

プロセッサ動作モード制御による 分析指向問合せ処理の省電力化効果の測定

羅 博明[†] 早水 悠登^{††} 合田 和生^{††} 喜連川 優^{††,†††}

[†] 東京大学大学院情報理工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

^{††} 東京大学生産技術研究所 〒153-0041 東京都目黒区駒場 4-6-1

^{†††} 国立情報学研究所 〒100-1003 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2

E-mail: †{luo,haya,kgoda,kitsure}@tkl.iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし データセンタにおける消費電力量は世界的に年々増え続けており、省電力化への要請が高まっている。データセンタで主要な役割を担うデータベースシステムの省電力化を目指し、本研究では分析指向問合せ処理を対象として、プロセッサ動作モードの制御によりエネルギー効率が向上可能であることを示す。著者らがオープンソースのデータベース管理システム上で分析処理ベンチマークを用いた実験を示し、プロセッサ動作モード制御が性能や消費電力に与える影響について考察する。

キーワード データベースシステム、プロセッサ動作モード制御、問合せ処理、省電力化、エネルギー効率

1. はじめに

様々な応用分野において大規模データの活用が注目を集めている。所謂ビッグデータブームに牽引される形で、増え続けるデータ量の格納と処理のために IT 資源も増加する傾向にあり、それと同時にデータセンタにおける消費電力量も増加の一途を辿っている。天然資源防護協議会の報告によると、2013 年の段階で米国においてデータセンタは 910 億 kWh に上る膨大なエネルギーを消費しており、2020 年には 1400 億 kWh にまで増加すると予測されている [1]。このようなデータセンタにおける消費電力量増加の傾向は米国においてのみでなく世界的に観測されており、維持コスト削減の面でも環境保全の面でもデータセンタにおける省電力化の取り組みは急務である。

データセンタにおける省電力化のための手法の一つとして、そのコアとなるソフトウェアであるデータベースシステムの省電力化がある。データベースシステム上で処理されるアプリケーションの中でも、大規模データ分析における重要なワークロードである分析指向問合せ処理においては、省電力化の取り組みがますます重要となることが見込まれる。本論文ではディスクストレージを用いたデータベースシステムにおける分析指向問合せ処理を対象として、プロセッサ動作モード制御を行うことによる省電力化の余地に関して議論を行う。それに基づき、異なる動作モードを利用した際の分析指向問合せ処理の電力特性を実験的に確かめ、プロセッサ動作モード制御による省電力化の有効性と有効範囲を示す。

本論文は次のような構成からなる。第 2 節ではデータベースシステムの省電力化に関する取り組みについて述べる。第 3 節では著者らが着目する分析指向問合せ処理におけるプロセッサ動作モード制御の性能と消費電力への影響に関して述べる。第 4 節では TPC-H ベンチマークを利用した計測実験について述べる。第 5 節では本論文の総括と今後の展望を述べる。

2. 関連研究

データベース分野における省電力化のためのアプローチは、ハードウェアレベルやシステムレベルのアプローチが多く見られる。ハードウェアレベルでは、データセンタに設置されているサーバのハードウェアコンポーネント（プロセッサ、メモリ、ストレージ等）や冷却装置（ファン、水冷クーラ等）といったハードウェア資源そのものを従来よりも省電力化することによって消費電力量削減を行う。システムレベルでのアプローチは、例えば OS レベルでの電力制御や温度管理において省電力化の余地を見出すものである。Lefurgy らはサーバーを構成する代表的なコンポーネントに関して包括的な議論を行っている [2] 他、プロセッサ [3-5]、メモリコントローラ [6]、ストレージシステム [7-10]、冷却装置 [11,12] 等を対象としたものが挙げられる。このようなハードウェアレベル・システムレベルにおけるエネルギー効率改善の模索は、アプリケーションには依存することがなく、省電力化において基本となるアプローチである。

システムのエネルギー効率を考慮する上では、エネルギー比例性（Energy Proportionality）と呼ばれる概念も重要である。利用率と消費電力量の関係が比例関係となるようなシステムはエネルギー比例性があるシステムだと見なすことができ、そのようなシステムでは利用率に関わらず一定のエネルギー効率を保つことができる。エネルギー比例性のあるシステムを構築することができれば大きな省電力化につながることを示されている [13] が、現状のシステムはハードウェアの性質上一般的にアイドル状態でも消費電力が無視できないほど高く、エネルギー比例性とはかけ離れている。これに対し Tolia ら [14] は仮想環境を用いることで現状のシステムにおいてもエネルギー比例性のあるシステムに近づけられる可能性を示した。

また、データベースシステムの省電力化も近年注目を集めて

いる。これは、従来のデータベースシステムがスループット向上とレイテンシ低下を重点においた性能指向の考えで開発されてきたのに対して、エネルギー効率の視点をデータベースシステムに取り入れることで省電力化を目指すものである。アプリケーションレベルにおける省電力化、特にデータベースシステムにおける省電力化の議論は、The Claremont report [15] においてエネルギー効率を考慮したデータベースシステムを構築することの重要性が指摘されて以降に本格化した。データベースシステムの省電力化推進のために、エネルギー効率を考慮したベンチマークの出現や従来のベンチマークにエネルギー効率の指標を取り入れる動きがある [16, 17]。Harizopoulos ら [18] は、性能向上のための変更がある程度進むとエネルギー効率が下がるようなケースを実験的に示し、データベースシステムに求められるソフトウェア的な変更に関して議論している。Graefe [19] は、データベースシステムの省電力化を考える上では、問合せ最適化、プロセッサや I/O のスケジューリング、データベース構築のデザインやデータ更新法を見直す必要性があることを指摘した。Goda ら [20] はレプリケーションシステムにおける二次系のストレージ電源制御手法を提案した他、Nishikawa ら [21] はアプリケーションの I/O パターン毎に適切なストレージの省電力化制御を行う手法を提案した。

