

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24240006

研究課題名(和文) 学術連携クラウドのための高性能・高信頼負荷分散技術に関する研究

研究課題名(英文) Study on High-Performance and Reliable Load Balancing Technology for Academic Federated Cloud Platforms

研究代表者

合田 憲人 (AIDA, Kento)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号：80247212

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：複数拠点のクラウドを連携させた基盤を構築し、学術コミュニティの研究教育活動に利用することが期待されている。しかし、複数拠点のクラウドにアプリケーションプログラムを適切に割り当てる負荷分散技術は未だ確立されていない。本研究では、複数拠点のクラウドを活用して高性能かつ高信頼な処理を可能とするための負荷分散技術に関する研究を行った。具体的には、クラウド上でのアプリケーション性能を表すモデルを考案するとともに、アプリケーションの性能の特徴を収集して適切なクラウドを選択するためのシステムを開発した。

研究成果の概要(英文)：Federated cloud organized by cloud platforms distributed over multiple sites is a promising platform for research and education in academic communities. However, a load balancing technology to assign application programs to suitable cloud platforms has not been established. In this project, we conducted the study on the load balancing technology that enabled high-performance and reliable computing by utilizing cloud platforms distributed over multiple sites. We proposed application performance models on cloud platforms and developed a software system to select suitable cloud platforms by collecting application performance characteristics.

研究分野：情報学

キーワード：クラウドコンピューティング ハイパフォーマンス・コンピューティング

1. 研究開始当初の背景

近年のクラウド技術の発展により、Amazon Web Service (AWS)に代表されるパブリッククラウドサービスの普及が進んでいる。これに伴い、大学や研究所等の学術機関における計算機資源をクラウド化し、研究教育活動に利用する運用が始まっている。また、複数拠点で運用されるクラウドを連携させて運用することにより、計算機資源の有効活用や障害・災害に強い計算インフラの実現を目指す取り組みが始められている。このような複数の学術機関のクラウドを連携させたクラウド（以後、「学術連携クラウド」と表記）を効果的に機能させるためには、クラウド上で実行されるアプリケーションプログラム等の処理をクラウド上の計算機資源に効率よく配置する負分散技術が重要となる^{①-③}。

複数拠点のクラウドを連携させた運用技術については、世界的にも実験が始まったところであり^④、負分散技術については十分に研究されていない。例えば AWS では複数拠点のデータセンタを運用し、IaaS サービスを提供しているが^⑤、各拠点の計算機資源は独立して運用されており、複数拠点のデータセンタを連携させた運用は行われていない。また、学術連携クラウドでは、ビッグデータ解析やハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) 等のアプリケーションの新たな性能モデルが必要であり、従来技術のみでは効果的な負分散を実現することができない。

2. 研究の目的

本研究では、学術連携クラウドによる高度な研究教育活動の実現を目指し、複数拠点のクラウド基盤を活用して高性能かつ高信頼な処理を可能とするための負分散技術に関する研究を行う。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するためには、クラウド基盤上で実行されるアプリケーションの性能特性を活用し、アプリケーションを適切なクラウド基盤に分散するための負分散技術を開発する必要がある。

前者については、大学等のクラウドやパブリッククラウド上でのアプリケーション性能評価、ならびに実際のクラウドデータセンタにおいて実行されるアプリケーション実行履歴解析を実施し、アプリケーションの性能を表す性能モデルを考案した。後者については、前者の研究から得られた知見をもとにして、クラウド上のアプリケーション性能評価自動化およびアプリケーションに適したクラウド基盤の選択を可能とするソフトウェアを開発した。以後、これらの研究成果について述べる。

4. 研究成果

(1) クラウド上でのアプリケーション性能モデル

効果的なクラウド上の負分散の実現には、クラウド上の処理（アプリケーションプログラム）の実行性能を適切に予測し、負分散手法に反映させる必要がある。パブリッククラウドでは、仮想計算機 (VM) 上でアプリケーションプログラムが実行されるため、仮想化によるオーバーヘッドや資源競合等により、アプリケーション性能がオンプレミスに比べて変動しやすいという問題がある。本研究では、クラウド上でのデータ解析や HPC 等のアプリケーション性能評価を実施するとともに、これらのアプリケーションの性能予測を行うための性能モデルに関する研究を実施した。

