

IoT データ分析システムの電力効率の評価 Energy Efficiency Evaluation of IoT Data Analysis System

西川 記史[†] 高田 実佳[‡] 茂木 和彦[†] 早水 悠登[§] 合田 和生[§] 喜連川 優^{§¶}
Norifumi Nishikawa Mika Takata Kazuhiko Mogi Yuto Hayamizu Kazuo Goda Masaru Kitsuregawa

1. はじめに

IoT や AI 技術の利用の拡大に伴うデータセンタのエネルギー消費の急増により、データセンタが提供する IT サービスの性能を維持しつつ IT 機器のエネルギー消費を削減することが求められている。LBNL のレポートによれば、米国のデータセンタでは省電力技術が採用されつつある一方、米国のデータセンタの消費電力は 2014 年から 2020 年にかけて年率 4% で増加し、2020 年の消費電力は 73 billion kWh に達するすると予想されている[1]。また、米国 DOE のレポートでは、IT 負荷が 100 kW 以上のデータセンタのエネルギー使用量を 5 年以内に 25% 削減するとしている[2]。

IT サービスは、実装によりその性能やエネルギー消費が変化する。例えば文献[3]では、ストレージ内のデータ配置を変更することにより、若干の性能低下はあるもののストレージの消費電力を最大 60% 以上削減できることが、文献[4]では RDBMS のアクセスパスにより IT 機器の消費電力が異なることがそれぞれ示されている。また近年では RDBMS によるデータ管理の他に、Hadoop などを用いたデータ管理も進んでいるが、それらの電力効率は明らかではなく、IT サービスの性能とエネルギー消費の双方を意識した設計を複雑なものとしている。

データセンタで稼働する産業向けアプリケーションの性能を比較するツールとして、標準ベンチマークが多数提案されている[5-12]。これらは単一あるいは少数のコンポーネントの性能を計測するものであり、IoT システム全体の end-to-end の性能を計測するものではない。また、データセンタのエネルギー効率の計測のための指標として PUE [13] や REF [14]、ITEEsv [15] などが標準化されている。これらの指標は、データセンタの設備や IT 機器のエネルギー効率を計測するためのものであり、IT サービスの性能については考慮されていない。

本研究では、IT サービスの性能とエネルギー効率の双方を意識した実装の選択を容易化することを目的に、産業ビッグデータアプリケーションのベンチマーク手法[16]として提案されているアプリケーションを参考に、IoT データ分析クエリを定義する。そして、それらを用いて、異なる実装での IoT データ分析クエリの電力効率を比較する。電力効率の比較にはサービス視点のエネルギー効率を計測する指標である Application Platform Energy Efficiency (APEE) [17] を用いて比較する。この結果、IoT データ分析系クエリでは RDBMS によるデータ管理の電力効率が IU サーバ環境で約 6 倍、エンタープライズサーバで約 26 倍高いことを確認でき、これにより電力効率の高い IoT データ分析システムの設計が容易になることを示す。

[†] 株式会社日立製作所

[‡] Hitachi America, Ltd.

[§] 東京大学生産技術研究所

[¶] 国立情報学研究所

2. IoT 分析システムにおけるデータ分析処理

2.1 産業ビッグデータアプリケーションベンチマーク

文献[16]に示されている産業ビッグデータアプリケーションベンチマークは、鉱山の露天掘りにおける工事車両管理アプリケーションにおける問合せをモデル化したものであり、表 1 に示すような 3 種類のクエリを含む。

表 1 産業ビッグデータアプリケーションのクエリ

クエリ種別	クエリ概要
KPI 計算	・ 操作管理者向けの定期的な KPI 値集計
イベント検知	・ フロントオペレータ向けイベント検知
分析	・ 企業幹部・バックオフィスのスタッフ向けの分析・予測クエリ