分析指向問合せ処理に関して見ると、ハードウェアコンポーネントの構成に関する議論から始まり [22, 23]、昨今では問合せ最適化を改善するアプローチに関して多く研究されている [24-31]。問合せ最適化にエネルギー効率の指標を取り入れる議論は初期では 20 年前に行われていたが [32]、ここ 10 年で盛んに取り組まれた。

プロセッサ動作モード制御は、現状は一般的には OS レベルで行われている。これは、CPU 使用率やディスク IO 等のシステムレベルでの統計情報を元に動的制御するものである。アプリケーションレベルでのプロセッサ動作モード制御は、オンラインランザクション処理に適用されその有用性が示された [33, 34] が、オンライン分析処理のような分析指向問合せ処理においてはまだ前例がない。

3. プロセッサ動作モード制御が分析指向問合せ処理に与える影響

本節ではプロセッサ動作モード制御の説明と、プロセッサ動作モード制御が分析指向問合せ処理に与える影響に関して述べる。

3.1. Dynamic Voltage and Frequency Scaling を利用したプロセッサ動作モード制御

昨今のプロセッサは多くが Dynamic Voltage and Frequency Scaling (DVFS) と呼ばれる、システム稼働中に動作モードを変更できる機能を搭載している。ここでいう動作モードは、動作周波数と動作電圧の対によって表される。例えば Intel 社の Xeon プロセッサ上では Intel SpeedStep Technology と呼ばれる機能を利用することができ、特定のレジスタに値を書き込むことによってソフトウェア的にプロセッサの動作モードを制御することができる。

プロセッサ動作モード制御が消費電力に与える影響を考える上では、プロセッサの動作状態を考える必要がある。プロセッサの動作状態は大きく分けて、アイドル状態と負荷状態の二状態に分けられる。このうち、アイドル状態では C-State と呼ばれる状態に移行することでクロックのゲーティングや供給電圧の制限を行うため、消費電力は動作周波数と動作電圧には依存せずほぼ一定である。対して負荷状態における消費電力は、動作周波数と動作電圧を低下させることによって削減することが可能である。一般的に LSI における負荷状態の消費電力 P は動作周波数を f 、動作電圧を V とすれば $P \propto fV^2$ の関係で表されるので、プロセッサにおいても同様の関係が成り立つ。したがって、負荷状態下の適切なタイミングにおいて DVFS 機能を用いてプロセッサ動作モード制御を行うことで、動作モードを高性能なものに固定した時と比べて消費電力削減に繋がり省電力化が可能となる。

3.2. 分析指向問合せ処理への影響

プロセッサ動作モード制御が処理に与える影響を考える上では CPU 使用率に着目する必要がある。高周波数の動作モードよりも低周波数な動作モードの方がエネルギー効率が向上するためには、それによる消費電力の低下割合がスループットの低下割合に比べて大きい必要がある。一般的に高周波数の動作モードと低周波数の動作モードとの間でスループットの差異が小さくなるのは CPU 使用率が 100% に達していない場合である。逆に高周波数の動作モードで CPU 使用率が 100% の状況下では、スループットの著しい低下が予想される。

ディスクストレージを用いる場合、処理の律速要因としてはディスクの IO 性能とプロセッサの演算性能の 2 つが考えられる。ディスクアクセスによるデータ取得のスループットがプロセッサによる演算処理のスループットよりも遅い場合にはディスク律速となり、逆の場合にはプロセッサ律速となる。そこで本論文では、ディスクとプロセッサのどちらにより律速されるかに着目し、動作モード制御による影響を定性的に議論する。

ディスク律速である処理の最中はディスクアクセスによるデータ取得を待つ必要があるため、CPU 使用率は 100% 未満となる。このような場合は、高周波数の動作モードと低周波数の動作モード間でスループットの差異は小さいと見込まれ、低周波数の動作モードにすることによるエネルギー効率向上が予想される。しかし、エネルギー効率向上の割合は CPU 使用率の数値に強く依存する。CPU 使用率の傾向が異なるようなワークロードとして典型的なのは、全表走査と索引走査が挙げられる。全表走査はストレージ上のデータに対してシーケンシャルにアクセスを行うのに対し、索引走査はストレージ上のデータに対してランダムにアクセスする。一般的に後者は前者に比べてレイテンシが 10 倍～100 倍程度になることが知られている。そのため、ランダムな走査は極端にディスク律速な処理となることが多く、CPU 使用率はシーケンシャルな走査に比べて大幅に低い傾向にある。CPU 使用率が極端に低い処理においては、低周波数の動作モードであった場合でも、ほとんどの時間はアイドル状態にいるため電力削減効果は比較的小さい。この場合、実行時間はほぼ変わらないためエネルギー効率はほとん

表 1: ハードウェア構成

CPU	Intel Xeon E5-1603 v4 @ 2.8 GHz
メモリ	DDR4 8192 MB DIMM (2133 MHz) × 4
ストレージ (OS)	SKhynix SC300 (256 GB)
ストレージ (DB)	Seagate BarraCuda (2 TB, 7200 rpm)

ど違いがない。したがって、効果的な電力削減とエネルギー効率向上が見込めるのは、CPU 使用率が一定程度高い時であると予想される。

逆にプロセッサ律速である場合には、低周波数の動作モードだとエネルギー効率は下がると予想される。これは、スループット低下の割合が動作クロック低下の割合と等しいのに対して、プロセッサの消費電力はシステム全体の消費電力の一部でしかないことから消費電力削減の割合が動作クロック低下の割合よりも低くなるためである。

以上から、CPU 使用率を u とした時、分析指向問合せ処理においてプロセッサ動作モード制御を行った際には処理を次の三つのカテゴリのいずれかに分類することが可能である。

