

オンライントランザクション処理における Dynamic Voltage and Frequency Scaling の消費電力削減効果に関する実験的考察

早水 悠登[†] 合田 和生[†] 喜連川 優[†]

[†] 東京大学

あらまし IT システムが社会に深く浸透するにつれて、その複雑さや扱うデータ量は日々増加しつづけている。データセンターの規模は拡大を続けており、サーバマシンの消費電力に対する削減の要求が高まっている。データセンターにおけるサーバの消費電力削減を考える上で、データ処理の中心的役割を果たすデータベースシステムの省電力技術は重要な課題である。データベースシステムの省電力技術は、その重要性が近年になり指摘され注目を集め始めているが、オンライントランザクション処理に関する省電力技術の取り組みはほとんど行われていない。そこで本研究では、オンライントランザクション処理におけるデータベースサーバの省電力化を目指して、実稼動するシステムの消費電力を測定する環境を構築し、CPU をはじめとする各コンポーネントの消費電力の特性を把握するための予備実験を行い、既存の省電力技術のひとつである Dynamic Voltage and Frequency Scaling(DVFS) を適用した際の効果測定を行った。

キーワード オンライントランザクション処理, 省電力, DVFS

An Experimental Study on Energy Saving for Dynamic Voltage and Frequency Scaling in Online Transaction Processing

Yuto HAYAMIZU[†], Kazuo GODA[†], and Masaru KITSUREGAWA[†]

[†] The University of Tokyo

Abstract As IT systems play more important roles in our society, their complexity and the amount of processed data is growing. That accelerates expansion of data centers and growth of energy consumption of servers, and the demand on energy-saving is becoming higher. Energy saving for database systems, which play a central role of data processing, is the key challenge in energy saving for data centers. Energy saving for database systems is becoming a hot research topic, but it is still largely unexplored. Especially there are few works on energy saving in on-line transaction processing(OLTP). This paper describes our research for energy saving in OLTP. First, a measuring system for power consumption and performance of real machines was constructed. Second, power consumptions of each system components were measured to analyze power consumption of OLTP application. Lastly, as an example of existing energy saving techniques, Dynamic Voltage and Frequency Scaling(DVFS) was applied to OLTP application and its efficacy was evaluated.

Key words on-line transaction processing, energy saving, DVFS

1. はじめに

IT システムの消費電力は年々増加してきており、社会的にも大きく注目を集めている。米国環境保護庁の調査 [1] によると、米国内のデータセンターにおける消費電力は 2000 年から 2006 年にかけて約 2 倍になり、2011 年にはさらにその 2 倍にまで増加することが予測されている。また図 1 に示すように経済産業省の調べ [2] によると、日本国内の IT システムによる消費電力は 2025 年には 2006 年の約 5.2 倍、国内の総発電量の

20%を占めるまでに増加するという予測がなされている。このように、IT システムの消費電力が増えるにつれて、消費電力削減への社会的要求が高まっている。

IT システムの消費電力の中でも、近年の著しいデータセンター拡大による消費電力増加の解決が大きな課題として注目されている。データセンターの省電力を考える上では、データセンターの中核をなすデータベースサーバの省電力技術が重要である。

データベースシステムの省電力技術は、現状では消費電力の

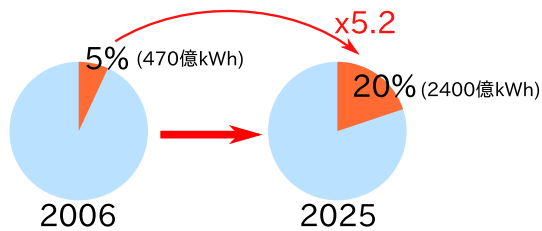


図1 日本国内における IT 機器の消費電力見積り

測定や傾向分析の段階にある。特にトランザクション処理に関しては、基礎的な消費電力の測定や分析も十分に行われていない。

本研究では、オンライントランザクション処理 (OLTP) の消費電力削減を目的として、実稼動するシステム上で OLTP アプリケーションの消費電力と処理性能を測定する環境を構築した。そこで OLTP アプリケーションとして業界標準ベンチマークである TPC-C [3] を実装し、評価に利用した。

