

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名: **ULP-HPC: 次世代テクノロジーのモデル化・最適化による超低消費電力ハイパフォーマンスコンピューティング**

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

研究代表者

松岡 聡(東京工業大学学術国際情報センター 教授)

主たる共同研究者

須田 礼仁(東京大学大学院情報理工学系研究科 教授)

青木 尊之(東京工業大学学術国際情報センター 教授)

本多 弘樹(電気通信大学大学院情報システム学研究科 教授)

鯉渕 道紘(国立情報学研究所 准教授)

合田(日向寺) 祥子(東海大学情報教育センター 講師)(~平成 22 年 7 月)

3. 研究実施概要

高性能計算(HPC)の大規模化・高性能化を阻害する要因として近年特に問題となっているのが、処理能力の向上と引換えに電力消費が急速に増大していることである。そこで本チームとしては、10 年後に HPC の性能あたりの電力効率を現状の 1000 倍とすることを目標とした ULP-HPC(Ultra Low Power HPC)を提案してきた。方法としては[1] 超マルチコア・ベクトルアクセラレータ・次世代省電力メモリ・省電力高性能ネットワークなどのハードウェア要素を活用するための、演算ライブラリやスケジューリングなどの高性能・低消費電力ソフトウェア基盤の研究開発、および[2]数理的な新しい手法に基づいた性能モデル・および省電力の自律・自動最適化(チューニング)基盤技術の研究開発を軸とする。そして[3]実際の大規模 HPC アプリケーションにおいても自動最適化や省電力ハードウェア・ソフトウェア基盤を活用する省電力化アルゴリズムを開発し、以上の連携により目標を達成する。

本プロジェクトの研究成果は、東京工業大学 TSUBAME1/2 スパコンなどの世界トップクラスのスパコンの設計・運用へフィードバックされてきた。特に 2010 年 11 月に松岡が主導して導入・運用開始した TSUBAME2.0 は、GPU アクセラレータや Flash SSD などの大規模導入を行うことにより、我が国初のペタフロップス達成、世界 4 位の演算性能、および世界一省エネ性能に優れた運用スパコン(Greenest Production Supercomputer)認定を受けるという成果を挙げた。さらに TSUBAME2.0 のほとんど全ての 4000GPU を利用し、大規模実用 HPC アプリケーションである樹枝状凝固計算にて 2.0PFlops、1468GFlops/Watt という省電力・高性能を達成し、HPC 分野の最高峰の学術賞である Gordon Bell 賞を受賞した。

以上のような成果達成に寄与した各グループの研究項目の概要を以下に示す。

[1] 高性能・低消費電力ソフトウェア基盤

以下のような項目について研究を推進してきた:(1-1)GPU アクセラレーションに注目し、高性能・低消費電力ソフトウェアの最適化技法を多数提案・実装した(主に松岡グループ・須田グループ)。計算対象は FFT、行列ソルバー、モンテカルロ木探索や文字列照合など多岐に渡り、多くは自動最適化がなされている。その中で、数千 GPU をスケーラブルに活用しつつ CPU/GPU の特性を考慮し負荷分散を行う密行列ソフトウェアの実現は、TSUBAME2.0 の Greenest Production Supercomputer 受賞に必要不可欠であった。(1-2)アクセラレータの利用を容易にするために、プラットフォームをまたいだプログラミング API として、既存の標準的インタフェースである OpenMP を用いて GPU に対応可能な処理系 OMPCUDA の開発を行った(本多グループ)。(1-3) DRAM よりも省電力な不揮発性メモリの高度利用技術や、Flash SSD を効率利用するチェックポイント技術の提案評価を行い(松岡グループ)、TSUBAME2.0 への Flash SSD の装備による省電力化を推進した。(1-4) インターコネクトの省電力化のために、リンク・スイッチの電力モデルを構築し、動的にリンク On/Off 制御を行う手法や通信パターンに応じた動的トポロジの変更による電力最適化の研究を行った(鯉渕グループ)。(1-5) HPC

システム全体の最適化を行うため、非均質システムを対象としたスケジューラ・高信頼化システムソフトウェアの基盤研究を行い(松岡グループ)、震災後における TSUBAME2.0 節電運用に活用されている。

[2] 自動チューニング基盤技術:

高性能・低消費電力のための自動チューニング技術の研究について、東大須田グループを中心に推進した。主要なテーマは以下の通りである:(2-1) 計算システムの消費電力モデルを構築した。(2-2) 低消費電力化自動チューニング数理基盤の研究を推進し、中でもオンライン自動チューニングとワンステップ近似およびそれらの発展形を開発し、世界的な自動チューニング研究のなかにあって極めて独自の成果を挙げた。(2-3) 低消費電力化自動チューニングプログラミングシステムとして、ABCLibScript および ppOpen-AT の低消費電力のための拡張を行った。これらの成果により高性能・低消費電力ソフトウェアの実現が可能となった。

