性能・消費電力評価が挙げられる。また、コネクションレート増加割合の値

によってさらなる消費電力の削減が可能であるため、この値の性能への影響を調べ、動的に変化させていく必要があると考えられる。

**謝辞** 本研究の一部は科学技術振興事業団・戦略的創造研究推進事業 (CREST) の研究プロジェクト「省電力でディメンダブルな組み込み並列システム向け計算プラットフォーム」による。

## 参考文献

- 1) The Linux Virtual Server Project: <http://www.linuxvirtualserver.org>
- 2) SPECWeb99 Benchmark: <http://www.spec.org/web99/>
- 3) V. Almeida, et al.: Characterizing Reference Locality in the WWW, In The IEEE Conference in Parallel and Distributed Information Systems(PDIS), December 1996
- 4) Fast CGI: <http://www.fastcgi.com/>
- 5) Y. Hotta, et al.: Profile-based Optimization of Power Performance on by using Dynamic Voltage Scaling on a PC cluster, High Performance Power-Aware Computing Workshop(HPPAC) in IPDPS'06, March 2006
- 6) AMD Athlon 64 Processor Power and Thermal Data Sheet: [http://www.amd.com/us-en/assets/content\\_type/white\\_papers\\_and\\_tech\\_docs/30430.pdf](http://www.amd.com/us-en/assets/content_type/white_papers_and_tech_docs/30430.pdf)
- 7) M. Elnozahy, et al.: Energy Conservation Policies for Web Servers, in Proc. 4th USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems (USITS), March 2004
- 8) 大谷貴胤, 池田佳路, 佐々木広, 近藤正章, 中村宏: Web サーバ用計算機クラスタの電力効率最適化に関する初期検討, 情報処理学会研究報告 2007-ARC-164, pp.91-96, 2007
- 9) K. Rajamani, et al.: On Evaluating Request-Distribution Schemes for Saving Energy in Server Clusters, in Proc. IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS), March 2003
- 10) L. Bertini, et al.: Coordinated DVS for QoS Control in Energy-efficient Web Clusters, Workshop on Real-Time Systems (WTR 2007), May 2007
- 11) C. Rusu, et al.: Energy-Efficient Real-Time Heterogeneous Server Clusters, in Proc. 12th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'06), April 2006
- 12) X. Fan, et al.: Power Provisioning for a Warehouse-sized Computer, in Proc. ACM International Symposium on Computer Architecture (ISCA), June 2007