

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20256

研究課題名（和文）運用品質に因るインセンティブを導入した広域分散エッジコンピューティング環境の研究

研究課題名（英文）A study of the widely distributed edge computing environment introduced incentives due to operational quality

研究代表者

柏崎 礼生 (Kashiwazaki, Hiroki)

大阪大学・サイバーメディアセンター・招へい准教授

研究者番号：80422004

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、サービス利用者やデータ提供源により近い場所に配置されたエッジコンピューティング環境における有効な運用品質向上手法を見出すことにある。エッジコンピューティング環境は遅延の低さがその特質の一つとして挙げられるが、それゆえにクラウドコンピューティング環境と比較するとき、計算機資源の集中と大規模化を期待することが難しい。運用品質の維持・向上に伴う経済的な動機付けを与えた時、どのような条件において、運用品質の維持と向上が図られるかをエージェントシミュレーションを用いて評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エッジコンピューティング環境に計算機資源やネットワーク資源を追加すると、利用可能な計算機資源あるいはネットワーク帯域が増大する。しかし運用品質の観点で述べると、耐障害性が増大することで運用品質が向上する。この運用品質の向上を定量化する必要があり、サービスレベル合意に基づく確率論的な耐障害性指数を提案した。分散システムを構成する要素のトポロジと、サービス維持に必要な制約条件を与えることにより、定量的な数値としての指数を得ることができるため、計算機資源やネットワーク資源の追加による投資対効果を定量化することができる。

研究成果の概要（英文）：This research aims to find effective methods for improving operational quality in edge computing environments, which are located closer to service users and data sources. Edge computing environments are characterised by low latency, which makes it difficult to concentrate and scale computing resources when compared to cloud computing environments. An agent simulation was used to evaluate under what conditions the economic incentives associated with maintaining and improving operational quality are given.

研究分野：ネットワーク

キーワード：エッジコンピューティング SRv6 レジリエンス エージェントシミュレーション 運用品質

## 1. 研究開始当初の背景

クラウドコンピューティングという言葉が生み出されて 10 年が経過し、当初ビジネスモデルとして提案されたこの言葉が、現在ではサービスとして実体を持つに至っている。アメリカ国立標準技術研究所(NIST)の定義によれば、クラウドコンピューティングとは計算機資源を利用者が要望に応じた規模で即座に利用できるサービスモデルである。計算機資源はコモディティ化しているため、このサービスを維持するための電力使用量と運用コストが利用料金に強く反映される。電力使用量や運用コストの合理化による効果は、大規模であるほど顕著に表れるため、巨大資本を有する組織が優位に立つことができる。事実、2017 年のクラウドコンピューティング市場はトップ 4 社がシェアの半分以上を独占している。後塵を拝した中小規模の事業者が前述の 4 社を打ち倒すような大番狂わせを発生させる可能性は低い。クラウドコンピューティング環境のような巨大な分散システムの実証実験環境を特定少数の組織が独占することを指して「コンピュータサイエンスは終わった」と述べられたこともあった。

クラウドコンピューティング環境上で様々なアプリケーションやサービスが提供されるようになることで、遅延センシティブなアプリケーションにおけるクラウドコンピューティング環境利用の問題点が顕在化した。クラウドサービスプロバイダは世界各地のデータセンターに計算機資源を配置しているが、それでもサービス利用者あるいはデータソースとこの計算機資源の間で数十から百数十 ms の伝送遅延が発生する。伝送遅延の大きさはユーザエクスペリエンスと、通信に要する消費電力に影響を与える。後者は非電化地域におけるセンサデバイスのような、電力が潤沢に提供されない端末において致命的な問題となる。実世界にある多様なデータを収集して大規模データ処理技術等を駆使して分析・知識化を行い、そこで創出した情報・価値によって産業の活性化や社会問題の解決を目指すサイバーフィジカルシステムへの需要が高まるにつれ、クラウドコンピューティング環境が抱える伝送遅延の問題は解決しなければならない課題となった。

そこでエッジコンピューティングが注目され始めた。エッジコンピューティングは、サービス利用者あるいはデータソースにより近い場所(地域データセンター)に計算機資源が配置されているため、伝送遅延は十分に短い。支配的な組織があらゆる地域にデータセンターを建設することは投資対効果の観点から困難なので、エッジコンピューティング環境を数社が独占することは困難と考えられる。そのため中小規模の組織や個人がデータセンターに計算機資源を配置し、全世界からその利用を受け付けることも可能である。このとき、個々が独立して収益を上げることでもできるが、複数の組織や個人が協働することでもできる。これを本研究提案者はコミュニティ・エッジコンピューティング環境(コミュニティ・エッジ)と呼んでいる。

