

FPGA (Field Programmable Gate Array) は内部の論理回路を再構成可能な LSI であり、様々な応用でカスタム LSI の代わりに使われるようになってきている。FPGA の応用分野の 1 つに大規模な数値シミュレーションがある。特に、粒子系の相互作用計算のような、その部分を加速するだけで計算全体を加速できるような応用では、汎用計算機に比べて高い性能を実現することが期待できる。しかし、現在のところ、実用的な計算に FPGA が使われた例はほとんどない。その理由は、確かに LSI そのものを設計、製造する必要はないにせよ、システム全体としては開発に必要な背景知識、作業量が非常に大きいためである。これまでに FPGA を粒子系シミュレーションに応用する試みはいくつかあったが、年単位の時間がかかっていることが多い。

論文提出者は、ユーザーが相互作用計算のデータフローの仕様だけを指定すれば、必要な回路、ソフトウェアを全てその仕様から自動生成するシステム PGR (Processor Generator for Reconfigurable systems) を開発した。ユーザーは、C 言語類似の表現によって PGR が提供する演算器を並べ、演算精度、接続関係を指定するだけで良い。PGR は演算器の生成、パイプラインレジスタ等の配置等の必要なハードウェア記述の生成とソフトウェアの生成を行い、アプリケーションから呼べるライブラリを出力する。これにより、ユーザーの負担を大きく軽減できる。

主論文第 1 章は序論であり、以上のような研究の背景や従来の研究の問題点をまとめ、本研究の目的と意義を述べている。第 2 章では、従来の FPGA を使った計算システムの設計フローをまとめている。第 3 章では、本論文の主題である PGR システムの概念と実現の詳細がまとめられている。第 4 章では現在サポートされている FPGA ボード、計算システムについてまとめられている。理研と千葉大の共同開発の Bioler-3 ボードと、Cray 社の XD-1 システムがサポートされており、同一の PGR 記述からそれぞれのシステムで実行可能なプログラムが生成できる。5、6 章では、PGR を使った記述の例として、重力相互作用計算パイプラインと、SPH 法による流体計算のためのパイプラインの実装例がまとめられている。重力計算パイプラインは従来の方法で設計したものと同等以上の性能が得られている。また、汎用マイクロプロセッサの名目ピーク性能と比較しても、チップ当たり 10 倍程度の性能が実現されている。SPH に関しては、従来の方法でシステム完成にいたった例がないので比較の対象がないが、演算回数で比較すると重力の場合に比べて 1/2 程度を実現しており、汎用プロセッサに比べて 5-10 倍程度の性能は実現されている。SPH についてはこれまで FPGA による実現例がなく、世界で初めての成果である。

第 7 章では、いわゆる C ベース設計などの、ハードウェア設計を容易にする他の手法との比較が行われる。C ベース設計は、詳細なハードウェア記述を HDL ではなく手続き型の言語に近い表現で表すものであり、詳細なハードウェア設計を行い、さらに大量のソフトウェアを開発する必要があるのは従来の開発手法と同じである。これに対して、本論文で開発した PGR システムでは、ユーザーは演算パイプラインの高水準の記述だけをすればよく、開発負担が大幅に小さくなっている。第 8 章は全体のまとめである。

以上を要するに、本論文は FPGA による再構成可能計算という潜在的に広い応用がある重要な研究分野に対して、演算パイプラインの仕様記述だけから必要な再構成可能ハードウェアの詳細な設計とサポートソフトウェアを自動生成するシステムを構築することで従来は困難あるいは不可能であったアプリケーション開発を可能にするという大きな貢献をしたものであり、そのアプローチの有効性を世界で初めて SPH 相互作用計算のためのパイプラインプロセッサを FPGA に実装し、流体計算を行うことで実証したという点で大きな意義がある。従って、本審査委員会は博士(学術)の学位を授与するにふさわしいものと認定する。