まず本研究では、複数のクラウド基盤上で長期間にわたるアプリケーション性能評価を実施し、アプリケーション性能の変動を定量的に分析した。具体的には、クラウド上でのビッグデータ解析のフレームワークとして利用されている MapReduce アプリケーションを用い、コミュニティクラウド(北海道大学)、パブリッククラウド (AWS EC2)、研究代表者が所有する PC クラスタ環境上での性能評価を3ヶ月に渡り実施し、これらの基盤上でのアプリケーション性能を比較するとともに、CPUおよびI/O性能に起因する性能変動を分析した。これらの実験の結果、(1)仮想化環境ではI/O性能変動が大きく全体の性能に影響すること、(2)アプリケーション性能変動はデータセンタや時間帯に依存する場合があること、が明らかになり、クラウド上でのアプリケーション性能を予測するための指針を得た。図1はその一例であり、AWS EC2 (N. Virginia Region) でのアプリケーション実行時間の変動幅が、実行開始の時間帯によって異なることを示している。具体的には、午後(14時、18時)と深夜(2時)の変動幅が大きいことがわかる。

次に、大学等のオンプレミスの計算機とクラウドを併用するハイブリッドクラウドにおける MapReduce アプリケーションの性能評価を実施するとともに、性能モデルを考案した。具体的には、ハイブリッドクラウド上でオンプレミスの計算資源に障害や急激な負荷が発生した場合に、クラウド基盤の計算資源を追加利用するために、ハイブリッドクラウド上でアプリケーション特性に応じた最適な計算資源構成を決定するための性能モデルを提案した。研究代表者所属機関のプライベートクラウドおよび AWS EC2 から構成される実験環境上での提案モデルの性能検証を行った結果、一定の特性を持つアプリケーションおよびクラウド基盤では、図2に示す例のようにハイブリッドクラウド上で実行時間を最小にする計算資源構成を予測できること、性

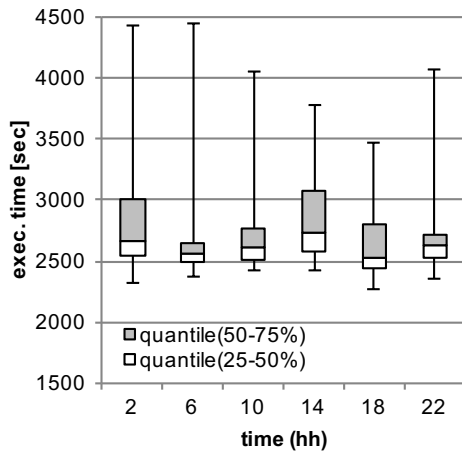


図 1. Hadoop アプリケーション (Sort) の実行時間変動の時間帯依存性 (AWS EC2, N. Virginia Region) [Kento Aida, IEICE Transactions on Information and Systems, E98-D(6), pp.1176-1184, 2015]

能モデルについては Shuffle Phase に発生する通信時間を精度よく予測することが重要であること等が明らかになった。

また、本研究では、クラウド上で複数の仮想計算機 (VM) 群が同一の物理計算機上に集約された場合に起こるアプリケーション性能低下についての分析も実施した。ベンチマークとしてクラウドの学術利用において需要が見込まれるウェブトランザクション、データベース処理、HPC アプリケーションをとりあげ、個々のアプリケーションが実行中に消費する資源量を調査した。次に、これらのアプリケーションを実行する VM 群を同一の物理計算機上に集約した場合の性能を評価した。本評価により、アプリケーションの消費資源量と VM 集約時の性能低下との関係が明らかになった。

学術連携クラウド上での適切な負荷分散を実現するためには、アプリケーションの特徴やクラウド基盤の状態に応じて、拠点間でデータや処理を移送することが必要となる。本研究では、学術連携クラウドの複数のユースケース (具体的には、Hadoop クラスタ、Docker コンテナ、Kubernetes クラスタ) を想定し、データや処理の移送に関する性能評価を実施することにより、アプリケーション性能モデルに関する知見を得た。

(2) クラウドデータセンタのワークロードモデル

アプリケーションの特性に応じて最適なクラウド基盤上の計算資源群を選択するためには、クラウド基盤で実行される大量のアプリケーション群の特性を明らかにする必要がある。そのため、本研究では、Google が公開する自社データセンタ上のアプリケーション実行履歴[®]を分析した。具体的には、Google のデータセンタ上で実行された約 12,500 件の

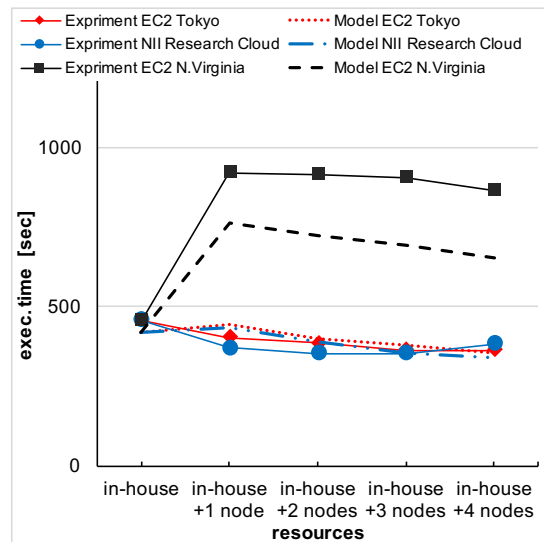


図 2. ハイブリッドクラウド上での Hadoop アプリケーション (Wordcount) の実行時間予測 [Hayata Ohnaga, ICCCRI 2015]