- (i) エネルギー効率ほぼ一定: $u < u_{low}$ で、動作モードの制御によりエネルギー効率がほとんど変わらない処理
- (ii) エネルギー効率向上: $u_{low} \leq u \leq u_{high}$ で、動作モードの制御によりエネルギー効率が向上する処理
- (iii) エネルギー効率低下: $u_{high} < u$ で、動作モードの制御によりエネルギー効率が低下する処理

ここで、 u_{low}, u_{high} は動作クロックの可動域と設定粒度をはじめとしたシステム設定や、プロセッサやストレージといったコンポーネントの特性等のシステム環境に依存するパラメータである。

4. 分析指向問合せ処理の性能・電力特性計測

本節では、第 3 節で議論された分析指向問合せ処理におけるプロセッサ動作モード制御のエネルギー効率向上に対する影響を検証するために行った、オープンソースのデータベース管理システム PostgreSQL と TPC-H ベンチマークを利用した計測実験に関して述べる。

4.1. 測定環境

測定に利用した環境に関して、ハードウェア構成とソフトウェア構成を述べる。

最初にハードウェア構成を述べる。サーバには HP Z440 Workstation を利用した。サーバのハードウェア構成を表 1 に示す。システムの消費電力の計測のために、ハードウェアの給電システムを高精度電力計 Yokogawa WT1800 の電力測定回路を経由させて接続することでハードウェア全体に供給されている電力に関するデータを 20 Hz で取得した。

次にソフトウェア構成を述べる。OS カーネルとして Linux 3.10.0 を利用し、DVFS 機能には `cpufreq` と呼ばれるカーネルモジュールを利用した。`cpufreq` を利用することでユーザが指定した動作モードでプロセッサを動作させることが可能であ

表 2: PostgreSQL のメモリ割当関連の設定項目

<code>shared_buffers</code>	4096 MB
<code>temp_buffers</code>	2048 MB
<code>work_mem</code>	2048 MB

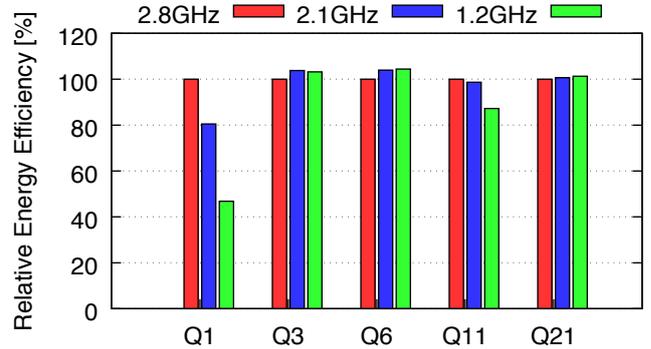


図 1: TPC-H の各問合せの単独実行時のエネルギー効率 (2.8 GHz の時からの相対値)

る。今回搭載されている Xeon E5-1603 v4 にて利用できる動作モードとしては 16 段階用意されており、それぞれが特定の動作クロックに対応している。(1.2 GHz~1.2 GHz, 1.2 GHz~1.2 GHz)。データベース管理システムにはオープンソースである PostgreSQL 9.6.3 [35] を、オンライン分析処理のベンチマークとして TPC-H 2.17.2 [36] を利用し、スケールファクタ=100 で HDD 上にデータベースを構築した。TPC-H は意思決定支援システムの業界標準ベンチマークとして広く使われている。PostgreSQL のためにメモリ上に割り当てるキャッシュサイズ等は表 2 に示すように設定した。また、表に示していない設定値に関してはデフォルト値を利用した。マシンに関するリアルタイム統計情報を得るために、`sysstat` パッケージが提供する `sar` コマンドを通じて CPU 使用率のデータを、kernel が提供する `diskstats` 統計データを通じてディスクの IO 速度をそれぞれ 1 Hz で取得した。

第 3 節にて述べた通り、プロセッサ動作モード制御の処理に対する影響は処理の特性ごとに異なるはずである。これを検証するために、異なる動作クロックに対応する動作モードの下でシステムに単独の分析指向問合せ処理をさせた際のスループット、平均消費電力を複数種類の問合せに関して計測した。エネルギー効率はスループットを平均消費電力で割ることで算出している。TPC-H ベンチマークには 22 種類の問合せが存在しそれぞれに固有のインデックスが付与されているが、その中から 5 つの特徴的な問合せを選出し、システムの動作クロックを 2.8 GHz, 2.1 GHz, 1.2 GHz の 3 通りで処理させた際の影響を見た。加えて、今回用いたサーバのプロセッサは 4 つのコアを備えていることから、同一インデックスの問合せ同士をデータの選択範囲のみ変更して多重度 4 で同時実行させる実験も行った。

4.2. 単独実行の分析指向問合せ処理における結果

単独の分析指向問合せ処理をさせた結果を、図 1, 2, 3 に示す。図 1 から、高周波数の動作モードに比べ低周波数の動作

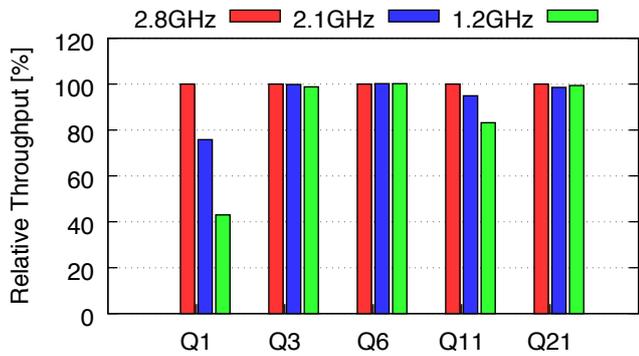


図 2: TPC-H の各問合せの単独実行時のスループット (2.8 GHz の時からの相対値)

