

藤澤 克樹

九州大学マス・フォア・インダストリ研究所  
教授

ポストペタスケールシステムにおける超大規模グラフ最適化基盤

## § 1. 研究実施体制

### (1)「大規模最適化」グループ

① 研究代表者: 藤澤 克樹 (九州大学マス・フォア・インダストリ研究所、教授)

#### ② 研究項目

- ・超大規模データを伴う最適化問題に対する高速計算システムの構築と評価
- ・高速グラフ探索アルゴリズム開発
- ・超並列スレッドを用いた数理計画問題に対する高性能ソルバの開発
- ・実グラフデータを用いた実証実験
- ・グラフ解析及び数理最適化を用いた新しい産業応用の開拓と促進

### (2)「大規模グラフ処理系」グループ

① 主たる共同研究者: 鈴木 豊太郎 (アイルランド国立大学 University College Dublin、客員准教授)

#### ② 研究項目

- ・リアルタイム大規模グラフストリーム処理系及びグラフ最適化ライブラリの開発
- ・X10 言語上の大規模グラフ処理ライブラリ設計・開発
- ・大規模グラフストリーム処理系設計・開発
- ・高速グラフ探索アルゴリズム及び数理計画問題の高性能ソルバの X10 による実装
- ・実グラフデータを用いた実証実験及び性能最適化

### (3)「大規模グラフストア」グループ

① 主たる共同研究者: 主たる共同研究者: 佐藤 仁 (東京工業大学学術国際情報センター、特任助教)

② 研究項目

- ・大規模グラフ処理向けデータストアの開発
- ・大規模グラフストア設計、プロトタイプ実装
- ・グラフ I/O ライブラリ開発(X10 ベース)、グラフ I/O 最適化アルゴリズム開発
- ・性能最適化・安定化
- ・他コンポーネントとの統合

(4)「対話型閲覧システム」グループ

① 主たる共同研究者: 脇田 建 (東京工業大学大学院情報理工学研究科、准教授)

② 研究項目

- ・超大規模グラフ向けの対話型閲覧システムの開発
- ・グラフクラスタリング
- ・高次元レイアウトシステム
- ・ユーザインタフェース開発

## § 2. 研究実施の概要

新しいスーパーコンピュータの応用として大規模なグラフ解析が注目を集めている。グラフ解析の応用分野としては大規模災害等での避難誘導計画、社会公共政策や企業経営等のためソーシャルネットワーク等の大規模データの有効活用等が想定されているが、非常に計算量やデータ量さらに電力使用量などの規模が大きく従来の手法では処理が困難である。そのため次世代ポストペタスーパーコンピュータでの大規模グラフ解析を想定した場合、アルゴリズム的及びシステムの解決すべき課題の特定とそれらの解決策の提案が急務とされている。本研究で重点的に取り組む課題は以下の二つとなる。

1: 並列数の爆発的増大及び不均質化や高密度化による性能向上の困難性

2: 記憶装置の多階層化・大容量化への対応

平成26年度は以下の研究に対して重点的に取り組み、多くの成果を上げた。

### 1: アクセラレータ等による大規模かつヘテロな環境下における世界最高性能の大規模グラフ解析及び数理最適化システムの開発と評価

- Green Graph500 (<http://green.graph500.org>) は並行探索、最短路探索をはじめとする最適化、極大独立集合などのグラフ解析などの複数のグラフ処理カーネルからなるベンチマークであり、単位電力あたりのグラフ探索の性能(TEPS/W)を評価しランキングを行う。
- アクセラレータ等から構成される不均質な大規模並列環境における超大規模並列グラフ探索。データ構造の工夫とグラフの特性を考慮した探索アルゴリズムの開発により、計算量と通信データ量の削減に成功し、第8回 Graph500 ベンチマークにおいて世界1位を達成した(京コンピュータを使用)。またメモリの多階層化を考慮することによって、高速性と省電力性を両立したアルゴリズムに提案と評価を行った(第3回 Green Graph 500 ベンチマークにおいて世界1位を達成した)。
- 大規模な数理最適化問題(半正定値計画問題: SDP) に対する並列ソルバの開発と評価。SDP は現在最も注目されている数理最適化問題の一つであり、組合せ最適化、データマイニング、量子化学、制御分野など非常に幅広い応用を持っている。今回、計算量とデータ移動量の正確な推定、疎性やサイズなどのデータ特性と性能値の見極め等のアルゴリズムを開発することによって、世界最高性能の並列ソルバの開発に成功し、東工大スパコン TSUBAME2.5 上で 1.73PFlops (4080GPU) を達成した。

