

氏名	小田嶋 哲哉		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第 7700 号		
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	高並列言語による演算加速器及び相互結合網の効率的利用に関する研究		
主査	筑波大学 教授	工学博士	朴 泰祐
副査	筑波大学 教授	学術博士	和田 耕一
副査	筑波大学 教授	博士(理学)	高橋 大介
副査	筑波大学 教授	博士(理学)	建部 修見
副査	理化学研究所 研究員	博士(工学)	村井 均

## 論文の要旨

本論文は、現在の HPC (高性能計算) 研究において重要な計算リソースとなっている GPU (Graphic Processing Unit) を搭載した並列計算機における総合的演算性能を向上させるため、GPU と CPU を計算に併用する際、そのプログラミングを並列処理向け言語とランタイムシステムの組み合わせにより、ユーザに負担をかけずに行う手法を提案・実装している。加えて、GPU 向け並列通信ネットワークとして、既存の標準技術である InfiniBand だけでなく、GPU 間直接通信を実現する TCA (Tightly Coupled Accelerators) コンセプトに基づく専用通信網との併用で通信性能を向上させ、それについても同様に高並列言語に実装させることにより、演算と通信の両面においてハイブリッドリソース利用環境を言語レベルで実現し、それらによる並列 GPU 計算の性能向上を実アプリケーション上で評価している。

本研究の特徴は、従来からある CPU と GPU のハイブリッド負荷分散を、高レベル並列言語である XcalableMP に適用し、その実行系をフランス INRIA で開発された StarPU ランタイムシステムを活用することで、ユーザにほとんど負担をかけることなく実現する手法を提案している点にある。このため、本研究は INRIA との共同研究として実施された。ハイブリッド通信に関しても、次世代の GPU 計算では通信ボトルネックがあるクラスタの問題では顕著になり、低レイテンシ通信が求められる点に着目し、利用可能な通信リソースを最大限に利用する手法を、ユーザ透過に実現し、一定の性能向上を得た。

これらのシステムを実装した結果、演算性能・通信性能のそれぞれに対し、特に小規模問題に対する処理時間を最大で数十%程度削減できることが示され、併せてプログラムの生産性が向上することを示した。

## 審査の要旨

### 【批評】

本論文は基本的に2つの部分から構成されている。前半はGPUとCPUの併用を高並列言語レベルでユーザに提供し、単純なディレクティブ記述で、本来並列CPU向けに記述されていたプログラムを容易にGPU/CPUハイブリッド計算に拡張する技術を提案・実装している。GPUとCPUの演算効率は異なり、実応用ではその状況を見つづ最適化を行い、両リソースへの処理量の割当を調整する必要があるが、本システムではこれをユーザが柔軟に記述しうるインタフェースと動的スケジュール手法を提供している。本システムではその根底となっているStarPUランタイムシステムの制約より、基本的に各計算リソースへのデータ割当によって計算負荷調整を行っているため、データ量に応じて計算負荷が極端に変化するような特殊なアプリケーションには適用できない。しかし、多くの高性能計算アプリケーションでは演算量は、オーダーの差はあるものの、データ量に対して単調増加的に増えるため、一定の観測による動的負荷分散は効果があり、適用可能問題は多岐に渡ると考えられる。本論文では、典型的な問題として粒子多体系問題と線形行列計算を取り上げ、その有効性を示している。

ハイブリッド通信に関しては、主として高バンド幅通信を実現するInfiniBandと、主として低レイテンシとブロックストライド対応通信機能を持つTCA機構を適材適所的に組み合わせることにより、ステンシル計算のような典型的な高性能並列計算の通信性能向上を実現し、さらにこれをユーザ透過な高並列言語に実装したことで、ユーザへのプログラミング負担を減らし生産性を向上させることを示した。TCAのような専用通信網はどのようなシステムにも適用できるわけではないが、システムに部分的に投入することにより、従来のInfiniBandのみによる通信に比べ、特に小規模問題での強スケーリングを実現できることが示された。本手法は全ての問題に対応できるわけではないが、近接通信系と広域通信系の組み合わせからなる高性能計算問題は多数あり、両ネットワークの特性を組み合わせ、かつこれを簡単なプログラミングで利用できる点は高く評価できる。

総合的に、本論文は次世代のGPUに代表されるアクセラレータを用いた大規模並列計算において、あらゆる計算及び通信リソースを積極的かつ効率的に利用するアプローチを、高並列言語レベルで実現するという試みであり、その適用範囲や適用問題サイズに制限はあるものの、今後質量ともに多様化する高性能計算システムにおける一つの手法としてまとめ、その実現性を示した点が大きく評価できる。

### 【最終試験の結果】

平成28年1月26日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

### 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。