コミュニティ・エッジに限らずエッジコンピューティング環境は前述のようにサイバーフィジカルシステムを実現する環境として着目されている。サイバーフィジカルシステムでは、個人やセンサデバイスが提供するまとまった量の情報を、それを必要とする個人や組織が値段をつけて売買する情報ハーベスティングのような、インフラストラクチャに対する高い信頼性を要求するアプリケーションも動作する。そのためエッジコンピューティング環境ではクラウドコンピューティング環境と同等以上の高い品質の運用が求められる。また資本投資に対する収益が見込めない地域において計算機資源の撤退が行われてしまうこともまた、インフラストラクチャへの信頼性を損なう一因となる。

このとき、コミュニティ・エッジの運用にどのような仕掛け、動機付けを与えることにより、高い運用品質を維持し、そのコミュニティをより長く持続させることや、コミュニティの規模を継続的に拡大させることに寄与し得るだろうか。また複数のコミュニティ・エッジが成立しているとき、コミュニティ・エッジ間にどのような仕掛けを与えれば相互に影響を与え合い、お互いのコミュニティの継続や拡大に寄与し得るだろうか。さらには既存のクラウドコンピューティング環境とどのような関係性を成立することができるだろうか。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は前節で述べた問いを明らかにするために、以下に示す小研究を提案し、その妥当性を評価実験を通して検証する。

1. **コミュニティ・エッジの運用への経済的動機付けの付与に関する研究**  
計算機資源やネットワーク資源を提供した人間や組織(以下、資源提供者)に対し、これらの資源を利用できるサービスを維持する運用に対して実際的な対価を与え、得られた対価を利用して計算機資源やネットワーク資源を利用することができる経済モデルを提案する。シミュレーション実験を用いて、提案するモデルにおいて多様な資源投下パターンや利用形態パターンを想定し、評価実験を行うことで提案手法の有効性を検証する。
2. **既存のクラウド・コンテナ基盤における経済的動機付け付与手法の設計と実装**  
前述の経済的動機付け付与手法の有効性を検証するため、実環境での評価実験を実施するため、既存のクラウド基盤やコンテナ基盤において仮想計算機やコンテナの資源利用を計測する機構の設計と実装を行う。
3. **実環境における実装評価とインター・コミュニティ・エッジ為替決定方式の提案**  
本研究提案者が2012年から構築してきた広域分散プラットフォーム"distcloud"を利用して、このプラットフォームを構成するクラウド・コンテナ基盤に前節で実装した経済的動機付け付与手法を導入することで、実環境における実証実験を行い、提案手法の有効性を評価する。また異なるコミュニティ・エッジ間での通貨の交換(為替)方式についても検討を行う。

エッジコンピューティングは現在活発に研究が行われている分野ではあるが、これらの研究の多くはエッジコンピューティング環境の特徴である遅延の低さを利用したサービスの評価である。本研究提案者は2012年から広域分散プラットフォームにおける投資と継続性の困難について経験しており、需給の関係を明らかにすることで過剰投資を抑制しつつ、需要に応じて供給の継続を維持したいと考えていた。本研究提案はエッジコンピューティングの持続性について着目した点について他に類を見ないものである。

本提案がエッジコンピューティング環境を急速に発達させることに寄与するならば、サイバーフィジカルシステムを支える基盤となり、多様なアプリケーションの発展が期待できる。また、クラウドコンピューティング環境とエッジコンピューティング環境が相補的な関係を成立させ、相互の需要を刺激し合うことでより巨大な計算機環境を成立させ、より洗練された運用自動化技術の発展に影響を及ぼすことも考えられる。

