

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月11日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560345

研究課題名（和文）

マイクロ波シミュレータ専用計算機・FDTD/FITマシンの開発

研究課題名（英文）

Development of Microwave Simulator - FDTD/FIT Dedicated Computer -

研究代表者

川口 秀樹 (KAWAGUCHI HIDEKI)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90234046

研究成果の概要（和文）：

電磁界解析技術、とりわけ、マイクロ波シミュレーション技術を効果的に産業応用に活用すべく、CAD回路設計などの製品開発環境に直結したハイパフォーマンスコンピューティング（HPC）技術の実現方法の一つとして、マイクロ波シミュレータ・FDTD法専用計算機の開発を行った。シミュレーションのターゲットをマイクロ波にしぼり、その計算スキームに特化した計算機アーキテクチャを直接ハードウェア化することにより、汎用計算機に比して、大幅に安価かつ小さいサイズの計算機がプリント基板等で実現でき、これをPC等に直接接続することにより、ポータブルなHPC環境が実現できることを示した。

研究成果の概要（英文）：

As one of possibilities of effective application of microwave simulation to industry, a portable high performance computing technique by using dedicated computer system is proposed. By focusing simulation target on microwave phenomena and constructing the computer architecture dedicated to the simulation scheme, high performance computer system can be realized with very low cost and small size hardware. Beyond on this concept, a microwave simulator, FDTD dedicated computer by using printed circuit board is developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード：（E）マイクロ波・ミリ波

## 1. 研究開始当初の背景

クロック周波数が波長限界や熱発生などの要因でこれ以上高くできないなど、これまでのような集積回路技術による飛躍的なCPUの性能向上が難しくなりつつ近年において、計算機のより高性能化を实

現するには、これまでとはまったく異なったアプローチが必要となる。このような背景から、我々はこれまで、計算機アーキテクチャを計算する目的に応じて構成する専用計算機という方式に着目し、とりわけ、マイクロ波シミュレーションをターゲ

ットとしたFDTD法専用計算機的方式検討, 論理回路設計による詳細回路検討を行ってきた。また, これらで検討した専用計算機アーキテクチャが実際にハードウェア化可能かを検証すべく, 市販のFPGAキットを用いて, 計算機システムすべてFPGAのLSI回路として実装し, 実際, 小規模ながらも同専用計算機が実現可能であることを示していた。

## 2. 研究の目的

上記のように, これまでは小規模な問題に限定した上でメモリ部も含めたFDTD法専用計算機をすべてFPGA内の回路として構成することによりその実現可能性を示したものの, ポータブルHPCを実現する最終的な専用計算機システムでは, CPU部とメモリは分離したアーキテクチャとなるため, CPU-メモリ間の配線数などの現実的な要素も考慮した本当の意味で実現可能性を検証するには, これまでのような市販のFPGAキットではなく, メモリ部も含めた自作の同専用計算機を構成する必要がある。本研究では, FPGAをCPUに見立て, これにメモリ部を接続した構成の計算機を構成し, これまで検討してきたFDTD法専用計算機アーキテクチャが実際に動作し, また, 従来のノイマン型アーキテクチャに比してどの程度性能向上が図れるかを検証すべく, プリント基板によるFDTD法専用計算機システムの開発を目的とした。

## 3. 研究の方法

これまでに検討したFDTD専用計算機アーキテクチャの概略図を図1に示す。このアーキテクチャを実際のプリント基板上に実現し, FDTD専用計算機として動作させるため, 以下のフェーズに分けて開発を進めた。