オンライントランザクション処理は、データベースシステムの処理の中でも比較的多数のクエリが同時に発行され、データアクセスがランダムであるという特徴を持つ。その上データベース管理システム自体も非常に複雑なソフトウェアである。このように、システムの挙動が複雑であるオンライントランザクション処理の消費電力を解析する上で、システムの基本的な挙動を把握することは重要である。そこで、オンライントランザクション処理における消費電力と処理性能の分析を行うために、システムの主要なコンポーネントであるプロセッサとメモリの消費電力の測定を行った。続いて、構築した測定システムを利用して、既存の省電力技術である Dynamic Voltage and Frequency Scaling (DVFS) を TPC-C に適用した際の電力削減効果の測定を行った。

2. データベースシステムの省電力技術

データベースシステムの省電力技術は近年注目度は高まりつつあるが、未だ取り組みが少ない。特にオンライントランザクション処理に関する取り組みは少なく、TPC-C トップシステムの消費電力増加率と性能向上率の傾向分析 [4] に留まっている。本節では、データベースシステムの主要な処理であるオンライン分析処理とオンライントランザクション処理の2つについて、省電力技術の分野における研究を紹介する。

2.1 オンライン分析処理の省電力技術

オンライン分析処理とは、蓄積された大量のデータを分析することにより意味のある情報を抽出することを目的とした処理であり、ビジネスの意思決定支援などに用いられる。処理の特徴として、ひとつひとつのクエリの実行時間が長く、データの走査、テーブル結合、ソートなどの処理パターンや、データのアクセスパターンが予測しやすい。またオンライン分析処理は多くの場合バッチ処理されるので、全体の処理時間が速いことは求められるが、応答時間への要求は低い。

オンライン分析処理における消費電力削減に関連する取り組みとしては、標準ベンチマーク TPC-H のトップスコアを記録したサーバの性能・電力効率の時系列分析 [5] や、外部ソートのエネルギー効率を評価するベンチマーク [6] の提案、データベースシステム内の処理 (ハッシュジョイン、ソートマージジョインなど) の電力消費分析や、エネルギー効率を高めるシステ

ム設計の指針提案などを行った研究 [7]、TPC-H の性能と消費電力の関係の分析 [8] [9] [10] などがある。

2.2 オンライントランザクション処理の省電力技術

オンライントランザクション処理とは、比較的小規模なトランザクションを低遅延で大量に処理することを目的とした処理であり、ATM やオンラインバンキングのための預貯金管理や、Amazon に代表される電子商取引の情報管理などに用いられる。ひとつひとつのクエリの実行時間は短く、データベースシステムの処理の中でも比較的多数のクエリが同時に実行されるために、データアクセスの挙動は予測しづらい。また、オンライントランザクション処理は、高スループット、低遅延が求められる。

オンライントランザクション処理に関しては、標準ベンチマーク TPC-C のトップスコアを記録したサーバの性能・電力効率の時系列分析 [4] は行われているものの、実際のシステムにおいて精緻な消費電力の測定や分析などは行われてきていない。

そこで本研究では、オンライントランザクション処理における消費電力の削減を目的とし、まずは実稼動するシステムにおいて測定環境を構築し、システムの消費電力の基本測定を行ったほか、既存の省電力技術である DVFS による消費電力の削減効果を検証した。

3. 消費電力測定システムの構築

本節では、実稼動するシステムの消費電力と処理性能を測定し分析するために構築した図2に示す測定システムについて、そのハードウェア構成とソフトウェア構成を説明する。

3.1 ハードウェア構成

本研究では、2種類の実稼動するシステムを構築し測定を行った。実験に用いたマシンは Dell PowerEdge R510 (以下 R510) 及び Dell PowerEdge R900 (以下 R900) である。それぞれのシステムのハードウェア構成を図3に示す。R900 は Core マイクロアーキテクチャプロセッサを、R510 は Core よりも一世代新しい Nehalem マイクロアーキテクチャプロセッサを搭載しているため、メモリ IO やプロセッサの相互接続の形態が異なる。

システムの消費電力は、各マシンの主電源と冗長電源の各電源ケーブルを図2に示すように加工し、クランプ電流計を取り付けて測定した。クランプ電流計の測定データは1秒ごとにデータロガー (Hioki 2332-20 Power Meter Module) によって記録される。データロガーに蓄積された測定データは1分単位で平均値が集計され、イーサネットを通じて測定用サーバマシンから読み出されてディスクに保存される。