[3] 大規模 HPC アプリケーション:

超省電力型の HPC アプリケーション及びアルゴリズムの研究開発について、東工大青木グループを中心に推進した。まず様々なステンスル系アプリケーションのアクセラレータ上における詳細な電力測定により、大規模アプリケーションの消費エネルギーに大きく影響を与えるパラメタの洗い出しを行い、それらは TSUBAME2.0 設計へフィードバックされた。さらに GPU が真に HPC アプリケーションに適用できることを示すために種々の多数 GPU 利用アプリケーションおよび最適化技法を提案・評価した。なかでも、気象庁が次世代の気象予報を目的として開発を進めているモデルを TSUBAME2.0 の GPU を有効利用するようにフル・ポータリングすることで劇的な省電力化を果たし、各国の気象庁に大きな影響を与えた。新材料開発を目的としたフェーズフィールド法による樹枝状凝固計算を TSUBAME2.0 ほぼ全体(4000GPU)を使って計算し、2.0 PFLOPS の実行性能と 1468 GFLOPS/W という高い電力性能を達成し、Gordon Bell 賞受賞の中心的役割を果たした。さらに平成 24 年 10 月には、1m 格子を用いて都市の大規模気流計算を行い、CPU に対して 10 分の一以下の消費電力で同じ計算結果が得られることを示した。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

10 年後に HPC の性能あたりの電力効率を現状の 1000 倍とすることを目標として、1) ベクトルアクセラレータ・省電力メモリ・高性能ネットワークなどのハードウェア要素を活用するためのソフトウェア基盤、2) 数理的手法に基づいた自動最適化(チューニング)基盤技術、3) 大規模 HPC アプリケーションにおける省電力化アルゴリズム、の3項目を軸とした研究開発を実運用のスーパーコンピュータ TUBAME1/2 の設計と運用にフィードバックしつつ総合的に推進して得られた成果は当初の目標、計画を大いに達成しており、高く評価される。

特に TSUBAME2.0 が GPU アクセラレータや Flash SSD などの大規模導入によって我が国初のペタフロップスを達成し TOP500 で世界 4 位の演算性能の認定を受けたこと、および世界一省エネ性能に優れた運用スパコン(Greenest Production Supercomputer)の認定を受けたこと、さらに TSUBAME2.0 の 4000GPU を利用した大規模 HPC アプリケーションである樹枝状凝固計算にて 2.0PFlops、1468GFlops/Watt という省電力・高性能を達成して Gordon Bell 賞を受賞したことなどは、これらの研究成果が世界トップ水準にあることを示している。

これらの成果を踏まえ、今後の急速に変遷するプロセッサ技術関連技術も考慮して、2016 年までに 2006 年に対し 1250 倍の電力性能比が実現可能であるとの予測は説得力があり、技術的な背景をベースにした具体的な技術予測として評価できる。

成果の外部発表に関しては、各グループが国内外においてそれぞれの分野のレベルの高い論文誌や国際会議で質、量共に優れた多くの論文発表、招待講演、口頭発表を行っており、高く評価する。また、マスコミ等への報道発表も活発に行い、社会へのアピールも十分に行われたと認められる。

なお、特許出願がゼロであることは、研究のほとんどがソフトウェアに関するものであるという点を考慮しても、やや妥当性を欠いている。研究の性格上、知的財産権の設定は難しいのでやむを得ない面もあるが、ハードウェア関連部分は共同研究を行った企業との個別契約の中で設定されていると推察される。一方で、教科書の執

筆等、無形の知財に関しては多くの蓄積がなされたと考えられる。

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

TOP500、Green500 における認定や Gordon Bell Award 等の受賞が示す通り、科学技術的に世界をリードするトップ水準の研究成果である。事業仕分け等で特に注目を浴びた分野でもあり、社会的にもこの分野の研究の重要性と我が国の実力を示した点でインパクトは大きい。スーパーコンピュータの性能／電力比の改善は、今後の計算科学の発展にとって重要な課題であり、戦略目標への本研究の貢献度は高い。大学が中心となって、ハードウェアからソフトウェア・応用まで統一的に低消費電力 HPC 分野の研究をリードするプロジェクトを進めており、今後もその発展が期待される。

4-3. 総合的評価

当初の目標を極めて高いレベルで達成した優れた研究成果である。HPC 分野での低消費電力化に対し、具体的に Tsubame2.0 の開発と利用を中心として、ハードウェア、基盤ソフトウェア、科学計算への応用の分野のグループにより統合的な研究開発を推進し目標を達成したことは高く評価される。2016 年までに 2006 年に対し 1250 倍の電力性能比が実現可能であるとの説明は説得力があり、戦略目標の実現にも大きく貢献している。TOP500、GREEN500 における認定、Gordon Bell 賞受賞や、多くの優れた研究発表、社会へのアウトリーチ活動も高く評価される。