### 2: 各種グラフや最適化アルゴリズムのライブラリ化

- 多方面の応用分野において必要となるグラフ解析アルゴリズムを多数備えた大規模グラフ処理ライブラリ ScaleGraph の開発と公開。現在のグラフ解析ツールにおいては標準的な機能となっている PageRank、最短路、重要性指標のアルゴリズム等に加えて、高速な疎行列ベクトル積など HPC 技術による大規模な並列性を備えている点が他のツールと異なる大きな特徴になっている。ScaleGraph は PGAS 言語 X10 を用いて一元的に記述されているため、1台の PC からスパコンまで利用することが可能である。

- メモリ階層性を考慮した最適データ配置・管理技術や、グラフ処理向け I/O インターフェースの研究開発を推進した。平成25年度は不揮発性メモリデバイス向けの Hybrid BFS Algorithm に対し、省メモリなデータ構造と I/O の最適化を行うことにより、ホストのメモリ容量の4倍程度を超えるようなさらなる大規模グラフサイズでも14%程度の性能低下に抑えられることを示した。さらに GPU スパコンにおいて GPU アクセラレータのデバイスメモリの総容量を超える規模のデータに対しても高速なソート処理が行えることを TSUBAME2.5 の 1024 ノードという大規模な GPU 環境を用いて示した。また、アクセラレータを搭載したスパコンの将来のアーキテクチャにおいても既存のアクセラレータのデバイスメモリとホストの DRAM メモリ間の性能ボトルネック部分が解消され、さらなる性能が達成できる見込みであることを性能モデリング・性能分析を行うことにより示した。

### 3: ポストペタスパコンのための新しい産業応用の促進

具体的にはヒト、モノ、エネルギー及び情報の移動性（モビリティ）に関する最適化やシミュレーションを対象とする。具体的には以下の多階層ソフトウェアの整備を行った。

- グラフ解析アルゴリズムの実行： 最短路計算、ネットワーク内での各点の重要度を推定。各点の広域内における影響（情報の伝播力）を計算することによって、重要な要素を失うことなくデータ量を削減する。
- 数理最適化アルゴリズムの実行： 施設配置問題、集合被覆（分割）問題、スケジューリング、配送計画問題などの数理最適化問題として解決する。

#### 【代表的な原著論文】

- [1] Keita Iwabuchi, Hitoshi Sato, Yuichiro Yasui, Katsuki Fujisawa, and Satoshi Matsuoka, “NVM-based Hybrid BFS with Memory Efficient Data Structure”, In Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Big Data (IEEE BigData 2014), Washington DC, USA, 2014. DOI: 10.1109/BigData.2014.7004270
- [2] Yuichiro Yasui, Katsuki Fujisawa, and Yukinori Sato, “Fast and Energy-efficient Breadth-first Search on a single NUMA system,” 29th International Supercomputing Conference, ISC 2014, Leipzig, Germany, June 22-26, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-07518-1\_23
- [3] Koichi Shirahata, Hitoshi Sato, and Satoshi Matsuoka: “Out-of-core GPU Memory Management for MapReduce-based Large-scale Graph Processing,” In Proceedings of IEEE Cluster2014, Madrid, Spain, September, 2014. DOI: 10.1109/CLUSTER.2014.6968748