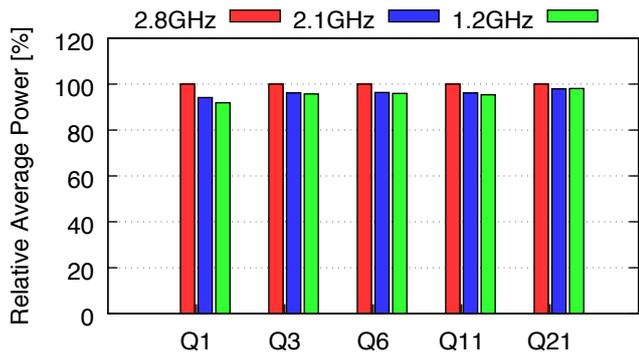


図 3: TPC-H の各問合せの単独実行時の消費電力 (2.8 GHz の時からの相対値)

モードでエネルギー効率が上がる問合せと下がる問合せが存在することが確認できる。このように問合せごとに傾向が分かれるのは、既に述べたようにスループットの低下割合と消費電力の低下割合の大小が処理の性質毎に異なるためである。

図 2 を見ると、動作クロックを下げることによりスループットは概ね下がる傾向にあるが、その低下割合は問合せによって大きく異なる。Q1 と Q11 は顕著なスループット低下が見られ、特に Q1 ではスループットの大幅な低下が見られた。Q1 は一つのテーブルをシーケンシャルに走査して集約演算を行う問合せであり、実験環境においてはプロセッサ律速である。つまり Q1 は (iii) エネルギー効率低下に属する処理のみだと言える。実際、Q1 はスループットの低下割合は動作クロックの低下割合にほぼ等しくなっている。また、図 4 に Q1 の経時変化を示すが、どの動作モードにおいても処理全体を通して CPU 使用率は 100% に近い値になっており、Q1 がプロセッサ律速であることが確認される。Q11 の場合は、Q1 と比べるとスループットの低下割合が相対的に小さい。図 5 に Q11 の経時変化を示すが、処理開始から 70 秒程度まではディスク律速となっており、それ以降はプロセッサ律速となっている。よって、Q11 は (iii) エネルギー効率低下と (ii) エネルギー効率向上に属する処理に分けられる。今回の実験条件では、(iii) エネルギー効率低下の影響が (ii) エネルギー効率向上に比べて大きかったために、問合せ全体のスループットの低下割合が消費電力の低下割合よりも大きくなっているのだと解釈できる。このように動作モー

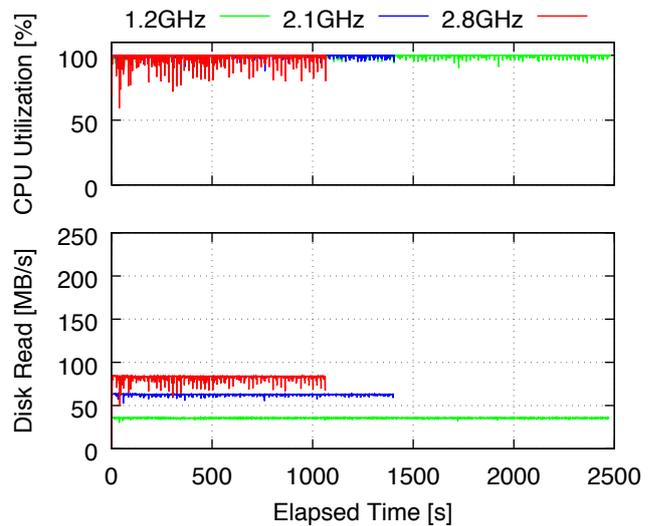


図 4: Q1 を単独実行時の CPU 使用率とディスク速度の経時変化

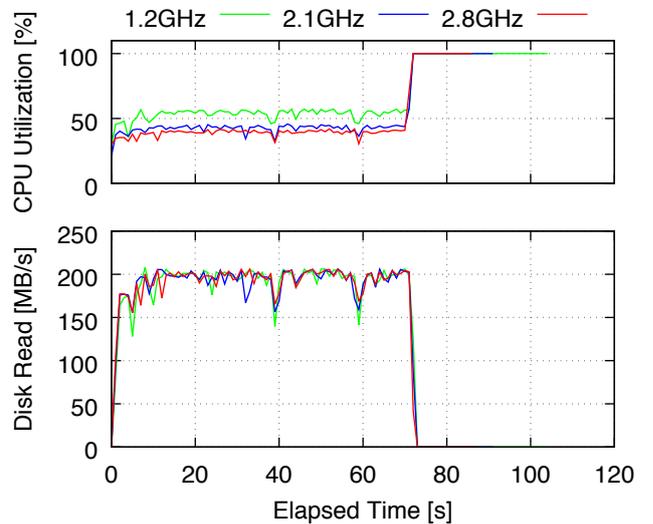


図 5: Q11 を単独実行時の CPU 使用率とディスク速度の経時変化

ドの違いによりスループットが大きく影響を受けるような問合せでは、低周波数の動作モードにおけるエネルギー効率低下の傾向が見られる。2.8 GHz のモードに対する 1.2 GHz のモードのエネルギー効率の減少割合としては、Q1 が 53.2%、Q11 が 12.8% の減少となっている。

それに対して、スループットの低下割合が小さいのが Q3、Q6、Q21 である。それぞれの経時変化を図 6、7、8 に示す。ここで、Q3 と Q6 はともにテーブルへのアクセスはシーケンシャルな走査のみである。それと同時に、Q1 のような複数の集約演算を行う問合せに比べると単位時間あたりのプロセッサの演算処理量が相対的に少ない。そのため全体を通じてディスク律速の処理が続くが、CPU 使用率は 40%~60% 程度になっており、これらは (ii) エネルギー効率向上処理のみだと言える。Q3 は最後に CPU 使用率が 100% に達しており (iii) エネルギー効率低下処理が存在しているが、実行時間全体の 2% 程度となっ

