

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 2 日現在

機関番号：51303
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2013～2016
課題番号：25420394
研究課題名(和文)GPUを用いたモーメント法の高速化に関する研究

研究課題名(英文)Research of MoM accelerated by using GPU

研究代表者

袁 巧微 (YUAN, QIAOWEI)

仙台高等専門学校・専攻科・教授

研究者番号：80509729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、GPUでモーメント法の高速化アルゴリズムへの実装が成功し、従来高価のスーパーコンピュータで実行しなければならぬ誘電体を含む人体を含む100以上の大規模な電磁界数値解析の高速化が安価で行うことができた。従って、大規模なモデルの電磁解析が可能且つ高速化することにより、新型人工電磁材料の開発や、宇宙電力発電システムの開発、人・車・船・飛行機を含んだ散乱・放射問題に関する通信・レーダー分野の発展に大きく寄与ができ、極めて重要である。

研究成果の概要(英文)：This research makes it possible to implement moment method algorithm in GPU which was ever required by using the super computer with the very expensive cost. The developed moment method algorithm takes into account the large scale numerical analysis with the dielectrics. Definitely, it is hopeful that our electromagnetic analysis of a large model and acceleration algorithm can be applied to a lot of larger scale applications, such as a new artificial electromagnetic materials, space power generation systems, and communication, scattering / radiation problems including people, cars, ships and planes, and so on

研究分野：電磁波工学

キーワード：モーメント法 高速 誘電体 大規模電磁界解析 GPU

1. 研究開始当初の背景

周期構造を有する導体と誘電体が混在する新型人工電磁材料の開発や、宇宙電力発電に使用されるアンテナの特性解析、人・車・船・航空機を含んだ電磁界散乱・放射問題など100を超える大規模な電磁解析が必要となる。モーメント法、FDTD法、そして有限要素法が代表される電磁界解析手法であり、近年パソコンの発展と共に各手法の改善により、モーメント法は線状モデルで100、面状モデルで $(10)^2$ 、FDTD手法が $(10)^2$ 、有限要素法は $(5)^2$ まで規模の解析ができるようになってきた。ここで、 λ は波長である。しかしながら、それより大きなモデルに対して、手法の更なる改善とより高性能計算機が求められる。

一方、当初画像処理に主に使われているGPU(Graphics Processing Unit)は、近年、数値解析の性能が年々に向上され、電磁界数値解析の高速化への応用に大変注目されている。特にFDTD手法への応用がより早く研究され、既にGPUの使用で速度が従来の約30-50倍アップされていることが国内外で報告されていた[1]。しかし、GPUがモーメント法への応用に関する研究はまだ数少なく、その有効性が確認されていない。

モーメント法が電磁界数値解析に使われてきた有効な手法であり、この手法は任意形状の導体線状アンテナの解析に特に有効で、計算量が少なく、計算精度が高いという特徴を持っている。更に近年の高速アルゴリズムFMM(Fast Multipole Method)、MLFMA(Multilevel Fast Multipole Algorithm)の開発により、約 $(10)^2$ まで大きさのモデルの解析が可能となっている。本研究で、GPUを用いることで、100程大きなモデルの解析を更に高速化することに挑む。

2. 研究の目的

周期構造を有する導体と誘電体を混在する新型人工電磁材料の開発や、宇宙電力発電に使用されるアンテナの特性解析、人・車・船・飛行機を含んだ電磁界散乱・放射問題などに大規模な電磁界解析の高速化が強く求められている。本研究では、低コスト、数値解析の性能が年々向上されているGPGPU(General Purpose Graphics Processing Unit)に着目し、モーメント法という電磁界数値解析手法の高速化を図ることを研究の目的とする。

3. 研究の方法

本研究はGPUに適するRichmondの方法に基づいた高精度で且つ高速なモーメント法解析アルゴリズムを開発するために、平成25年度は、GPUに適する大規模行列方程式を

高速的に解くアルゴリズムの開発及びその有効性を明らかにする。平成26年度は、シングルまたは複数GPUにFMMを実装し、高速化の効果を定量的に明らかにする。平成27年度は、GPUに誘電体を計算できる行列の生成のプログラムを実装し、高速化の効果を定量的に明らかにする。