本ベンチマークは、土砂あるいは鉱物資源等(以下オブジェクトと呼ぶ)をトラックに積み込むロード、土砂あるいは鉱物資源を運搬するトラック、土砂あるいは鉱物資源を降ろすダンプ、の 3 種類の装置の動きを模擬する。トラックがロードで資源等を積み込み、それをダンプの場所まで運び、空になったら再度ロードに行き、資源等を積み込むサイクルを繰り返している。ロード及びダンプには生産量の累積値を計測するセンサが、トラックには積載量の累積値、移動距離の累積値、現在位置を示す GPS センサがそれぞれ取り付けられており、一定時間間隔でデータを送信する。また、ロードとダンプの間には複数のフィールドセンサ(Beacon) が置かれており、近くに来たトラックの ID を送信する。ロード、ダンプは累積の生産量が一定値を超えたら、トラックは累積の積載量または累積の移動距離が閾値を超えると保守モードに入る。

2.2 データ分析クエリ

我々は前述の産業ビッグデータアプリケーションのクエリを元に、IoT データの分析によく用いられると考えられる以下の 5 種類のクエリを定義した。

表 2 データ分析クエリ

クエリ#	クエリ概要
Q1	あるトラックの累積オブジェクト運搬量の推移を検索
Q2	ある時間帯の全運搬用トラックの位置を検索
Q3	あるオブジェクトをロード中の特定の装置センサ値の一週間の推移を検索
Q4	全トラックについて、オブジェクトをダンプ中のある一日の全装置センサ値を検索
Q5	発生したイベントの件数を、日毎・装置毎・イベント毎に集計

Q1 は特定のセンサについて、その値の時間的推移を求めるクエリ(トレンド検索)であり、Q2 はある時刻における全センサの値を求めるクエリ(スナップショットクエリ)である。これらのクエリは、例えば何らかのイベントが発生した場合に、当該イベント前後でセンサ値がどのように変化したか、あるいはイベント発生時に、イベントが発生した装置のセンサ以外の他の装置のセンサ値がどうなっているかを求めるものであり、前述の産業ビッグデータアプリケーション中のクエリの他、電力計のセンサ値を蓄積したデータのイベント発生時の可視化等の際に発行されるものである。Q3 は、ある期間内のうち、特定のセンサについて、ある種類のイベント中のセンサの値を求めるクエリである。Q4 は、ある日の全センサについて、イベント中のセンサの値を求める。Q3 はトレンド検索クエリ、Q4 はスナップショットクエリであるが、それぞれ Q1、Q2 と異なる種類のイベント発生中のみが対象であり、センサ値の選択範囲はイベントの開始・終了時刻である。これらのクエリは Q1、Q2 で検索したイベントと類似のイベントを検索する際に発行される。Q5 はイベント発生回数を一定期間毎に集計するクエリであり、前述の産業ビッグデータアプリケーションの KPI 計算に相当する。

3. Application Platform Energy Effectiveness (APEE)

APEE は、文献[17]にあるように、ISO/IEC JTC 1/SC 39 にて提案中の、ある IT サービスにおける IT 機器のエネルギー効率を計測する指標であり、以下の式で表される。

ここで、Application outcome per hour (以下アプリケーション

$$APEE = \frac{\text{Application outcome per hour}}{\text{Energy consumption per hour}}$$

アウトカムと呼ぶ)とは、作業計画の調整を判断する上で必要な情報を抽出するために実行する一連のクエリが単位時間当たり完了する回数である。TPC-H を例とすると、TPC-H の性能指標である QphH をアプリケーションアウトカムとして用いることができる。Energy consumption per hour (以下エネルギー消費と呼ぶ)はその一連のクエリを完了させるために IT 機器が消費した単位時間当たりのエネルギー量である。

4. IoT データ分析クエリを用いた IT 機器の電力効率比較

4.1 計測方法

4.1.1 計測対象

データセンタにおいてデータ分析処理サービスを行う場合、その実装に用いる IT 機器としては、デスクトップ PC から数十コアの CPU を搭載する大型のサーバとエンタープライズストレージを用いる構成まで様々なものが考えられる。また、データ分析に使用されるデータ処理ソフトとしてはこれまで RDBMS が一般的に用いられてきたが、近年では Hadoop を始めとする NoSQL 系の DBMS が多く用いられるようになってきている。そこで、本論文では IoT データ分析クエリを以下の構成で実装し、それぞれの構成のアプリケーションアウトカムとエネルギー消費を計測、ここから APEE を計算し両者のエネルギー効率を求める。