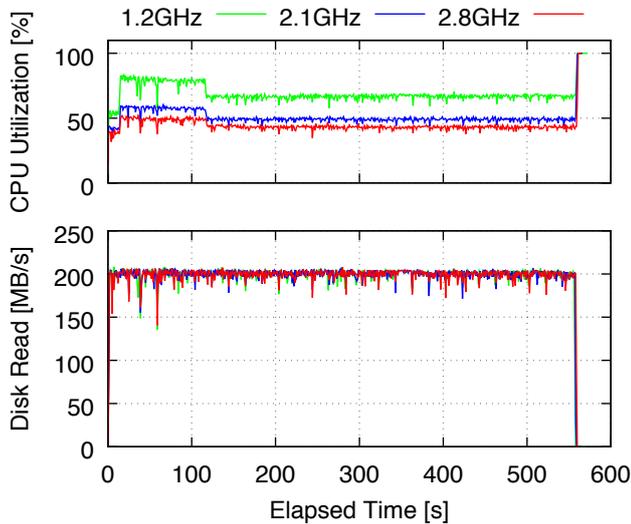


図 6: Q3 を単独実行時の CPU 使用率とディスク速度の経時変化

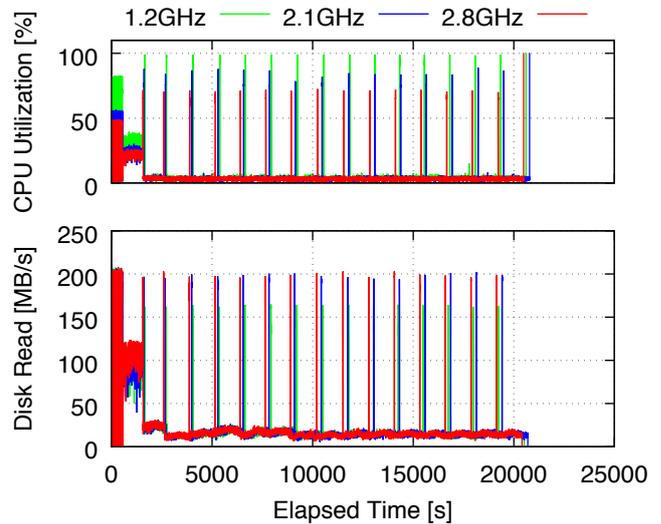


図 8: Q21 を単独実行時の CPU 使用率とディスク速度の経時変化

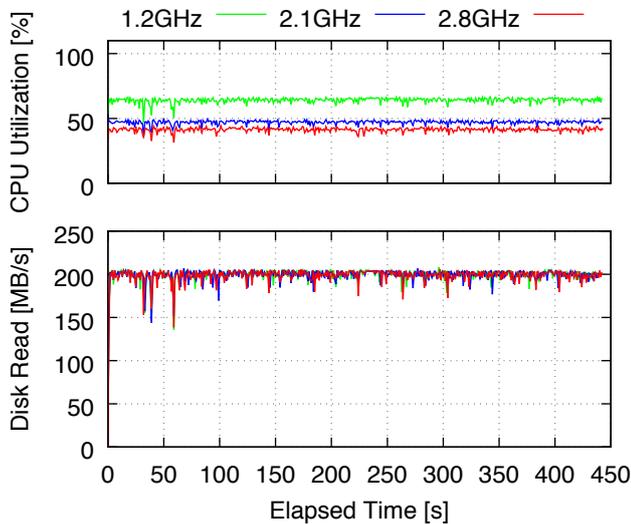


図 7: Q6 を単独実行時の CPU 使用率とディスク速度の経時変化

ており無視できる (図 6)。このため低周波数の動作モードでもディスク読み取り速度が落ちておらず、スループットへの影響が無視できる程度に小さい。このような場合は、消費電力の低下割合がスループットの低下割合を上回るため、エネルギー効率が向上する。2.8 GHz のモードに対する 1.2 GHz のモードのエネルギー効率の増加割合としては、Q3 が 3.2%、Q6 が 4.4% の向上となっている。対して、Q21 に関しては処理開始から 1200 秒近くまでのシーケンシャルアクセスを伴う処理の間は CPU 使用率が 0%~80% で揺れているが、その後はランダムアクセスが続いており、CPU 使用率が 10% 以下の範囲で推移している。つまりプロセッサがアイドル状態にいる時間がこれまで見てきた問合せの中では長い。このような (i) エネルギー効率ほぼ一定の処理が実行時間の 90% 以上を占めるような問合せでは、消費電力の低下割合が相対的に小さいため、2.8 GHz のモードに対する 1.2 GHz のモードのエネルギー効率

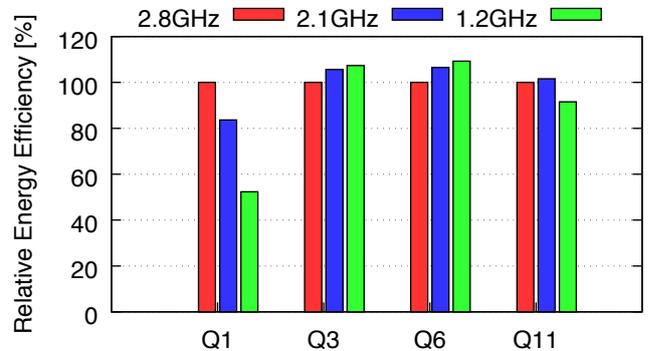


図 9: TPC-H の各問合せの多重度 4 による同時実行時のエネルギー効率 (2.8 GHz の時からの相対値)

