

## 論文要旨

2025 年 9 月 10 日

※報告番号	甲第379号	氏名	李彦志
主論文題名			
大規模異種環境におけるリソース管理システム：Function-as-a-Service によるアプローチ			
内容の要旨			
<p>近年、IoT 技術の進展と人工知能（AI）によるデータ解析の高度化により、センサやエッジデバイスから生成される膨大なデータを、地理的に分散した計算資源上で効率的に処理するための計算基盤が求められている。従来、クラウドやデータセンターに代表される集中処理型アーキテクチャが主流であったが、データトラフィックの増大やリアルタイム性の要件などにより、エッジコンピューティングと言ったネットワーク末端に近いリソースを活用する分散処理型アーキテクチャへの移行が注目されている。</p> <p>しかしながら、現行の分散実行環境には、主に二つの本質的課題が内在している。第一に、異種ハードウェアの透過的な抽象化が不十分であることが挙げられる。多くの既存ミドルウェアは同一構成の計算機群を前提としており、GPU、FPGA、NPU といった異種計算機資源が混在する現代的なデータセンター環境において、開発者はそれぞれのハードウェア特性に合わせて個別に最適化された計算コードを設計する必要がある。その結果、開発の負荷が増大するだけでなく、ハードウェアごとの最適化が計算資源の固定的利用を招き、システム全体としての柔軟性と再利用性を著しく損なうという課題がある。</p> <p>また、分散環境全体におけるスケーラビリティの限界がある。BOINC や Slurm といった代表的な計算基盤は、いずれも中央集権的な管理ノードを通じて各端末を制御・調整する方式を採用しており、接続ノード数が増加するにつれて管理ノードの負荷が急激に上昇し、通信遅延や管理の非効率性が顕在化する。このような設計は、ネットワーク全体に跨るスケーラブルな計算資源の統合を阻む大きな要因となっている。</p> <p>これらの課題を解決するため、本研究では「サーバ側動的仲介手法」を提案し、その実証のためにプロトタイプシステム MEC-RM (Multi-access Edge Computing Resource Manager) を構築した。この手法では、計算リソースを提供する側と利用する側の双方をクライアントとして扱い、サーバは計算要求に応じて、利用可能な計算資源に対して動的にタスクを割り当てる仲介的役割を果たす。MEC-RM においては、計算要求の非同期的な受付、ならびに計算ノードの状態管理を通じて、ネットワークの不安定性や一部ノードの障害に対する耐性を高める設計</p>			

を実現した。これにより、中立的仲介によるリソース配分の柔軟性と信頼性が確認されるとともに、非同期処理に伴う整合性管理や、実行単位（ジョブ/関数）の抽象度設計に関する知見も得られた。

これらの知見を基礎として、より高い柔軟性・スケーラビリティ・抽象化能力を備えた新たな分散計算基盤として、本研究では Function-as-a-Service (FaaS) モデルを中核とした「Pleiades」を提案する。Pleiades は、ユーザが実行したい処理内容を関数として登録するだけで、その関数を実行可能な計算ノードが自律的に処理を引き受ける構成となっている。ユーザは関数がどのノード上で実行されるかを意識する必要がなく、Pleiades が裏側で自動的にリソース選択・割当・実行制御を行うことで、異種ハードウェアを跨いだ透過的な関数実行を可能にしている。また、計算ノードの自己実行能力申告により、動的に参加・脱退や負荷調整などにも対応可能になる。

本システムではさらに、各ノード側に軽量なスクリプト実行環境（仮想機械：VM）を実装することで、実行形式として Lua または JavaScript による関数スクリプトを受け入れ、各ノードのリソース状況に応じて動的に解釈・実行させる設計を採用した。これにより、ユーザは「どのようなハードウェアで実行するか」ではなく、「どのような処理を行うか」だけに集中でき、ハードウェア差異の吸収とコード移植性の両立が実現されている。また、VM 内部では専用の抽象化関数（たとえば FFT や機械学習推論など）が導入されており、GPU や FPGA などのアクセラレータも、ユーザには見えない形で統一的に利用できる構成となっている。

Pleiades は、MEC-RM で提案した「サーバ側動的仲介手法」の基本的な構造を継承しつつ、Function 単位での抽象化とノード側の自律性を融合させた拡張設計となっており、より柔軟な分散制御とスケーラブルなノード管理を両立する基盤を提供するものである。

本研究では、Pleiades のシステム設計、各構成モジュールの役割、実装上の工夫、および模擬的な環境と実アプリケーションにおける実験で評価を行った。評価では、ノード数の増加や処理リクエストの集中に対する性能変化を観測し、Pleiades が異種分散環境において有効に機能することを確認した。これにより、Pleiades は IoT 時代における分散計算基盤として、実用性と拡張性を兼ね備えた有望なアーキテクチャであることを実証した。