アプリケーション実行履歴を分析し、ユーザ毎のアプリケーションの構成 (ジョブ、タスク)、資源利用量 (CPU、メモリ)、利用形態 (利用時間、セッション時間、セッション間隔、頻度) に関する特性を明らかにした。その結果、Google データセンタ上のユーザの利用形態に Mice and Elephants Phenomenon (ごく一部のユーザがほとんどの資源を利用している状態) が観測されること等が明らかになった。図 3 は、その一例であり、Google データセンタにおけるユーザ毎のメモリ要求量を示している。また、同 Google データセンタのアプリケーション実行履歴に対して、新たに考案したクラスタリング手法を用いた解析を行うことにより、Google データセンタ上で実行されるアプリケーション群の資源利用パターンが 5 種類に分類できることを明らかにした。

(3) 負荷分散アーキテクチャ

本研究では、本研究が対象とする学術連携クラウドにおいてクラウド間の負荷分散が必要となるユースケースを検討し、負荷分散を実現するためのアーキテクチャを設計した。具体的には、大学等の組織がそれぞれプライベートクラウド (またはオンプレミスのサーバ) を運用し、組織内の計算資源では十分なアプリケーション実行性能が得られないと判断される場合に、当該ジョブの実行を他のクラウド基盤に依頼する場合を想定した。次に、本ユースケースを実現するためのクラウド基盤間の負荷分散モデルおよびソフトウェアアーキテクチャを提案した。本アーキテクチャは、ジョブへの計算資源割り当てを仮想マシン群、物理マシン群 (組織内)、クラウド基盤群 (複数組織) という 3 階層に分けて行う点に特徴がある。

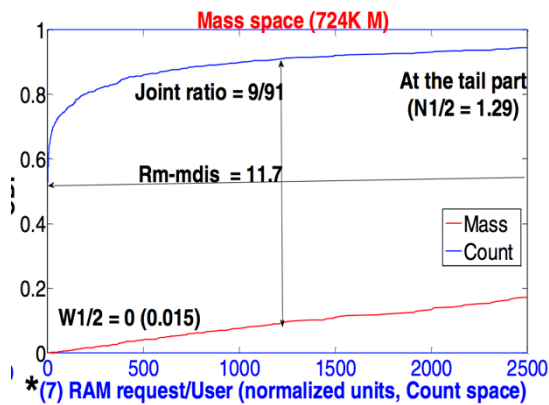


図 3. Google DC におけるユーザ毎のメモリ要求量 [Omar Abdul-Rahman, CloudCom 2014]

また本研究では、本研究により得られた性能評価結果およびアプリケーション性能モデルに関する知見を用い、クラウド基盤上でのアプリケーション性能評価の自動化、および複数のパブリッククラウドからユーザのアプリケーションに適したクラウド基盤を選択することを目的としソフトウェアシステムを開発した。図 4 は本システムの概要を示している。本システムは、ユーザのローカル環境のサーバ上で実行されるソフトウェアであり、ユーザからの要求に応じて、クラウド基盤上で性能評価プログラムを実行するとともに結果を収集する性能測定機能、収集した結果データを格納するデータベース、データベース中に保存された結果の検索およびユーザの要求に応じた計算資源を選択する計算資源選択機能から構成される。

<引用文献>

- ① 北大, 東工大, 国情研, 「スパコングリーン化技術の大規模実証研究」, 記者会見資料, H22 年 6 月 16 日, <http://www.gsic.titech.ac.jp/tsubame2>
- ② 伊東, 他, 「九州大学情報基盤研究開発センターにおけるクラウド型システムの適用性」, 九州大学クラウド・コンピューティングシンポジウム, 2009
- ③ Rochwerger, et.al, Reservoir – When One Cloud Is not Enough, IEEE Computer, 44(3), 2011
- ④ Liu, et.al, GreenCloud: A New Architecture for Green Data Center, Proc. ACM ICAC-INDST 09, 2009
- ⑤ Amazon Elastic Computing Cloud, <http://aws.amazon.com/ec2/>
- ⑥ J. Wilkes and C. Reiss. Details of the ClusterData-2011-1trace, 2011. https://code.google.com/p/googleclusterdata/wiki/ClusterData2011_1.