の増加割合は 1.3% となっている

よって、エネルギー効率の変化の傾向として、第 3 節における議論と同様な区分を行うと以下の三つに大きく分けられる。

- (i) エネルギー効率ほぼ一定: 動作クロックによらずエネルギー効率がほぼ一定である問合せ (Q21)
- (ii) エネルギー効率向上: 動作クロック低下によりエネルギー効率が向上する問合せ (Q3, Q6)
- (iii) エネルギー効率低下: 動作クロック低下によりエネルギー効率が低下する問合せ (Q1, Q11)

4.3. 同時実行の分析指向問合せ処理における結果

次に同種の問合せが複数同時にされる際の挙動を観測するため、データの選択範囲のみが異なる同一インデックスの問合せを多重度 4 で実行し、スループットと消費電力を計測した。計測は Q1, Q3, Q6, Q11 を対象として行った。その結果を図 9, 10, 11 に示す。同時実行した場合においても、単独実行の実験で確認された問合せごとの傾向は変わらず、元々単独実行の際にエネルギー効率が向上していたものは同時実行でも向上しており、単独実行で効率が低下していたものは同時実行でも低下

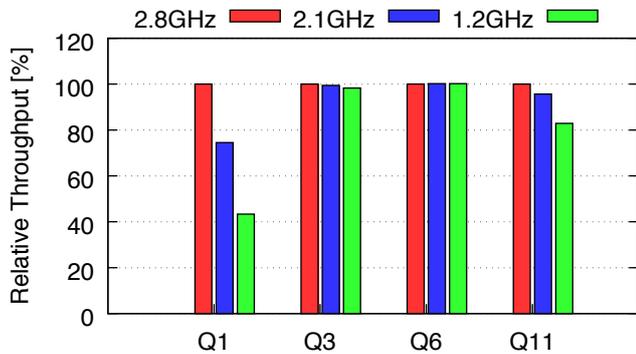


図 10: TPC-H の各問合せの多重度 4 による同時実行時のスループット (2.8 GHz の時からの相対値)

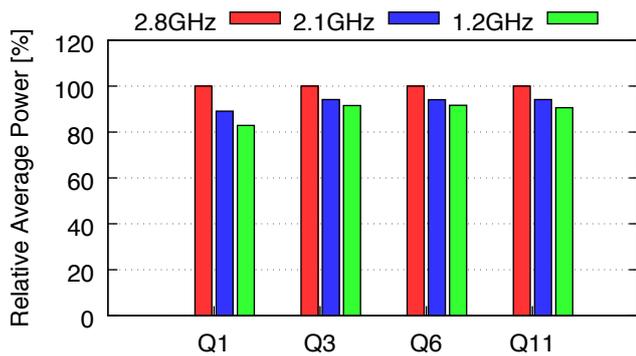


図 11: TPC-H の各問合せの多重度 4 による同時実行時の消費電力 (2.8 GHz の時基準)

している。しかし、効率の変化割合は単独実行の時は異なっている。効率が低下していた Q1 と Q11 は、単独実行時に比べて同時実行時はエネルギー効率の低下割合が小さく、2.8 GHz のモードに対する 1.2 GHz のモードのエネルギー効率の減少割合としては、Q1 が 47.7%、Q11 が 8.5% の減少となっている。対して、効率が向上していた Q3 と Q6 は、単独実行時に比べて同時実行時はエネルギー効率の上昇割合が大きく、2.8 GHz のモードに対する 1.2 GHz のモードのエネルギー効率の増加割合としては、Q3 が 7.4%、Q6 が 9.3% の増加となっている。これは、問合せが複数個同時実行されることで複数のプロセッサコアが同時に駆動され、単独実行時に比べて低周波数の動作モードにおける消費電力の低下割合が大きくなったことに起因している。これに対してスループットは同時実行にしてもその低下割合は大きく変化していない。その要因としては以下のことが考えられる。今回は同時実行に使われる問合せの間で異なるのがデータの選択範囲のみであったが、それらの問合せは全てテーブルへのアクセスはシーケンシャルアクセスのみであった。この場合、同時実行される問合せはディスクへのアクセス範囲としては相違がなく、単独実行の時に比べてディスクアクセスを追加で行う必要はない。そのためスループットは単独実行の時と比べて大きく差異が出ていない。Q1 と Q6 の同時実行時の経時変化を図 12, 13 に示すが、いずれのコアにおいても CPU 使用率の挙動が概ね一致しており、各問い合わせの実行の進捗がほぼ同程度の状態で処理が進行している様子が読み