4. 研究成果

本研究は、GPU(Graphic Processing Unit)にモーメント法の高速化アルゴリズムを実装し、従来高価のスーパーコンピュータで実行しなければならない誘電体を含む大規模な電磁界数値解析の高速化が安価で行えることを目標とし、4年間を渡って実施した内容及び得られた結果を報告する。

平成25年度では、GPUに適する大規模行列方程式を高速的に解くアルゴリズムの開発及びその有効性を明らかにした。電磁界解析手法として広く使用されているモーメント法はまず金属導体又は誘電体に流れている未知電流が満たしている微分又は積分方程式を離散し、大規模行列方程式を形成する第一過程と、セグメントの数Nに三乗に比例する $O(N^3)$ 連立一次方程式を解く第二過程で構成されている。大規模行列方程式を解くには既に掃き出し法と共役勾配法(CG: Conjugate Gradient)を使用されている。ガウスの消去法や掃き出し法などの直接法の計算時間が $O(N^3)$ 、メモリが $O(N^2)$ 、また、共役勾配法(CG: Conjugate Gradient)のような反復法の計算時間が $O(pN^2)$ (ここでpは反復回数である)、メモリが $O(N^2)$ に比例して増加していくため、大規模問題にモーメント法に適用するためには計算時間とメモリの低減化が必要となる。今年度の研究は、GPUを用いて、掃き出し法と共役勾配法することで高速に連立一次方程式を解くことができた。また表1に示すようなCPU(Intel®XeonE5607)とGPU(Tesla C2050)を使用したそれぞれの計算時間を比較し、GPUを用いることで共役勾配法はCPUでの計算時間より17倍~40倍、掃き出し法は30倍~53倍の高速に計算できたことが確認された。GPUが大規模行列方程式を解く時に高速化に有効であることを示した。

表1 共役勾配法と掃き出し法を計算に使用される

CPUとGPUの仕様

| | CPU | GPU |
|------|-----------------|------------|
| 型名 | Intel®XeonE5607 | TeslaC2050 |
| コア数 | 5 | 448 |
| クロック | 2.26GHz | 1.15MHz |

| | | |
|---------|------------|-----------|
| メモリ容量 | 2.26GB | 3GB |
| メモリバンド幅 | 21.2GB/sec | 144GB/sec |

GPU を更に高速化するには、メモリアクセス方法の選択も重要であることも明になった。コアレスアクセスを用いる GPU で実施した共役勾配法は更に約 3.1 倍の高速化ができたことが分かった。また 3 個の GPU を使用することにより 1 個の GPU より最大 2.4 倍の高速化することも明になった。そこで、更にコアレスアクセスを実施することによって最大 2.2 倍程度の高速化も図れた。

今年度の研究は GPU を用いて計算に関して、下記のガイドラインを明確にした[1]

(1) GPU と CPU へのデータ伝送を最小限に抑えること。

(2) グローバルメモリをアクセス際にコアレスアクセス手法を推奨すること。

(3) 各ブロックのスレッド数が 32 の倍数にすること。

平成 26 年度では、シングルまたは複数 GPU にモーメント法の高速化アルゴリズム CG-FMM(Conjugate Gradient-Fast Multipole Method)を実装し、高速アルゴリズムと GPU の組み合わせで、高速化の効果を定量的に明らかにした。モーメント法の高速化を実現する手段としてはハードウェア的な手法とソフトウェア的な手法がある。前節に述べた GPU の使用が、モーメント法の第二過程において $ZI=V$ の解 I ベクトルを求める時間の低減に有効であるため、有効なハードウェア的な手法である。今年度はソフトウェア的な手法の取り入れと GPU の組み合わせで更なる高速化の可能性を探る。具体的に、第二過程の行列方程式と第一過程の行列生成過程に CG-FMM アルゴリズムを応用し、GPU を用いた並列計算の高速化を目指した。

FMM(Fast Multipole Method, 高速多重極法)手法とは、物体間の相互作用を近似的にまとめて計算する手法である。一方、CG 法では行列方程式 $ZI=V$ を解くにあたって 1 ステップに行列ベクトル積が含まれるが、これはオーダーが $O(N^2)$ であるため高速化に影響するボトルネック的な要因になっている。ここで FMM を用いることによって CG 法の計算量を減らすことを目的とする。