- ・ (小規模)1U ラックサーバ+ RDBMS
- ・ (小規模)1U ラックサーバクラスター+ Spark SQL/Hadoop
- ・ (大規模)エンタープライズサーバ+ ストレージ+ RDBMS
- ・ (大規模)PC サーバクラスター+ Spark SQL/Hadoop

4.1.2 評価に用いるクエリ

評価には、2 章の表 2 に示した IoT データ分析クエリを用いる。

4.1.3 アプリケーションアウトカムの定義

APEE を用いた比較を可能とするために、IoT データ分析クエリのアプリケーションアウトカムを定義する。文献[17]では、アプリケーションアウトカムは単位時間当たり IT サービスが提供するサービス量と定義されている。IoT データ分析クエリでは、クエリの実行回数がサービス量と考えられるため、前述のクエリ Q1 から Q5 を直列に実行し、それらの 1 時間当りの処理回数を一時間当りのアプリケーションアウトカムと定義と定義する。

4.1.4 ハードウェア及びソフトウェア構成

4.1.1 節で述べた 4 種類の構成のハードウェア構成をそれぞれ表 3 から表 6 に示す。ソフトウェア構成は次の通りである。RDBMS として、商用の RDBMS である Hitachi Advanced Data Binder^{*1} (HADB) [18] を、Spark SQL/Hadoop として Apache Hadoop [19] 上に Apache Spark [20] SQL を用いてデータをロードしそれらを用いる。

4.1.5 データ

本評価で用いたデータは、鉱山の露天掘りにおける工事車両の動きを模したシミュレータにより生成した。本評価で生成したデータに含まれるローダ・ダンプの数はそれぞれ

表 3 1U ラックサーバ+RDBMS

機器	概要
1U サーバ	CPU: 24 論理コア/socket x 1 Intel® Xeon® CPU E5649 @ 2.53GHz Memory: 48 GB HDD: 7.2 krpm 450 GB SATA x 1 Flash Disk: Virident FlashMAX 1.5 TB x 1 (DB は Flash Disk 上に構築) OS: CentOS 6.2
電力計	1U サーバ内蔵電力計を使用

表 4 1U ラックサーバクラスター+Spark SQL / Hadoop

機器	概要
クラスター	ノード数 3
インターコネクト	10Gbps Ethernet
1U サーバ	CPU: 24 論理コア/socket x 1 Intel® Xeon® CPU E5649 @ 2.53GHz Memory: 48 GB HDD: 7.2 krpm 450 GB SATA x 1 SSD: Intel SSD 535 series 240GB x 1 (DB は SSD 上に構築) OS: CentOS 7.5
電力計	1U サーバ内蔵電力計を使用

*1: 内閣府の最先端研究開発支援プログラム「超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発と当該エンジンを核とする戦略的社会サービスの実証・評価」(中心研究者: 喜連川東大教授/国立情報学研究所所長)の成果を利用