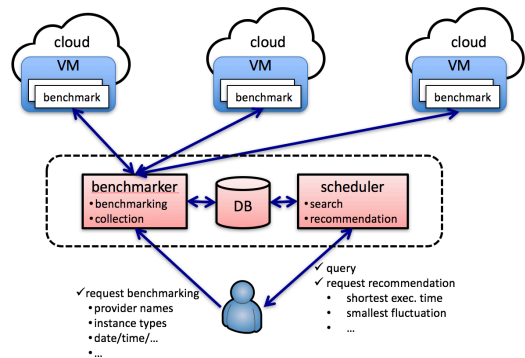


図 4. ソフトウェアシステム構成

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Kento Aida, Omar Abdul-Rahman, Eisaku Sakane, Kazutaka Motoyama, Long-term Performance Evaluation of Hadoop Jobs in Public and Community Clouds, IEICE Transactions on Information and Systems, E98-D(6), pp.1176-1184, 2015, DOI: 10.1587/transinf.2014EDP7274, 査読有
- ② Hayata Ohnaga, Kento Aida, Omar Abdul-Rahman, Performance of Hadoop Application on Hybrid Cloud, Proceedings of the International Conference on Cloud Computing Research and Innovation (ICCCRI2015), pp.130-138, 2015, DOI: 10.1109/ICCCRI.2015.25, 査読有
- ③ Omar Abdul-Rahman, Kento Aida, Towards Understanding the Behavior of Users in Utilizing Google Cloud: Mice and Elephants Phenomenon, Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom2014), pp.272-277, 2014, DOI: 10.1109/CloudCom.2014.75, 査読有
- ④ Omar Abdul-Rahman, Kento Aida, Multi-Layered Architecture for the Management of Virtualized Application Environments within Inter-Cloud Platforms, Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom 2013), pp.238-243, 2013, DOI: 10.1109/CloudCom2013.138, 査読有
- ⑤ Kento Aida, Omar Abdul-Rahman, Eisaku Sakane, Kazutaka Motoyama,

Evaluation on the Performance Fluctuation of Hadoop Jobs in the Cloud, Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE 2013), pp.159-166, 2013, DOI: 10.1109/CSE.2013.34, 査読有

- ⑥ Yuya Hashimoto, Kento Aida, Evaluation of Performance Degradation in HPC Applications with VM Consolidation, Proceedings of The Third International Conference on Networking and Computing, 3rd International Workshop on Advances in Networking and Computing, pp.273-277, 2012, DOI: 10.1109/ICNC.2012.50, 査読有

[学会発表] (計 8 件)

- ① 高橋 公俊, 合田 憲人, コンテナクラスター用ポータブルロードバランサの検討, 第 28 回コンピュータシステム・シンポジウム (ComSys2016), 2016, 法政大学 (東京都)
- ② Kai Liu, Kento Aida, Shigetoshi Yokoyama, Yoshinobu Masatani, Performance Evaluation of Docker Image Transfer toward Optimal Containers Deployment, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 236, SC2015-9, 2015 年 10 月 2 日, 国立情報学研究所 (東京都)
- ③ Hayata Ohnaga, Kento Aida, Omar Abdul-Rahman, Performance of Hadoop Application on Hybrid Cloud, Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure (ACSI 2015), 2015, つくば国際会議場 (茨城県)
- ④ 大長勇太, 合田憲人, Omar ABDUL-RAHMAN, ハイブリッドクラウドにおける Hadoop 処理の性能評価, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 155, CPSY2014-13, 2014, 朱鷺メッセ (新潟県)
- ⑤ Omar Abdul-Rahman, Kento Aida, Inter-Cloud Workload Dispatcher, SC14 Research Exhibit, 2014, 米国ニューオーリンズ
- ⑥ 合田憲人, Omar Abdul-Rahman, 坂根 栄作, 本山一隆, クラウド上での Hadoop ジョブの性能変動, 電子情報通信学会技術研究報告 vol. 113, no. 282, CPSY2013-56, 2013, 広島大学 (広島県)
- ⑦ Jared Ravetch, Kento Aida, StarCloud: Optimizing a Testing Framework for Android Development, 情報処理学会研究報告 2013-HPC-138, 2013, 清風荘

(福井県あわら市)

- ⑧ 成瀬 宏輔, 合田 憲人, MapReduce ジョブ実行時の不要計算資源解放手法, 情報処理学会研究報告 2013-HPC-138, 2013, 清風荘 (福井県あわら市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

合田 憲人 (AIDA, Kento)
国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授
研究者番号 : 80247212

(3)連携研究者

坂根 栄作 (SAKANE, Eisaku)
国立情報学研究所・学術認証推進室・特任准教授
研究者番号 : 10437303

棟朝 雅晴 (MUNETOMO, Masaharu)
北海道大学・情報基盤センター・教授
研究者番号 : 00281783

小林 泰三 (KOBAYASHI, Taizo)
九州大学・情報基盤研究開発センター・学術研究員
研究者番号 : 20467880

(4)研究協力者

Omar Abdul-Rahman
国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・特任助教