3.2 ソフトウェア構成

実験に用いた各システムでは、Linux 2.6.18-194.3.1.el5 を OS カーネルとして利用した。

Linux 上で DVFS を利用するために、cpufreq カーネルモジュールを利用した。今回用いたプロセッサである Intel Xeon X5550 は Intel SpeedStep Technology を搭載しており、ソフトウェア的にプロセッサの performance state (動作周波数と動作電圧の対) を制御することが可能である。cpufreq はこの機能を用いてソフトウェア的に DVFS を実現している。

cpufreq はユーザーが設定したポリシーに基づいて power

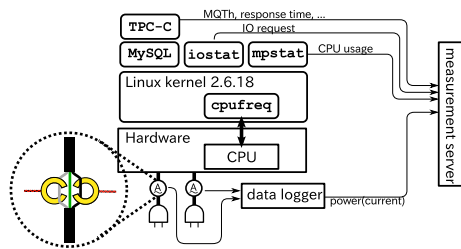


図 2 消費電力測定システムの概略図

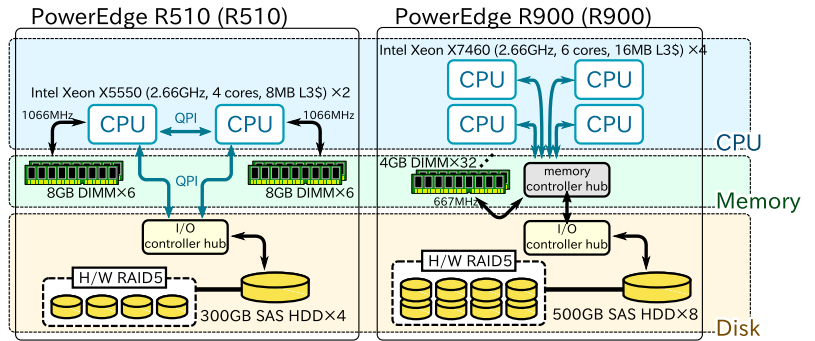


図 3 測定対象のハードウェア構成

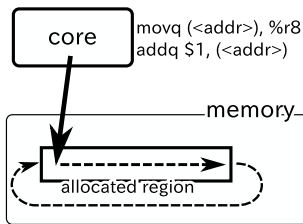


図 4 メモリ操作マイクロベンチマークの概略図

state を制御する。当該システムにおいてユーザーが設定できるポリシーは performance、powersave、ondemand、userspace の 4 種類であるが、今回は userspace のみを用いた。userspace ではユーザーが指定した動作周波数で動作するというポリシーである。ただし、動作可能な周波数はプロセッサごとに異なっており、R510 のプロセッサ Xeon X5550 では 2.66GHz、2.53GHz、2.39GHz、2.26GHz、2.13GHz、2.00GHz、1.86GHz、1.73GHz、1.60GHz の 9 つが選択可能であるが、R900 のプロセッサ Xeon X7460 では 2.67GHz、2.13GHz の 2 つが選択可能である。

オンライントランザクション処理のアプリケーションとして、業界標準ベンチマークである TPC-C を実装した。TPC-C の各パラメータは標準では最新の Revision 5.11 に準拠するように設定されている。図 2 に示すように、TPC-C を実行するデータベース管理システムとしては MySQL 5.1.41 を用いた。

システムの CPU 使用率、IO リクエスト数を測定するために mpstat、iostat を利用した。

それぞれのソフトウェアにより測定された TPC-C の処理性能、CPU 使用率、IO リクエスト数、各種パフォーマンスカウンタの値は、図 2 に示すように全てデータ測定・分析用サーバに集約されるよう設計した。

4. 各コンポーネントの消費電力測定

本節では、システムの各コンポーネントの消費電力を測定する実験を説明する。本実験は、全て R510 の上で行った (図 3 の左側)。

実験を行うにあたり、メモリ操作を行うマイクロベンチマーク memstress を実装した。memstress ベンチマークは、図 4 に示すように指定した大きさのメモリ領域 (64bit unsigned int の配列) を割り当て、指定した時間だけその領域を load & increment する操作を繰り返す。アクセスパターンはシーケンシャルアクセスと、ランダムアクセスの 2 パターンを選択することができる。