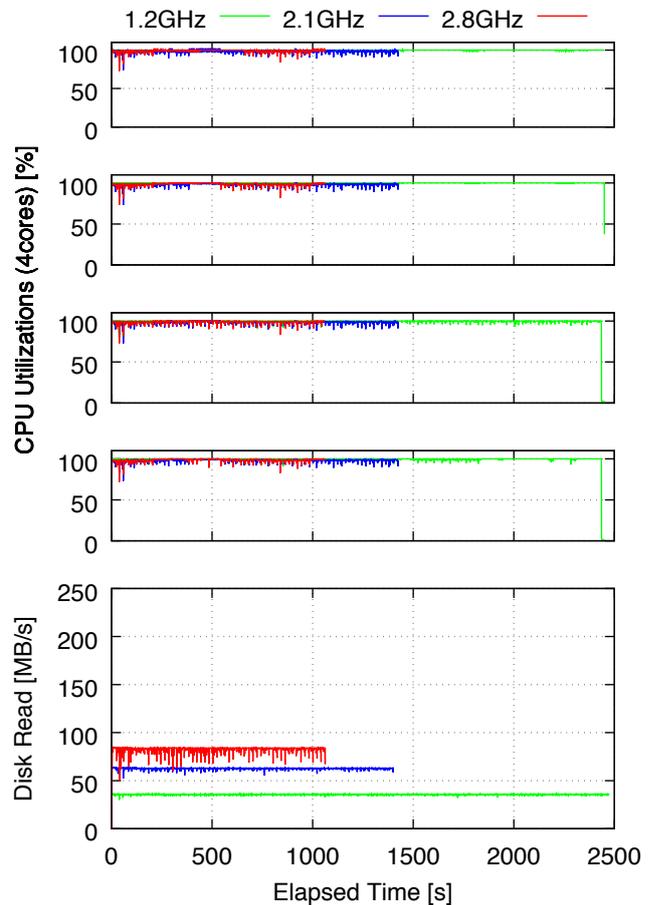


図 12: Q1 を多重度 4 で同時実行時の CPU 使用率とディスク速度の経時変化

取れる。また、Q11 に関しては 2.1 GHz の時のエネルギー効率は 2.8 GHz のそれよりも高いという結果になっている。以上から、マルチコア環境において問合せを同時実行した際には単独実行した際と比べてプロセッサの動作モード切り替えによる消費電力への影響が大きく、エネルギー効率向上が見込まれる問合せでは更なる効率の向上が可能であることが分かる。

5. おわりに

本論文では、データベースシステムの省電力化を目的として、分析指向問合せ処理を対象としたプロセッサ動作モード制御による省電力化の影響を測定した。分析指向問合せ処理においても動作モード制御が有効であるケースとそうでないケースが存在することを議論し、異なる動作周波数の下で TPC-H ベンチマークの各問合せを処理させることでそれを確かめたのと同時に、特定の問合せにおいては動作周波数低下によりエネルギー効率向上が 4.4% 程度、多重度 4 で同時実行の際には 9.3% 可能であることを示した。

今後の課題として、データベース管理システムの負荷の特性に応じてプロセッサ動作モード制御を行い、エネルギー効率を向上させるの手法の設計とその有効性の確認を進めていきたい。

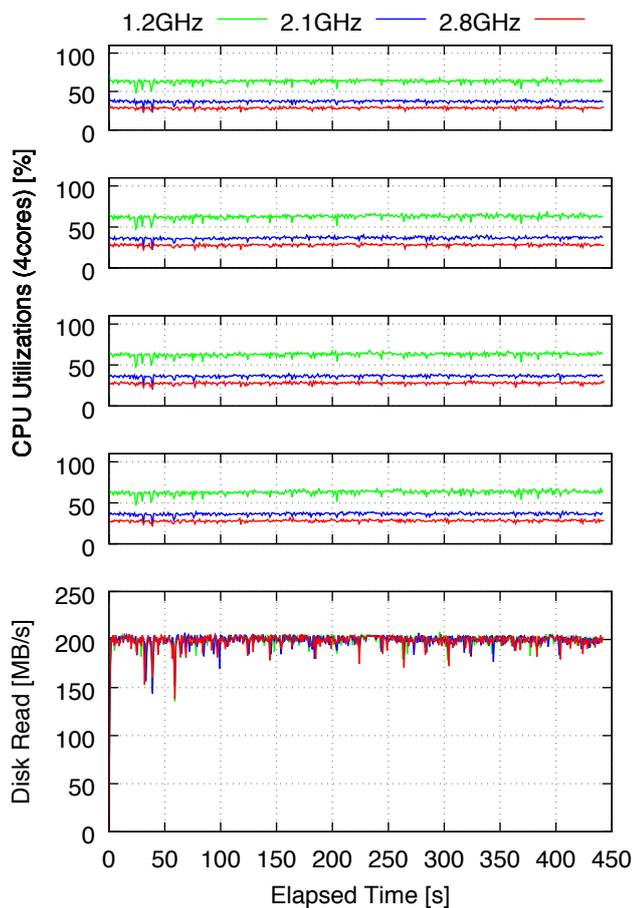


図 13: Q6 を多重度 4 で同時実行時の CPU 使用率とディスク速度の経時変化

文 献

[1] Josh Whitney and Pierre Delforge. Data Center Efficiency Assessment. Issue paper, 2014.

[2] Charles Lefurgy, Karthick Rajamani, Freeman Rawson, Wes Felter, Michael Kistler, and Tom W. Keller. Energy Management for Commercial Servers. *IEEE Computer*, 36(12):39–48, December 2003.

[3] Padmanabhan Pillai and Kang G. Shin. Real-time dynamic voltage scaling for low-power embedded operating systems. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 35(5):89–102, 2001.

[4] Ricardo Gonzalez and Mark Horowitz. Energy dissipation in general purpose processors. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 31(9):1277–1284, September 1996.

[5] David Brooks and Margaret Martonosi. Dynamic Thermal Management for High-Performance Microprocessors. In *Proceedings of the 7th International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA)*, pages 171–182, 2001.

[6] Xiaobo Fan, C. S. Ellis, and A. R. Lebeck. Memory controller policies for DRAM power management. In *Proceedings of the 2001 International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED)*, pages 129–134, 2001.

[7] Qingbo Zhu, Zhifeng Chen, Lin Tan, Yuanyuan Zhou, Kimberly Keeton, and John Wilkes. Hibernator: helping disk arrays sleep through the winter. In *Proceedings of the 22th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP)*, pages 177–190, 2005.

[8] Yan Zhang, Sudhanva Gurumurthi, and Mircea R. Stan. SODA: Sensitivity based optimization of disk architecture.

In *Proceedings of the Design Automation Conference*, pages 865–870, 2007.

[9] Eduardo Pinheiro and Ricardo Bianchini. Energy conservation techniques for disk array-based servers. In *Proceedings of the 18th International Conference on Supercomputing (ICS)*, pages 68–78, 2004.

[10] Sudhanva Gurumurthi, Anand Sivasubramaniam, Mahmut Kandemir, and Hubertus Franke. DRPM: dynamic speed control for power management in server class disks. In *Proceedings of the 30th Annual International Symposium on Computer Architecture*, number c, 2003.