### (1) 機能設計・詳細設計

それまでの1つのFPGA内に計算機アーキテクチャすべてを格納していた場合と大きく異なるのが, メモリ部をRAM

で構成し, 演算部からこれをアクセスするアーキテクチャ構成となることである。このためには必要なアドレス線も含めた演算部-メモリ部間の配線数, あるいは, CPUに相当するFPGAのI/Oピン数を見積もり, 市販のFPGAでこれを実現できるかどうかを検討する必要がある。とりわけ, FDTD法の計算スキームの性能を最大限に発揮させるために, メモリを複数のセクションに分割し計算に必要なデータを一度にメモリ部から演算部に移動できるようにする必要があり, 非常に多くのI/Oピン数を要するため, それまでの方式を単純に継承しただけでは, I/Oピンが不足することが判明したため, アーキテクチャ設計の段階での何らかの大幅な変更の必要性があった。またさらに, 自作のプリント基板となることに伴い, LSI回路のダウンロードやマイクロ波シミュレーション実行時の数値モデルデータダウンロードのためのPCとのインターフェースの実装方法の検討も必要となった。

### (2) 専用計算機プリント基板開発

(1)で検討したアーキテクチャ, および, VHDLにて設計したLSI回路をFPGA搭載のプリント基板を作成し, その上に実装させることにより, FDTD法専用計算機を構成する。このための専用ソフトによるプリント回路配線設計に加え, 予算内経費で作成するための適切なFPGA, コンフィグレーションROMなどの電子部品の選別なども行う必要があった。また, プリント基板作成後は, 正常動作確認と性能評価などの作業も必要であり, とりわけ, ハードウェア開発であることに起因して, 正常に動作しない場合は, 実際の回路中の波形をデジタルオシロスコープなどで確認しながらのデバッグとなった。

### (3) 実用マシンのための改良

(2)で開発し, 正常動作が確認されたFDTD法専用計算機は, それでもまだ, 動作確認が主目的のプロトタイプマシンであったため, メモリ部には比較的取り扱いが容易なSRAMを用いていた。しかしながら, 実用的なマシン開発を目的とするには, 容量の大きいDRAMの使用が不可欠であり, さらに, より大規模な問題を取り扱うためには, 複数マシン連動の並列計算システム構築が不可欠であったため, これらのための, 同専用計算機の改良を検討した。また, FDTD法のソフトウェア的な技術として, 曲線形状を効率よく取り扱えるPFCというスキームがあり, 将来のより複雑な形状の計算実行を目的とし, その実装についても検討した。

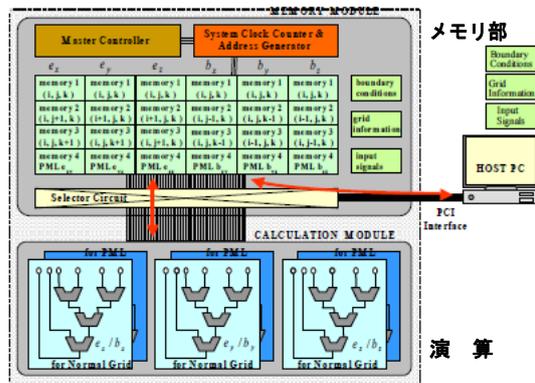


図1 FDTD法専用計算機アーキテクチャ概略図

#### 4. 研究成果

上記の研究の方法の(1)～(3)のフェーズに従い、研究計画を実施し、それぞれのフェーズで以下の成果を得た。

##### (1) 機能設計・詳細設計

メモリへの並列アクセスを実現するため、FDTD法の1グリッドの計算に必要なデータアクセス動作を1クロックレベルで精査した。そして、図1のメモリ部を構成する24個の独立なRAMに対し、同時にアクセスが必要な数は15個であることを見出し、これに特化して回路を設計することにより、市販のFPGAに実装可能な800個のI/Oピンの範囲での実現を可能にした。また、PCと専用計算機とのデータ交換には、USBインターフェースを実装させることにより、汎用性があり、かつ、高速なデータのダウンロード・アップロードを可能にした。

##### (2) 専用計算機プリント基板開発

(1)で検討したアーキテクチャとそれに基づいて設計した回路を、メモリ部をSRAMにより、また、演算部とそれ以外の周辺回路をFPGAに格納し、これらをプリント基板に搭載させることによりFDTD専用計算機のプロトタイプを実現させた。(図2) また、作成した専用計算機を用いて、図3のような矩形導波管から自由空間に放射されるマイクロ波を数値モデルに想定したシミュレーションを行いC言語での結果と一致し、正常に動作することも確認した。(図4)

