

# エッジコンピューティングにおける WebAssembly マイグレーションを活用した高可用性機能の検討

齊藤 優月<sup>1,a)</sup> 藤井 大悟<sup>1,b)</sup> 松原 克弥<sup>1,c)</sup> 中田 裕貴<sup>1,2,d)</sup>

## 1. はじめに

エッジコンピューティング [1] におけるオーケストレーションでは、デバイスとエッジサーバ、データセンタ・クラウド間の計算機アーキテクチャ異種性、および、通信レイテンシや計算資源量が段階的に異なる階層的なノード構成を考慮したアプリケーション配置の最適化が求められる。エッジサーバは、低消費電力性能に優れた ARM CPU を利用し、クラウドサーバは性能が優れた x86-64 CPU を利用することが多く、計算機のアーキテクチャが異なる [2]。エッジサーバは、あらゆる場所に配置され、近傍のデバイスと連携するが、クラウドサーバは、単一のデータセンタに配置され、複数のエッジサーバと連携する。そのため、計算機特性と地理的配置によってそれぞれの環境が縦に並んだ階層構造である。エッジサーバは、近傍のデバイスと連携するため、ユーザの移動などによって最も近いエッジサーバが変化した場合、移動に合わせて処理内容やデータをクラウドやエッジ間で移動する必要がある。移動を容易にするために、エッジサーバ上で実行するアプリケーションをステートレスにすることが主流であったが、より複雑なアプリケーションを実行するために、ステートフルなアプリケーションをエッジ上で実行するプラットフォームが登場している [3]。このようなステートフルな環境では、アプリケーションの移動時に処理内容やデータも同時に移行する必要がある。

分散コンピューティング基盤におけるアプリケーションの配置・実行にはコンテナとコンテナオーケストレータが広く用いられているが、それらをエッジコンピューティングに適用した場合、3つの特性の考慮が不十分である。Docker などのコンテナは、OS プロセスを用いた仮想化技術であり、従来の VM と比較してメモリ消費が少ない。

エッジサーバのような計算資源に制約がある環境でのアプリケーション実行に適しているが、実行される環境に合わせてアプリケーションの再コンパイルが必要であり、異種環境でのシームレスな実行に課題がある。コンテナオーケストレータの Kubernetes は、クラウドサーバ間でコンテナの配置の変更やスケールアウト・スケールインによる負荷分散を実現する。しかしながら、エッジコンピューティング環境で Kubernetes を使用した場合、エッジサーバを水平的なリソース群として扱うため、計算性能やアーキテクチャの違い、地理的分散を考慮できていない。また、Kubernetes におけるコンテナの再配置は、実行中のコンテナを終了し、別のサーバで起動させるため、コンテナ内の処理内容やデータは破棄されてしまい、ステートフルなアプリケーションの移行には不十分である。

本研究では、エッジコンピューティングにおける、計算機環境の異種性と階層性、アプリケーションの処理内容やデータを維持した再配置を意識したアプリケーション実行環境の実現を目指す。

## 2. 提案

アーキテクチャ中立なアプリケーション実行環境である WebAssembly(以降, Wasm) をコンテナ内で実行し、Kubernetes を用いてマイグレーションすることで、計算機環境の異種性や階層性に適したステートフルなアプリケーションの再配置を実現する。提案手法を図 1 に示す。仮想命令セットアーキテクチャである Wasm は、あらゆる言語から Wasm バイトコードにコンパイルし、多様な CPU アーキテクチャに対応した VM を用いて Wasm バイトコードを実行できる。また、VM を作成する Wasm ランタイムは、デバイスやエッジ、クラウドなどの環境に合わせて機能やメモリ消費量が異なる多くの実装が存在し、これらを組み合わせることで各環境の特徴を最大限活用したアプリケーションの分散実行が可能となる。我々は、Wasm ランタイム間で Wasm バイトコードのライブマイグレーションを実装し、エッジサーバとクラウドサーバ間の連携処理を実現している [4]。しかしながら、オーケストレータからの操作は実現できておらず、階層性を意識した実アプリ

<sup>1</sup> 公立はこだて未来大学

Future University Hakodate

<sup>2</sup> さくらインターネット株式会社

SAKURA internet Inc.