## 3. 研究の方法

前節で述べた3つの小研究において、以下に示す手法と評価を実施することにより、提案手法が有効に機能する環境を明らかにする。

- 1. コミュニティ・エッジの運用への経済的動機付けの付与に関する研究**  
資源提供者は、データセンターに計算機資源を設置してインターネットからこの計算機資源を利用できる環境を維持することにより実際的な対価を受ける。ここで述べる実際的な対価とは、このコミュニティ・エッジにおいてのみ流通可能な貨幣を指す。計算機資源の利用者(以下、利用者)は、コミュニティ・エッジにおける計算機を利用するときは、提供者に対してこの通貨を利用して支払いを行う。すなわちコミュニティ・エッジにおいては利用者は同時に資源提供者でなければならない。この関係性により、需要の高い計算機を運用する資源提供者は、より多くの対価を得るために耐障害性を高める動機付けが与えられ、一方で資源の供給が十分でなければ利用者はそのコミュニティ・エッジから離脱していくこのとき資源提供者と利用者の行動原理をそれぞれ複数種類用意し、その行動規則に従うマルチエージェントシミュレーションを行う。シミュレーションの規模は提供者数を 100、利用者数を 10 万のオーダーで行うことを予定している。また、何らかの外乱要因の発生により全体の利用状況がどのように変動するかを観察・評価し、多様なパラメータ・分布の設定により、どのような状況においてどのような結果が有意に成立し得るかについての調査を行い、実際の市場調査を反映させて提案手法が有効に機能するかを検証する。
- 2. 既存のクラウド・コンテナ基盤における経済的動機付け付与手法の設計と実装**  
前述のコミュニティ・エッジに対する経済的動機付け付与手法の有効性を検証するために実環境での検証実験を行う。実験のためにはコミュニティ・エッジを構成する計算機資源とネットワーク資源を実際に管理するクラウド基盤、コンテナ基盤において計算機資源とネットワーク資源の利用監視計測を行う必要がある。そこ OpenStack、Hinemos、Wakame-VDC といったクラウド基盤や、Docker Swarm、Kubernetes のようなコンテナオーケストレータを対象とした利用監視計測機構の設計と実装を行う。利用監視は粒度の小さな情報を収集する必要があるが、この計測が仮想化基盤に対して与える影響を十分に低減する設計を行い、計測可能な情報の粒度に従い、課金金額を決定するパラメータの自動設定手法について提案し検証する。
- 3. 実環境における実装評価とインター・コミュニティ・エッジ為替決定方式の提案**  
現在国内 12 拠点からなる広域分散プラットフォーム`Distcloud`を構成するクラウド・コンテナ基盤に前述の利用監視計測機構を導入し、実際のコミュニティ・エッジ環境における経済的動機付けの果たす役割を検証する。また、提供される資源の量に応じてコミュニティを分割し、コミュニティ間での通貨の交換(為替)を決定する手法を提案し、その評価を行う。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 2019 年度

レジリエンスの定量的な評価に関する研究で、3 件の国内発表(うち 1 件が査読あり)、5 件の海外発表(うち 3 件が査読あり)を行った。1 本の論文を投稿したが、残念ながらこちらは不採録であった。現在修正を施し再投稿の準備をしている。マルチエージェントシミュレータの設計と評価について国内研究会で発表し、実装を GitHub で公開した。当初の目標は概ね達成することができたと言える。研究提案当初は、各年度において国内研究会やシンポジウムでの発表を 5 回、国際学会での発表を 2 回、1 本の論文投稿を行うことを目標と掲げており、定量的にはこの水準を満たしていると考えている。また物理的に動的再構成されるネットワークの構築という新しい研究を当初目標に加えて展開することができた点を肯定的に評価している。

##### 4.2 2020 年度

当初は運用品質を極めて簡略化された形で想定していたが、計算機資源提供者の投資の多様性を鑑みるに、運用品質をそれぞれ適切に定量化する必要があることを初年度で気づかされたことが大きい。この部分を十分な時間をかけて定式化し、定量的な評価指標を確立したことは重要であった。一方で十分なエフォートを投じることができれば、コンテナオーケストレーションソフトウェアへの経済的動機付けの導入(所有する実際的な資産残高に応じてデプロイすることのできるコンテナが制約される)についても少なくともも初歩的な実装はできたと考えているが、残念ながら COVID-19 の状況における本務負荷の増大に伴い、相対的に本研究に投資することのできる物理的(時間的)資源を減少させざるを得なかった。ただし、これは 3 年目である 2021 年度では実装可能であると考えている。重ねてしかしながら、当初 3 年目に想定していた実証実験と併せて 3 年目に行くことは困難であると考えており、終了の 1 年延長も念頭にお

いて研究を進めている。

#### 4.3 2021 年度

これまでの成果について 6 本の査読付き国際学会予稿としてまとめており、これは当初の予定を越える進捗である。当初の予定を越える進捗となった理由として、初年度の成果から得られた「冗長回線の価値をレジリエンスの観点で定量的に評価を行う」という新たな研究課題を探究したことにもよる。一方で最終年度においては新たな研究提案に力点を置いたこともあり、またそれにより得られた新たな研究開発体制の構築に時間を要したこともあり、当初の予定通りの実証実験による評価が遅延してしまったことは、しっかりと減点して評価しなければならない。最終年度においては、上記のレジリエンスの研究提案も行っており、一つは情報システム研究機構の成果加速プロジェクトとして採択され、もう一方の科研費提案は残念ながら不採択であった。また、より厳しい環境でのエッジコンピューティング環境そのものの創発として、非電化地域における IP 接続性の延伸という研究課題を生み出すことができた。この課題については 2019 年度に情報システム研究機構の未来投資プロジェクト(フィジビリティスタディ)として採択されたほか、2022 年度の総務省戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)としても提案を行っている。これらの新しい研究提案を数多く生み出すことができたという観点も加味し、当初の計画以上の進展として自己評価する。