表 1 CPU 数を変化させたときの消費電力

| | アイドル時 [W] | アクティブ時 [W] |
|------|-----------|------------|
| 1CPU | 128 | 143 |
| 2CPU | 160 | 196 |
| 差分 | 32 | 53 |

memstress では、行ったメモリ操作の回数と、実行にかかった時間をクロック単位で測定できる。これより、メモリ操作の応答時間 (1 操作あたりに必要なクロック数) や、スループットが求められる。ただし、1 回の load と 1 回の increment を合わせて 1 操作とする。

この節で説明する実験では、特に断りの無い限りプロセッサの動作周波数は最高の周波数 (2.66GHz) に固定して実験を行った。

4.1 プロセッサの消費電力測定

この実験では、プロセッサ (Intel Xeon X5550) 1 個あたりの消費電力及びそのダイナミックレンジを推定するための測定を行った。アイドル時とアクティブ時の消費電力の差分がプロセッサの消費電力のダイナミックレンジである。

測定では、システムから 1 プロセッサを取り外し 1 プロセッサのみ動作している場合と、2 プロセッサともに動作している場合の 2 つのハードウェア構成についてそれぞれアイドル時とアクティブ時のシステムの消費電力を計測し、その差分をプロセッサ 1 個あたりの消費電力の推定値とした。アクティブ時の負荷は前述の memstress をコア数分のスレッドで、割り当てサイズを 1KB とした。割り当て領域が 1KB の場合、アクセス領域は L1 キャッシュ (32KB) よりも十分小さいので、メモリアクセスはほとんど発生せずプロセッサのみがアクティブになる。

結果を表 1 に示す。1CPU のみ動作している場合には、アイドル時とアクティブ時の消費電力の差は 15W、一方 2CPU が動作している場合には 36W であった。前者の数値を 1CPU あたりのダイナミックレンジとすると、後者の数値はその 2 倍になっているはずであるが、実際には 2CPU の場合は 6W 程度多く消費する結果となった。これはおそらく動作するプロセッサが増えたことで、メモリ IO 等のプロセッサ以外の実行時消費電力が増加したためであると考えられる。4.3 節で後述するように、メモリアクセスがほとんどキャッシュヒットする状況においても、メモリ IO による消費電力は発生する。

実験結果より、プロセッサ 1 個あたりの消費電力はアイドル時はおよそ 32W、またダイナミックレンジは 15-18W と推定された。これはシステム全体の消費電力の約 8-9% に相当する。

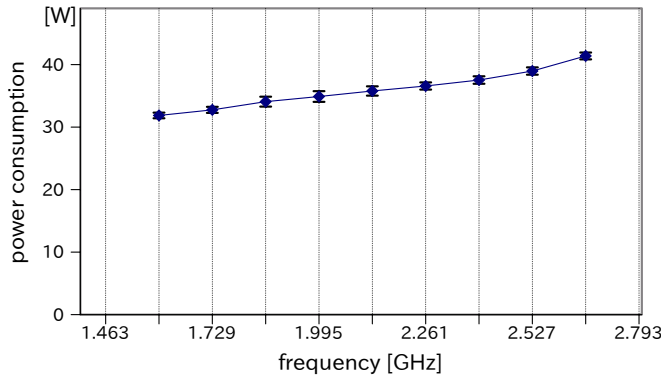


図5 プロセッサの動作周波数と消費電力の関係

当該システムでは2プロセッサ構成なので、システム全体の消費電力において、プロセッサのダイナミックレンジはおよそ16-18%と考えられる。

4.2 プロセッサの動作周波数と消費電力の関係

この実験では、プロセッサの動作周波数が消費電力にどのような影響を与えるかを調べた。

測定は、負荷を与えるアプリケーションとして memstress を1スレッド、割り当てメモリサイズ1KBで実行した。memstressのスレッドを実行するプロセッサコアのCPU使用率100%となるような負荷を固定し、動作周波数を変化させて消費電力を測定した。各設定において5分間の実行を5回繰り返し、平均値を測定値とした。