##### (3) 実用マシンのための改良

(2)で開発したFDTD法専用計算機のプロトタイプマシンは、メモリ部にSRAMを使用していたため、図3のように取り扱えるグリッド空間が $32 \times 64 \times 32$ 程度という非常に小さなサイズに限定されていた。このため、メモリ容量の大きいDRAMへの変更を検討した。DRAM化により、リフレッシュ動作の追加、ア

ドレス指定方法の変更などのメモリアクセスの複雑化に起因する動作変更に加え、SRAMに比べアクセス速度が低下することを回避するための演算部も含めた計算動作の再度の見直しを行い、演算部でのバッファメモリの追加とパイプライン処理の導入という新たな方法を考案し(図5)、結果的にプロトタイプマシンよりも高速な動作を実現させた。(図6) これにより、この専用計算機でのシミュレーションが、FPGAの安定な動作を確保するために50MHzという比較的低いクロック周波数での実行であったにもかかわらず、FDTD法に最適化されたメモリアクセスアーキテクチャが実装されていたことの効力が発揮され、3.2GHz、4コアのi7、DDR3メモリという高性能計算機に比しても約1/5程度の計算性能が達成されることを確認した。

またさらに、本専用計算機を用いてより大規模かつ高速なマイクロ波シミュレーションを実行させるべく、このFDTD法専用計算機に並列処理用コネクタを付加し、領域分割法をベースとしたFDTD法