#### 4.4 2022 年度

エッジコンピューティング環境に計算機資源やネットワーク資源を追加すると、利用可能な計算機資源あるいはネットワーク帯域が増大する。しかし運用品質の観点で述べると、耐障害性が増大することで運用品質が向上する。この運用品質の向上を定量化する必要がある、サービスレベル合意に基づく確率論的な耐障害性指数を提案した。分散システムを構成する要素のトポロジと、サービス維持に必要な制約条件を与えることにより、定量的な数値としての指数を得ることができるため、計算機資源やネットワーク資源の追加による投資対効果を定量化することができる。本年度は、エッジコンピューティング環境内で動作するサービスのプロセスの割り当て問題を題材とした。6 種類の意思決定アルゴリズムを用意し、100 台の計算機資源が固定された帯域のネットワークで相互接続されている環境において、どの意思決定アルゴリズムが最も運用品質の向上に寄与するかをエージェントシミュレーションを用いて評価した。その結果、当該制約条件下においては全体の計算機資源とプロセスの発生を監視させるスーパーサービスの存在が有利であることが示された。今後は運用品質の向上に有利なアルゴリズムの転換がどの程度の計算機資源数規模において生じるのかを精査する予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Daisuke Sasaki, Hiroki Kashiwazaki, Mitsuhiko Osaki, Kazuma Nishiuchi, Ikuo Nakagawa, Shunsuke Kikuchi, Yutaka Kikuchi, Shintaro Hosoi, Hideki Takase	4. 巻 -
2. 論文標題 Resource Allocation Methods among Server Clusters in a Resource Permeating Distributed Computing Platform for 5G Networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE 47th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Shuichiro Shimatani, Hiroki Kashiwazaki, Nobukazu Iguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 SRv6 Network Debugging Support System Assigning Identifiers to SRH	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE 47th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC), 2023	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kashiwazaki Hiroki, Takakura Hiroki, Shimojo Shinji	4. 巻 -
2. 論文標題 A Proposal of Stochastic Quantitative Resilience Index Based on SLAs for Communication Lines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 International Conference on Information Networking (ICOIN)	6. 最初と最後の頁 143,148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ICOIN50884.2021.9333893	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kashiwazaki Hiroki, Takakura Hiroki, Shimojo Shinji	4. 巻 -
2. 論文標題 An Evaluation of Stochastic Quantitative Resilience Index Based on SLAs of Communication Lines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)	6. 最初と最後の頁 1449,1454
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/COMPSAC51774.2021.00215	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kashiwazaki Hiroki、Takakura Hiroki、Shimojo Shinji	4. 巻 -
2. 論文標題 A Proposal of Stochastic Quantitative Resilience Index Based on SLAs for Communication Lines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 International Conference on Information Networking (ICOIN)	6. 最初と最後の頁 143-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/icoin50884.2021.9333893	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kashiwazaki Hiroki、Takakura Hiroki、Shimojo Shinji	4. 巻 -
2. 論文標題 A Quantitative Evaluation of a Wide-Area Distributed System with SDN-FIT	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE 44th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)	6. 最初と最後の頁 607-612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/compsac48688.2020.0-189	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kashiwazaki Hiroki、Miura Shinnosuke、Shimojo Shinji	4. 巻 N/A
2. 論文標題 A Proposal of SDN-FIT System to Evaluate Wide-Area Distributed Applications Based on Exhaustive FIT Scenario Generation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE 43rd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)	6. 最初と最後の頁 36-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/COMPSAC.2019.10180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kashiwazaki Hiroki、Takakura Hiroki、Shimojo Shinji	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Resilience Evaluations of a Wide-area Distributed System with a SDN-FIT system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM)	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICT-DM47966.2019.9032993	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki Kashiwazaki, Shinnosuke Miura, Hiroki Takakura, Shinji Shimojo	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Evaluation of wide-area distributed services by SDN-FIT system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 48th meeting of the Asia-Pacific Advanced Network	6. 最初と最後の頁 2-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Hiroki Kashiwazaki
2. 発表標題 Fault tolerance evaluation of wide area distributed application based on exhaustive FIT scenario generation
3. 学会等名 2019年度第1回情報処理学会インターネットと運用技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Kashiwazaki
2. 発表標題 Omission Approach of SDN-FIT evaluation to evaluate wide area distributed applications
3. 学会等名 第12回インターネットと運用技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Resilience Evaluator <a href="https://github.com/reokashiwa/graph">https://github.com/reokashiwa/graph</a> Multi-Agent Simulator <a href="https://github.com/reokashiwa/mas">https://github.com/reokashiwa/mas</a> TinkerBellSim <a href="https://github.com/b5g-ex/tinker_bell_sim">https://github.com/b5g-ex/tinker_bell_sim</a>
---



6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------