実験結果を図5に示す。本計測では、1CPUのみアクティブであるので、縦軸は測定値であるシステム全体の消費電力から表1に示したアイドル消費電力を引いた値である。

このグラフより、プロセッサの動的消費電力と動作周波数はおおむね線形の関係にあることが読みとれる。一般的にLSIの実行時消費電力 P は、キャパシタンス C 、電圧 V 、周波数 f に対して

$$P = C \cdot V^2 \cdot f \quad (1)$$

であることが知られている。

図5の1.60GHzから2.39GHzにおいては、消費電力の変化が動作周波数の変化に比例しているが、2.39GHzから2.66GHzではそれ以上に消費電力が増加している。これはDVFSで動作周波数を上げることに伴い動作電圧が上昇しているためと予想される。Intelが発行している記事[11]によると、Core2Duoプロセッサにおいて動作周波数を変化させた場合、ある一定の周波数以下では電圧は変化しないが、ある一定以上の周波数以上では動作周波数の増加に伴い動作電圧も上昇するとされている。この性質がXeon X5550にもあてはまるとすれば、式(1)より消費電力は電圧の変化の2乗に比例するので、2.39GHzから2.66GHzにおいては動作周波数の変化に比例した以上の消費電力変化がおきていと考えられる。

4.3 メモリの消費電力測定

この実験では、メモリアクセスとメモリの消費電力の関係を調べた。

測定は memstress を1スレッドで実行し、シーケンシャルアクセスで行った。各割り当てサイズについて15分の memstress 実行を10回繰り返し、平均値を測定値とした。また、それぞれの測定をメモリ構成48GB(8GB DIMM×6)と16GB(8GB

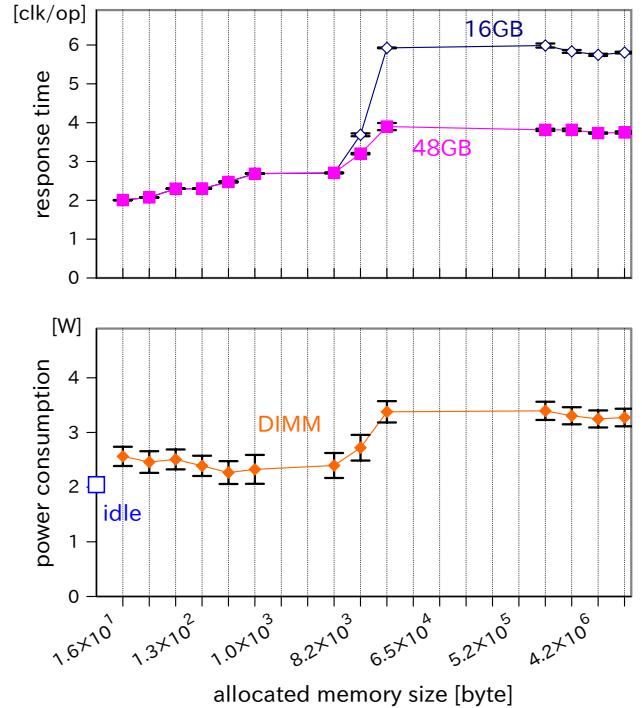


図6 メモリ操作の応答時間とDIMMの消費電力の推定値

DIMM×2)で行い、実行におけるDIMM1本あたりの消費電力の差分を算出し、DIMMの消費電力の推定値とした。またこの際のメモリアクセスの応答時間を測定した。

実験結果を図6に示す。メモリアクセスの応答時間とは、実行にかかったクロック数を実行されたoperationの数で割った数値である。メモリアクセスの応答時間は誤差が最大1%程度であったので、誤差棒を省略した。またDIMM1本あたりの消費電力の推定値は、48GB構成の場合と16GB構成の場合の消費電力の差分をとり、その値をDIMMの本数の差分である4で割って求めた。Y軸上の値はアイドル時の消費電力である。

16GB、48GBのどちらの場合も、割り当てたメモリサイズが8.0MB以上の場合から消費電力が増加し、図6に示した差分も増加している。8.0MB未満の場合にはプロセッサ内のキャッシュにアクセスが閉じているが、サイズ8.0MB以上では実際にメモリアクセスが発生していると考えられる。プロセッサのL3キャッシュは8.0MBであることから推測される。

割り当てメモリサイズが8.0MBのキャッシュよりも小さい場合において、DIMM1本あたりの消費電力がアイドル時より電力を消費しているのは、アクセス領域がキャッシュ内に収まっていたとしても、キャッシュラインの書き戻しなどにより多少のメモリアクセスが発生し、それによる消費電力が生じているからであると考えられる。