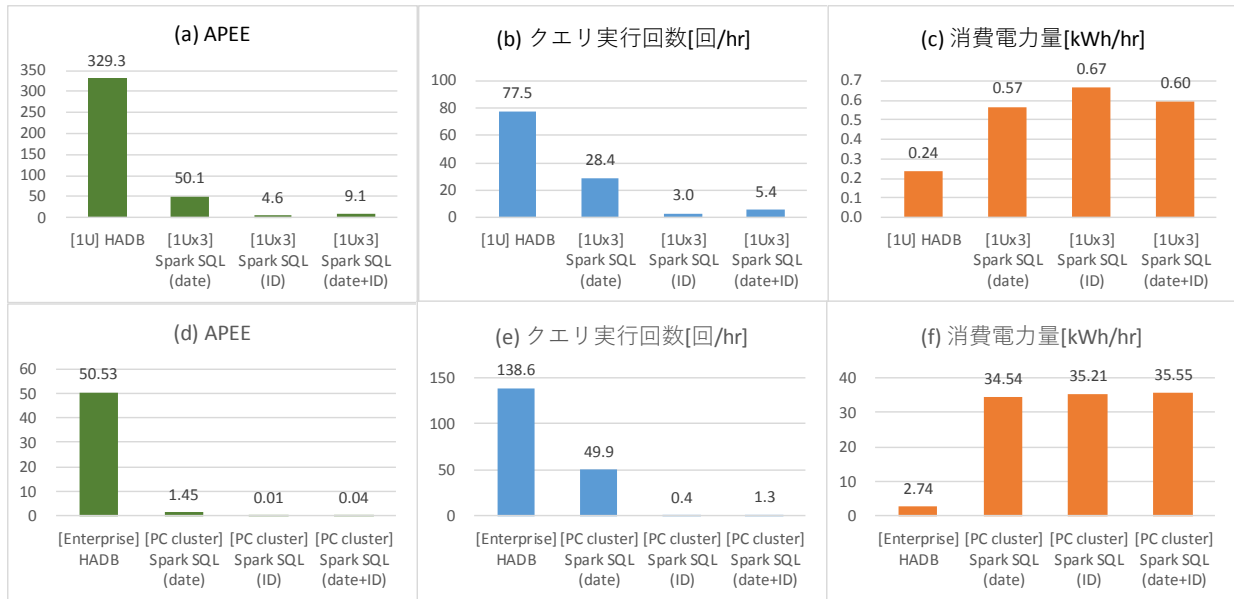


図 1 計測結果

表 5 エンタープライズサーバ+ストレージ+RDBMS

機器	概要
IUサーバ	CPU: 12 物理コア/socket x 2 (24 物理コア) Intel® Xeon® CPU E5-2690 v3 @ 2.60GHz Memory 256 GB OS: RHEL 6.6
FC	8 Gbps Fibre channel x 4
ストレージ	15 krpm 300 GB SAS (256 + 8) 台 (7D + 1P) 32 RG + 8HDD spares) DB を(7D + 1P) 32 RG 上に構築 (表&索引: 31 RG, ワーク: 1RG)
電力計	横河電機 WT1800

表 6 PC サーバクラス+Spark SQL/Hadoop

機器	概要
クラスタ	ノード数 128
インターコネク	Dell Force 10 Z9000 (10 Gbps)
IUサーバ	CPU: 8 物理コア/socket x 2 (16 物理コア) Intel® Xeon® E5-2680 CPU @ 2.70GHz Memory: 64 GB HDD(OS): 15 krpm 300 GB SAS 2 台 HDD(Data): 10 krpm 900 GB SAS 24 台 OS: RHEL 5
電力計	Ralitan インテリジェントラック PDU

れ 100, トラック数は 2,000 台である。これは、車両の代理店一店舗の規模に相当する[28]。CSV テキスト形式で約 550GB であり、イベント・センサデータの小規模表は約 1,800 万行、中規模表は約 3 億行、大規模表約 30 億行である。その他のパラメタは文献[21]に示した通りである。

4.1.6 Spark SQL のデータ分割方式

本評価では、Spark SQL のデータの分割方式による電力効率の際を評価するために、以下の 3 種類の分割方式の電力効率を比較した。

- ・ 日付による分割
- ・ ID (装置 ID またはセンサ ID) による分割
- ・ 日付 + ID による分割

4.2 IT 機器のエネルギー効率

4.2.1 小規模環境のエネルギー効率

図 1(a)~(c) に小規模環境での APEE, 及び IoT 分析クエリの 1 時間当たり処理回数, 1 時間当たりエネルギー消費の計測結果をそれぞれ示す。APEE は 3 章の式に示すように、単位時間当たりのアプリケーションアウトカムを単位時間当たりのエネルギー消費で除した値である。図 1(a) から分かるように、APEE はそれぞれ 1U サーバ+RDBMS が 329.27, 1U サーバクラス+Spark SQL / Hadoop の日付による分割, ID による分割, 日付+ID による分割がそれぞれ 50.10, 4.56, 9.15 であった。図 1(b) から分かるように、1U サーバ+RDBMS が 77.5 [回/hr], 1U サーバクラス+Spark SQL / Hadoop の日付による分割, ID による分割, 日付+ID による分割はそれぞれ 28.4, 3.0, 5.4 [回/hr]であった。また、図 1(c) から分かるように、1U サーバ+RDBMS は 0.24 [W/hr]であった。1U サーバクラス+Spark SQL / Hadoop の日付による分割, ID による分割, 日付+ID による分割はそれぞれ 0.57, 0.67, 0.60 [kWh/hr]であった。