[11] Luiz Ramos and Ricardo Bianchini. C-Oracle: Predictive thermal management for data centers. In *IEEE 14th International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA)*, pages 111–122, 2008.

[12] Taliver Heath, Ana Paula Centeno, Pradeep George, Luiz Ramos, Yogesh Jaluria, and Ricardo Bianchini. Mercury and freon: Temperature emulation and management for server systems. In *Proceedings of the 12th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS)*, pages 106–116, 2006.

[13] Luiz André Barroso and Urs Hölzle. The Case for Energy-Proportional Computing. *IEEE Computer*, 40(12):33–37, December 2007.

[14] Niraj Tolia, Zhikui Wang, Manish Marwah, Cullen Bash, Parthasarathy Ranganathan, and Xiaoyun Zhu. Delivering Energy Proportionality with Non Energy-proportional Systems – Optimizing the Ensemble. In *Proceedings of the 2008 Workshop on Power Aware Computing and Systems (HotPower)*, December 2008.

[15] 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. *Communications of the ACM*, 52(6):56–65, June 2009.

[16] Suzanne Rivoire, Mehul A. Shah, Parthasarathy Ranganathan, and Christos Kozyrakis. JouleSort: A Balanced Energy-efficiency Benchmark. In *Proceedings of the 2007 ACM International Conference on Management of Data (SIGMOD)*, pages 365–376, 2007.

[17] Meikel Poess, Raghunath Othayoth Nambiar, Kushagra Vaid, John M. Stephens Jr., Karl Huppler, and Evan Haines. Energy Benchmarks: A Detailed Analysis. In *Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking (e-Energy)*, pages 131–140, 2010.

[18] Stavros Harizopoulos, Mehul Shah, Justin Meza, and Parthasarathy Ranganathan. Energy Efficiency: The New Holy Grail of Data Management Systems Research. In *4th biennial Conference on Innovative Data Systems Research (CIDR)*, September 2009.

[19] Goetz Graefe. Database Servers Tailored to Improve Energy Efficiency. In *Proceedings of the 2008 EDBT Workshop on Software Engineering for Tailor-made Data Management (SETMDM)*, pages 24–28, 2008.

[20] Kazuo Goda and Masaru Kitsuregawa. Power-aware Remote Replication for Enterprise-level Disaster Recovery Systems. *Usenix Atc*, i:255–260, 2008.

[21] Norifumi Nishikawa, Miyuki Nakano, and Masaru Kitsuregawa. Energy Efficient Storage Management Cooperated with Large Data Intensive Applications. *ICDE ’12*, pages 126–137, April 2012.

- [22] 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 ACM/IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED)*, pages 261–266, 2009.
- [23] Meikel Poess and Raghunath Othayoth Nambiar. Tuning servers, storage and database for energy efficient data warehouses. In *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Data Engineering (ICDE)*, pages 1006–1017, 2010.
- [24] Mayuresh Kunjir, Puneet K. Birwa, and Jayant R. Haritsa. Peak Power Plays in Database Engines. In *Proceedings of the 15th International Conference on Extending Database Technology (EDBT)*, pages 444–455, 2012.
- [25] Zichen Xu, Yi-Cheng Tu, and Xiaorui Wang. PET: Reducing database energy cost via query optimization. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 5(12):1954–1957, 2012.
- [26] Amine Roukh, Ladjel Bellatreche, and Carlos Ordonez. EnerQuery: Energy-Aware Query Processing. In *Proceedings of the 25th ACM International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM)*, pages 2465–2468, 2016.
- [27] Zichen Xu, Yi-Cheng Tu, and Xiaorui Wang. Exploring power-performance tradeoffs in database systems. In *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Data Engineering (ICDE)*, pages 485–496, 2010.
- [28] Yi-Cheng Tu, Xiaorui Wang, Bo Zeng, and Zichen Xu. A System for Energy-Efficient Data Management. *ACM SIGMOD Record*, 43(1):21–26, May 2014.
- [29] Willis Lang, Ramakrishnan Kandhan, and Jignesh M. Patel. Rethinking Query Processing for Energy Efficiency: Slowing Down to Win the Race. *Bulletin of the IEEE Computer Society Technical Committee on Data Engineering (TCDE)*, 34(1):12–23, March 2011.
- [30] 合田 和生, 早水 悠登, and 喜連川 優. ストレージシステムの消費エネルギーを考慮したコストベース型のデータベース問合せ最適化手法の提案. In *The 1st. cross-disciplinary Workshop on Computing Systems, Infrastructures, and Programming (xSIG)*, April 2017.
- [31] 早水 悠登, 合田 和生, and 喜連川 優. ストレージ消費電力特性に基づく関係データベース演算子の省電力指向コストモデル. In *第 9 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM)*, March 2017.
- [32] Rafael Alonso and Sumit Ganguly. Energy efficient query optimization. Technical report, Matsushita Info Tech Lab., 1992.
- [33] Yuto Hayamizu, Kazuo Goda, Miyuki Nakano, and Masaru Kitsuregawa. Application-Aware Power Saving for Online Transaction Processing Using Dynamic Voltage and Frequency Scaling in a Multicore Environment. In *Proceedings of the 24th Architecture of Computing Systems (ARCS)*, pages 50–61, 2011.
- [34] 早水 悠登, 合田 和生, 中野 美由紀, and 喜連川 優. オンライントランザクション処理における Dynamic Voltage and Frequency Scaling を用いたアプリケーション指向省電力化手法. *情報処理学会論文誌 データベース*, 4(2):61–73, 2011.
- [35] The PostgreSQL Global Development Group. PostgreSQL: The world’s most advanced open source database. <https://www.postgresql.org/>.
- [36] Transaction Processing Performance Council. TPC-H, an ad-hoc, decision support benchmark. <http://www.tpc.org/tpch/>.