サイズが8MB以上の領域では、各構成で応答時間に明らかな差がみられた。これはDIMMの数が増えることでメモリの帯域が大きくなっているためであると考えられる。

このグラフより、アイドル時には2.0W、割り当てメモリサイズがキャッシュよりも小さい場合のDIMMの消費電力はおよそ2.5W、割り当てメモリサイズがキャッシュよりも大きい場合のDIMMの消費電力はおよそ3.3Wであるという結果がえられた。ただし、この実験では1スレッドで実験を行って

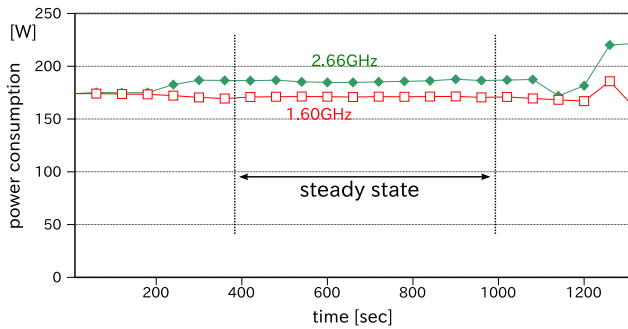


図 7 TPC-C の消費電力の時系列データ (R510)

るため、後者の場合において DIMM の最大消費電力に達していない可能性があり、今後マルチスレッドアクセス時の解析を検討している。

5. TPC-C に DVFS を適用した際の消費電力測定

この実験では、既存の省電力技術である DVFS を TPC-C に適用することで処理性能と消費電力に与える影響を調べることを目的として行った。実験は図 3 に示す R510 と R900 の 2 つのシステムを用いた。

TPC-C のパラメータは基本的に最新の仕様 Revision 5.11 に準拠するよう設定されているが、性能測定時にはシステムの最高性能を測るために特に断りの無い場合は think time = 0 として実行した。また、各トランザクションの混合割合は標準では Payment : Order-Status : Stock-Level : Delivery : New-Order = 43 : 4 : 4 : 4 : 45 とした。Warehouse 数は標準で $W = 100$ と設定し、初期化直後のデータサイズはおよそ 10GB 程度であった。ターミナル数は 50 とした。TPC-C の実行時に計測される値は、各トランザクションの応答時間、1 分ごとの各トランザクションのコミット数、アバート数である。この中から TPC-C が定常状態 [3] である期間のデータを抽出し集計した。TPC-C の処理性能は、New-Order トランザクションのスループット (コミット数/実行時間 [分]) である MQTh[tpmC] を指標として計測した。

TPC-C を実行するデータベース管理システムとしては MySQL 5.1.41 を、ストレージエンジンには InnoDB を用いた。

DVFS には cpufreq モジュールの userspace ポリシーを利用し、プロセッサで使用可能な動作周波数それぞれについて処理性能と消費電力を測定した。

実験結果を図 7, 8 に示す。図 7 には R510 の動作周波数が 2.66GHz と 1.60GHz の場合における消費電力の時系列データを示す。TPC-C の実行が始まり 3 分程度で消費電力の変動が安定する。また実行終了後、後処理や次の測定のための初期化等が始まるために消費電力が再び変動しはじめる。この中で、TPC-C が実行中で消費電力の変動が安定している期間を定常状態とし、この区間のスループットと消費電力を集計に用いた。

図 8 には各動作周波数と消費電力及びスループットの関係を示した。R510、R900 のどちらについても、動作周波数が小さくなるほど消費電力は低下し、またスループットも低下した。