4.2.2 大規模環境のエネルギー効率

図 1 (d)~(f) に APEE, 及び IoT 分析クエリの 1 時間当たり処理回数, 1 時間当たりエネルギー消費の計測結果をそれぞれ示す。図 2(a) から分かるように、APEE はそれぞれエンタープライズサーバ+ストレージ+RDBMS は 50.53, PC サーバクラス+Spark SQL / Hadoop の日付による分割, ID による分割, 及び日付+ID による分割はそれぞれ 1.45, 0.01, 0.04 であった。図 2(b) から分かるように、エンタープライズサーバ+ストレージ+RDBMS は 138.6 [回/hr], PC サーバクラス+Spark SQL / Hadoop の日付による分割, ID による分割, 日付+ID による分割はそれぞれ 49.9, 0.4, 1.3 [回/hr]であった。また図 2(c) から分かるように、エンタープライズサーバ+ストレージ+RDBMS の消費電力量は 2.74 [W/hr], PC サーバクラス+Spark SQL / Hadoop の日付による分割, ID による分割, 日付+ID による分割はそれぞれ 30.54, 35.21, 35.55 [kWh/hr]であった。

4.3 考察

計測結果より、RDBMS を用いた場合の電力効率が、Spark SQL / Hadoop と比較して高く、1U サーバでは Spark SQL / Hadoop の最も電力効率が高かった分割と比較して約6倍、エンタープライズサーバでは約26倍高い結果となった。これは、RDBMS では索引により検索範囲が適切に絞り込まれておりアウトカムが高いこと、及びサーバ1台のみの使用であり消費電力量が Spark SQL / Hadoop と比較して低いためである。

Spark SQL / Hadoop では電力効率は日付による分割が最も高く、次いで日付+ID、ID による分割となった。サーバの消費電力量はほぼ同じであるため、この結果はほぼアウトカムの値と比例している。ID による分割のアウトカムが小さいのは、大規模表にアクセスする Q4 の分割 (ID による分割) が検索キー (日付のみによる絞込み) と一致せず、全データをスキャンしたためである。また、最もアウトカムが高いと思われた日付+ID 分割のアウトカムが日付によるそれより小さいのは、日付による分割と比較してファイル数が多く、小さなタスクが多数生成されたためと考えられる。

5. 関連研究

RDBMS と NoSQL の比較としては、これまで主に性能比較に関する研究が報告されている。例えば文献[22]では、MySQL と MongoDB を用いて IoT ビッグデータに対する CURD 処理の性能を比較している。また、文献[23]では、Yahoo! Cloud Serving Benchmark (YCSB) を用いて RDBMS と MongoDB を、文献[24]ではモバイルアプリケーションを用いて MongoDB と PostgreSQL を比較している。文献[25]では、複数の NoSQL データベースについて、性能やスケーラビリティ等複数の指標で評価を行っている。しかし、電力効率の観点での比較はほとんど見られない。

6. おわりに

本研究では、IoT データ分析クエリを種類の異なる IT 機器及びデータ処理ソフトを用いて実装し、その性能及び消費エネルギーを計測した。そして、それら異なる実装間のエネルギー効率を Application Platform Energy Effectiveness (APEE) を用いて比較した。この結果 IoT データ分析系クエリでは RDBMS によるデータ管理の電力効率が 1U サーバ環境で約6倍、エンタープライズサーバで約26倍高いことを確認でき、これにより電力効率の高い IoT データ分析システムの設計が容易化できる見込みを得た。

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務「エネルギー・環境新技術先導プログラム/革新的な省エネルギー型データベース問合せコンパイラの研究開発」及び「IoT 推進のための横断技術開発プロジェクト/先進 IoT サービスを実現する革新的省エネルギー型ビッグデータ基盤の研究開発」の結果得られたものです。

参考文献

[1] A. Shehabi 他, United States Data Center Energy Usage Report, LBNL-1005775, Ernest Orland Lawrence Berkeley National Laboratory, <https://eta.lbl.gov/publications/united-states-data-centerenergy>, 2016.