a) g2124013@fun.ac.jp

b) g2124038@fun.ac.jp

c) matsu@fun.ac.jp

d) y-nakata@sakura.ad.jp

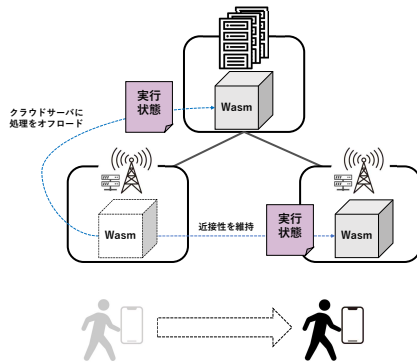


図 1 エッジコンピューティングに適したアプリケーション再配置

ケーションのライブマイグレーションは実現できていない。我々は、異種 Wasm ランタイム間ライブマイグレーション機構を Kubernetes から操作可能にすることで、エッジコンピューティングの異種性や階層性を意識した、ステートフルなアプリケーションの再配置を実現する。

### 3. 実装状況

提案手法の実現可能性を検討するために、エッジサーバ間のライブマイグレーション機構を Kubernetes のエッジコンピューティング向けディストリビューションである k3s に実装している。k3s は、計算処理性能に制約があるエッジサーバでの利用を想定し、メモリ消費量が少ないことが特徴である。エッジサーバで使用する Wasm ランタイムには、エッジサーバ向けの機能を備えた WasmEdge を使用した。

Wasm バイトコードのコンテナ実行を Kubernetes から命令するために、runwasi を使用した。runwasi は、Kubernetes が使用するコンテナランタイムである containerd から WasmVM を起動するための仲介機構である、containerd-shim を作成する。通常の containerd-shim は、コンテナの起動処理を実行するが、runwasi の containerd-shim は、Wasm ランタイムの VM 起動処理を代わりに実行するため、コンテナ内で Wasm バイトコードを実行できる。

我々は、runwasi の containerd-shim からマイグレーション機構を呼び出し可能にすることで、Kubernetes からのライブマイグレーション機構の使用を可能にした。我々が以前実装した異種 Wasm ランタイム間マイグレーション機構を containerd-shim のコンパイル時にリンクすることで、マイグレーション機構を有する containerd-shim を作成した。また、コンテナに、特定の環境変数が設定された際に、実行状態ファイルを基にアプリケーションを復元可能にすることで、WasmEdge と runwasi を使用したマイグレーション機構を実現した。

現在、k3s クラスタ上で、実装した containerd-shim を用

いてコンテナマイグレーションを実行する機構を実装している。クラスタ上のコンテナは、k3s が提供する永続ストレージに接続し、コンテナ終了時に実行状態を書き込み、再配置後に同一の永続ストレージに接続し、実行状態を読み込み復元することでライブマイグレーションを実現する。現在、コンテナ配置先マシンを選択するスケジューラと、コンテナランタイムと通信する kubelet を改変し、コンテナの構成を動的に変更することを検討している。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、異種 Wasm ランタイム間ライブマイグレーション機構と Kubernetes の連携による、エッジコンピューティングの異種性や階層性を意識した、ステートフルなアプリケーションの再配置を提案した。今後は、計算機性能やアプリケーションの要求に応じた Wasm ランタイムを間の切り替え機構と、近接性維持や階層構造を意識したアプリケーション配置の決定手法を検討したい。

### 参考文献

- [1] Wei Yu, Fan Liang, Xiaofei He, William Grant Hatcher, Chao Lu, Jie Lin, and Xinyu Yang. A survey on the edge computing for the internet of things. *IEEE Access*, 6:6900–6919, 2018.
- [2] A. Barbalace, M. L. Karaoui, W. Wang, T. Xing, P. Olivier, and B. Ravindran. Edge computing: The case for heterogeneous-isa container migration. *Proceedings of the 16th ACM SIGPLAN/SIGOPS International Conference on Virtual Execution Environments ser. VEE '20*, pages 73–87, 2020.
- [3] Carlo Puliafito, Claudio Cicconetti, Marco Conti, Enzo Mingozzi, and Andrea Passarella. Balancing local vs. remote state allocation for micro-services in the cloud-edge continuum. *Pervasive and Mobile Computing*, 93:101808, 2023.
- [4] Daigo Fujii, Katsuya Matsubara, and Yuki Nakata. Stateful vm migration among heterogeneous webassembly runtimes for efficient edge-cloud collaborations. In *Proceedings of the 7th International Workshop on Edge Systems, Analytics and Networking*, EdgeSys '24, page 19–24, New York, NY, USA, 2024.