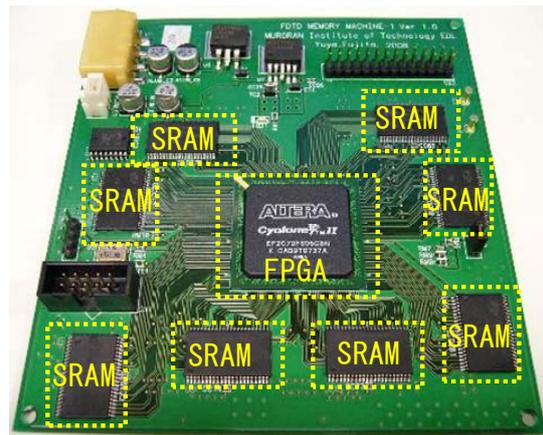


図2 FDTD法専用計算機プロトタイプPCB

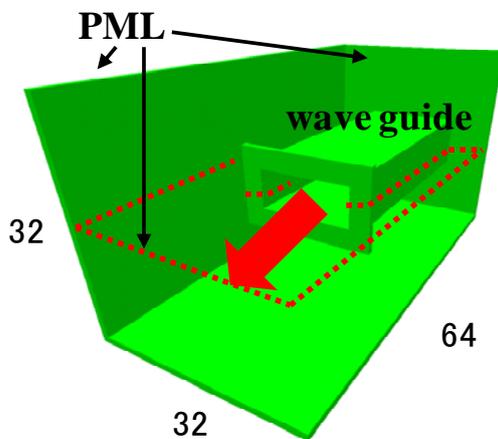


図3 矩形導波管からのマイクロ波放射数値モデル

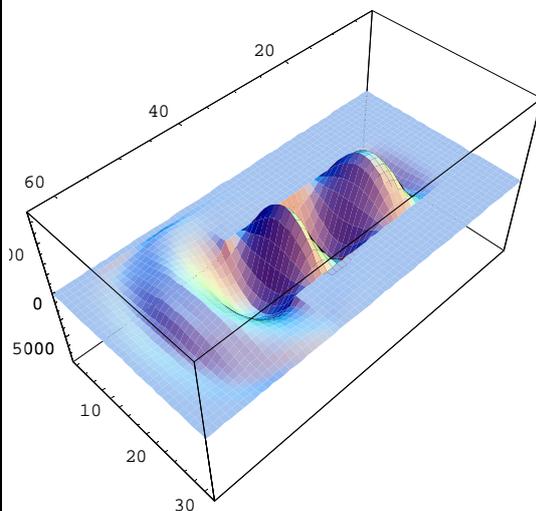


図4 専用計算機によるマイクロ波シミュレーション例

の並列処理マシンを開発した。FDTD法に特化したマシン間でのデータ交換機能を考案し、非常にスケーラビリティの高い並列処理システムを実現した。(図7) この並列処理マシンの性能は実際のシミュレーションでも確認し、計算速度も上述の高速PCとほぼ同じ性能が実現できることが確認された。また、もう一つの高速計算システムであるGPU計算機との比較では、絶対的な計算性能にはまだ3倍程度の開きがあるものの、その一方で、対消費電力性能では、本並列システムの方が3倍性能が高いことも実証された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- (1) Y. Fujita and H. Kawaguchi, Development of Improved Memory Architecture FDTD/FIT Dedicated Computer Based on SDRAM for Large Scale Microwave Simulation, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 32, No. 3 (2010), pp. 145-157.
- (2) Y. Fujita and H. Kawaguchi, Full Custom PCB Implementation of FDTD/FIT Dedicated Computer, IEEE Trans. Magn., Vol. 45, No. 3 (2009), pp. 1100-1103.

〔学会発表〕(計24件)

- (1) Y. Fujita, H. Kawaguchi, Development of Portable High Performance Computing System by Parallel FDTD Dedicated Computers, Proceedings of the 18th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, (2011, July, Sydney, Australia), PB3. 6.
- (2) Y. Fujita and H. Kawaguchi, Development

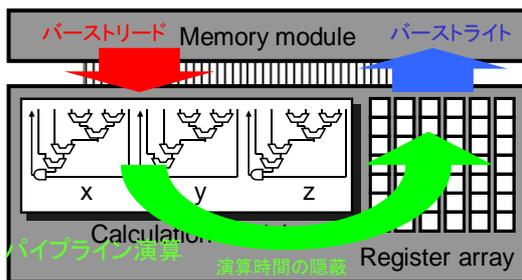


図5 DRAMバーストアクセスとパイプライン処理

of Parallel Computation System of FDTD/FIT Dedicated Computers, Proceedings of the 2010 International Symposium on Electromagnetic Theory (EMT-S), (2010, August, Berlin, Germany), pp. 93-96.

- (3) Y. Fujita and H. Kawaguchi, Portable high performance computing for microwave simulation by FDTD/FIT machines, The 10th International Computational Accelerator Physics Conference (ICAP' 09) (2009, San Francisco, USA), M04IODN03, pp. 35-37.

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 電磁波解析装置および電磁波解析方法

発明者: 川口秀樹

権利者: 室蘭工業大学

種類: 特許

番号: 特開 2009-245057

出願年月日: 平成20年3月31日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

川口 秀樹 (HIDEKI KAWAGUCHI)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90234046

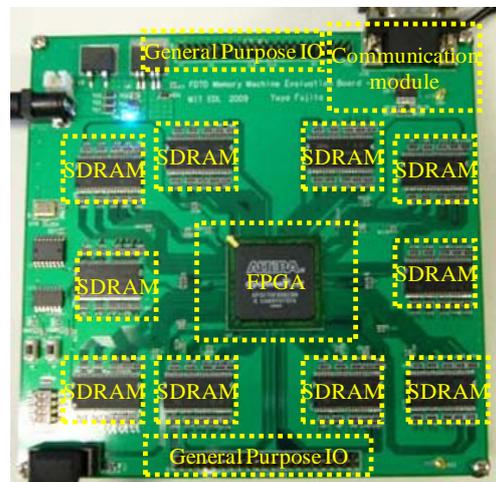


図6 DRAM搭載FDTD専用計算機



図7 並列処理用FDTD専用計算機による6マシン並列処理システム