[2] FEMP Data Center Program Overview, U.S. Department of Energy, https://energy.gov/sites/prod/files/2016/07/f33/dc_improvement.pdf, 2016.

[3] N. Nishikawa, et al., Application Sensitive Energy Management Framework for Storage Systems, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Volume 27, Issue 9, pp.2335–2348, 2015.

[4] 早水他, 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, 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 2017), G1-3, 2017.

[5] Transaction Processing Performance Council (TPC), TPC-H benchmark specification, <http://www.tpc.org/tpch/>, 2008.

[6] R. O. Nambiar, et al., The making of TPC-DS, in Proc. of the Int'l Conference on Very Large Data Bases (VLDB), 2006, pp. 1049–1058.

[7] M. Poess, et al., New TPC Benchmarks for Decision Support and Web Commerce, SIGMOD Record, vol. 29, no. 4, pp. 64–71, 2000.

[8] M. Poess, et al., Why you should run TPC-DS: A workload analysis, in Proc. of the VLDB Endowment (PVLDB), pp. 1138–1149, 2007.

[9] T. Rabl, et al., Big Data Generation, in Specifying Big Data Benchmarks, ser. LNCS. Springer, vol. 8163, pp. 20–27, 2014.

[10] Y. Zhu, et al., BigOP: Generating Comprehensive Big Data Workloads as a Benchmarking Framework, in Database Systems for Advanced Applications, ser. LNCS. Springer, vol. 8422, pp. 483–492, 2014.

[11] Transaction Processing Performance Council, TPCx-HS, www.tpc.org/tpcxhs/, 2015.

[12] Yahoo Cloud Serving Benchmark, <https://research.yahoo.com/news/yahoo-cloud-serving-benchmark/>, 2010.

[13] Information technology - Data centres - Key performance indicators - Part 2: Power usage effectiveness (PUE), ISO/IEC 30134-2:2016, 2016.

[14] Information technology - Data centres - Key performance indicators - Part 3: Renewable energy factor (REF), ISO/IEC 31034-3:2016, 2016.

[15] Information technology - Data centres - Key performance indicators - Part 4: IT Equipment Energy Efficiency for servers (ITEEs), ISO/IEC 30134-4:2017, 2017.

[16] U. Dayal, et al., An Approach to Benchmarking Industrial Big Data Applications, Big Data Benchmarking: 5th International Workshop, WBDB 2014, 2014.

[17] 五十嵐他, アプリケーションを含めた IT サービスのエネルギー効率指標の提案, 第10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 2018), C7-3, 2018.

[18] 高速データアクセス基盤 Hitachi Advanced Data Binder プラットフォーム, <http://www.hitachi.co.jp/products/it/bigdata/platform/databinder/>

[19] Apache Hadoop, <http://hadoop.apache.org/>, 2017.

[20] Apache Spark, <https://spark.apache.org/>, 2017.

[21] 西川他, 産業ビッグデータアプリケーションモデルを用いた RDBMS と NoSQL DBMS の電力効率の比較, 第10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 2018), C7-4, 2018.

[22] J. Y. Seo, et al., Performance Comparison of CRUD Operations in IoT based Big Data Computing, International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, Vol.7, No. 5, pp.1765–1770, 2017.

[23] A. Floratou, et al., Can the Elephants Handle the NoSQL Onslaught?, Proceedings of the VLDB Endowment, Vol. 5, No. 12, 2012.

[24] M. Fotache, et al., NoSQL and SQL Databases for Mobile Applications. Case Study: MongoDB versus PostgreSQL, Informatica Economica, 17(2), pp.41–58, 2013.

[25] S. Venkatraman, et al., SQL Versus NoSQL Movement with Big Data Analytics, International Journal of Informa