電力効率 (1W あたりのスループット) という観点からみると、R510、R900 とともに動作周波数が上がるにつれて電力効率

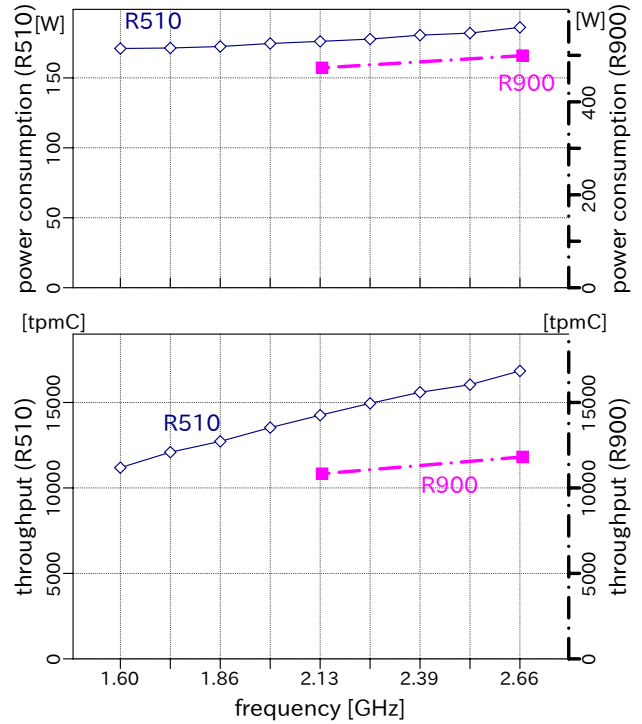


図 8 動作周波数と消費電力・TPC-C スループットの関係

は単調増加するという結果が得られた。R510 に関しては、動作周波数が 1.60GHz と 2.66GHz の場合では、電力効率はそれぞれ 65.4 tpmC/W、90.5 tpmC/W であった。これは、動作周波数が 1.60GHz から 2.66GHz まで 1.67 倍に増加した際に、スループットは 1.51 倍になるのに対してシステムの消費電力変化は 1.09 倍にとどまっているためである。

6. 関連研究

データベース研究の方針を決める上で重要な役割を果たしている The Claremont Report on Database Research の 2005 年版 [12] にて、データベースエンジンの見直すべき項目として省電力技術が指摘された。その他にもデータベースシステムの省電力技術を指摘する文献は多い。Graefe らは、データベースシステムはアプリケーション領域やハードウェアに応じて様々な評価指標に最適化されてきたが、新たな指標としてエネルギー効率を導入するべきであると指摘した [13]。また同著においては、クエリオプティマイザやスケジューラなどの各モジュールが解決すべき課題が提示されている。Harizopoulos らはデータベースシステムの消費電力削減はハードウェアの省電力技術だけでは不十分であり、データベースエンジンの改良が不可欠であることを指摘した [14]。Poess らは TPC-C の歴代トップシステムの消費電力を見積り、消費電力あたりの性能の増加率が十分ではなく、現在の性能向上率が維持すると消費電力の絶対量は増え続けると予測した [4]。また、今後の消費電力削減において鍵となる技術についても触れている。Poess らはオンライン分析処理において、業界標準ベンチマークの TPC-H について同様に分析を行っており [5]、TPC-H の傾向としては電力効率の向上率は十分高いという結果を得た。

データベースシステムの中でも、オンライン分析処理に関し

ては比較的省電力技術への取り組みが多く見られる。Henkelらはシステムの各コンポーネントの詳細な消費電力の測定を行い、最適なハードウェア構成を調べた[15]。Poessらは様々なハードウェア構成における消費電力と性能の関係を分析した[8]。Dimitrisらはハッシュ結合、ソートマージ結合などのデータベースシステムにおける基本的な操作の消費電力の分析や、エネルギー効率を最も高めるようなシステム設計の指針を提案した[7]。Langらはプロセッサの省電力モードを活用する手法とクエリスケジューラを改善することで消費電力を削減する手法を提案した[16]。Zichenはヒューリスティックな手法ではなく、制御理論を用いた電力モデルによってクエリオプティマイザを構築することで、データベースシステムの消費電力を削減する手法を提案した。

7. おわりに

本研究では、まずオンライントランザクション処理の消費電力測定のためにTPC-Cを実装し、測定システムを構築した。そして、TPC-Cの消費電力を解析するための基礎的なデータとして、システムの主要なコンポーネントであるプロセッサとメモリの消費電力を測定した。

プロセッサに関しては、実験に用いたサーバハードウェア(R510)において、ダイナミックレンジが全体の消費電力の16-18%程度であることを確認した。

メモリに関しては、同ハードウェアにおいてメモリアクセスがほぼ全てキャッシュヒットする場合には当該システムのDIMM1本あたり2.5W、実際のメモリアクセスが頻繁に発生する場合には3.3Wの電力を消費することがわかった。

また、DVFSをTPC-Cに適用した際の効果を評価するために、動作周波数を変化させてその消費電力や処理性能を測定した。その結果、動作周波数を低くすると消費電力は低減されたが、スループットも低下した。また、R510とR900ともに動作周波数が高いほど電力効率が高いことが確認された。

今後はさらに詳細にTPC-Cの消費電力を分析することで、消費電力を削減する余地を探っていく。そのために、各コンポーネントの消費電力モデルを構築し、それを用いてTPC-C実行時における消費電力の低減効果を検証する。

文 献

- [1] EPA. Epa report to congress on server and data center energy efficiency. Technical report, U.S. Environmental Protection Agency, 2007.
- [2] 商務情報政策局. グリーンITイニシアティブ. Technical report, 経済産業省, May 2008.
- [3] Kim Shanley. Tpc releases new benchmark: Tpc-c. *SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 20(2):8–9, 1992.
- [4] Meikel Poess and Raghunath Othayoth Nambiar. Energy cost, the key challenge of today's data centers: a power consumption analysis of tpc-c results. *Proc. VLDB Endow.*, 1(2):1229–1240, 2008.
- [5] Meikel Poess and Raghunath Othayoth Nambiar. A power consumption analysis of decision support systems. In *WOSP/SIPEW '10: Proceedings of the first joint WOSP/SIPEW international conference on Performance engineering*, pages 147–152, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [6] Suzanne Rivoire, Mehul A. Shah, Parthasarathy Ranganathan, and Christos Kozyrakis. Joulesort: a balanced energy-efficiency benchmark. In *SIGMOD '07: Proceed-*

- ings of the 2007 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, pages 365–376, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [7] Dimitris Tsirogiannis, Stavros Harizopoulos, and Mehui A. Shar. Analyzing the energy efficiency of a database server. In *SIGMOD '10: Proceedings of the 36th SIGMOD international conference on Management of data*, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [8] Meikel Poess and Raghunath Othayoth Nambiar. Tuning servers, storage and database for energy efficient data warehouses. In *Proceedings of the 26th International Conference on Data Engineering, ICDE 2010*, pages 1006–1017, 2010.
- [9] Zichen Xu, Yi-Cheng Tu, and Xiaorui Wang. Exploring power-performance tradeoffs in database systems. In *Proceedings of the 26th International Conference on Data Engineering, ICDE 2010*, pages 485–496, 2010.
- [10] Justin Meza, Mehul A. Shah, Parthasarathy Ranganathan, Mike Fitzner, and Judson Veazey. Tracking the power in an enterprise decision support system. In *ISLPED '09: Proceedings of the 14th ACM/IEEE international symposium on Low power electronics and design*, pages 261–266, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [11] Alon Navehand, Efraim Rotemand, Avi Mendelsonand, Simcha Gochmanand, Rajshree Chabukswarand, Karthik Krishnanand, and Arun Kumarn. Power and thermal management in the Intel®Core™Duo processor. *Intel®Technology Journal*, 10, May 2006.
- [12] Rakesh Agrawal, Anastasia Ailamaki, Philip A. Bernstein, Eric A. Brewer, Michael J. Carey, Surajit Chaudhuri, AnHai Doan, Daniela Florescu, Michael J. Franklin, Hector Garcia-Molina, Johannes Gehrke, Le Gruenwald, Laura M. Haas, Alon Y. Halevy, Joseph M. Hellerstein, Yannis E. Ioannidis, Hank F. Korth, Donald Kossmann, Samuel Madden, Roger Magoulas, Beng Chin Ooi, Tim O'Reilly, Raghu Ramakrishnan, Sunita Sarawagi, Michael Stonebraker, Alexander S. Szalay, and Gerhard Weikum. The claremont report on database research. *SIGMOD Rec.*, 37(3):9–19, 2008.
- [13] Goetz Graefe. Database servers tailored to improve energy efficiency. In *Proceedings of EDBT'08 Workshop on Software Engineering for Tailor-made Data Management*, pages 24–28, 2008.
- [14] Stavros Harizopoulos, Mehul A. Shah, Justin Meza, and Parthasarathy Ranganathan. Energy efficiency: The new holy grail of data management systems research. In *CIDR 2009, Fourth Biennial Conference on Innovative Data Systems Research*, 2009.
- [15] Justin Meza, Mehul A. Shah, Parthasarathy Ranganathan, Mike Fitzner, and Judson Veazey. Tracking the power in an enterprise decision support system. In *Proceedings of the 2009 International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pages 261–266, 2009.
- [16] Willis Lang and Jignesh M. Patel. Towards eco-friendly database management systems. In *CIDR 2009, Fourth Biennial Conference on Innovative Data Systems Research*, 2009.