結果検証は図 2 に示す平面波入射した時導体平板状モデルによる散乱モデルの解析を用い、表 3 に示す Intel Xeon E5-2630 CPU と Tesla K20m GPU を用いて行った。計算結果より、未知数が数万の時、GPU による計算時間は CPU より約 11 倍に短縮されたことを明らかにした(図 3)[2][3]。従って、GPU と高速アルゴリズム CG-FMM との組み合わせすることで、更なる高速化の実現ができたことを明らかにした。

表 3 CPU (Intel Xeon E5-2630) と GPU(Tesla K20m)

| | CPU | GPU |
|---------|--------------------|------------|
| 型名 | Intel Xeon E5-2630 | Tesla K20m |
| コア数 | 6 | 2048 |
| クロック | 2.3GHz | 706MHz |
| メモリ容量 | 768GB | 5GB |
| メモリバンド幅 | 59GB/sec | 208GB/sec |

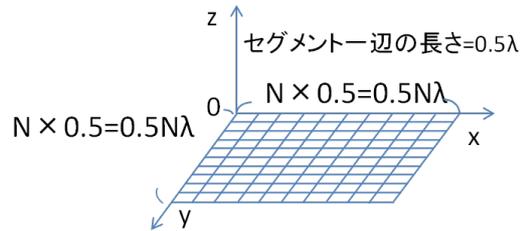


図 2 平面波入射した時導体平板状モデル

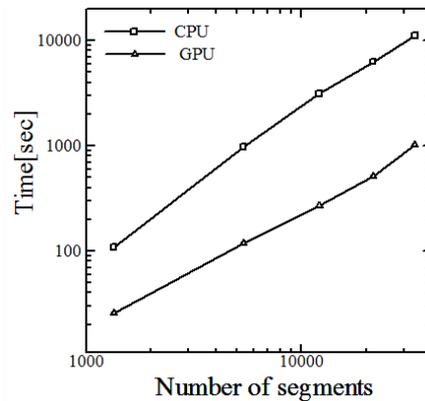


図 3 CG-FMM が GPU と CPU を用いた計算時間比較

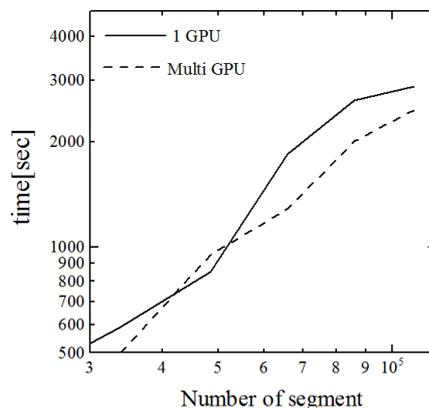


図 4 1GPU と 3GPU 計算時間

図 4 に 1GPU での計算と 3 GPU を用いて計算の時間を比較する。総セグメント数 10 万を超えた時に最大で約 1.2 倍の高速化が確認され、あまり大きく期待できなかった。

ことがわかった。その理由としては、データ転送の量を最小限にするために各 GPU に送られるデータは 1GPU で行っている時の四分の一のみを渡しているが、ステップによってはデータの四分の一では不十分な場合があると考えられる。また、CPU-GPU 間のデータ転送に加え GPU 間の通信も必要とされることも考えられる。

平成 27 度と H28 年度は、OpenACC を用いることで GPU のプログラミングを行い、GPU による誘電体を含む Z 行列生成の高速化について検討し、その有効性を検証した。

モーメント法は解析対象に誘電体が含まれる場合、誘電体が電気長の小さい長方形に分割され、それぞれ三つ座標成分の電流があり、計 9 種類の相互インピーダンスがある。従って、Z 行列の生成処理計算が複雑になり、計算量も増加する。また、解析対象のアンテナをセグメントに分割した時、セグメントの数が多ければ多いほど Z 行列の生成の処理の計算量は比例して増えていく。図 5 は誘電体を含むモーメント法 Z 行列の生成処理についてフローチャートである。中に RBM1A, RBM1B, ..., RBM1H は計 8 種類多重積分を計算するサブローションであり、Z 行列の生成には多数な多重積分計算が必要であることを示している。また、この多重積分計算はアンテナのセグメント数に応じて、計算の繰り返す回数が異なる。

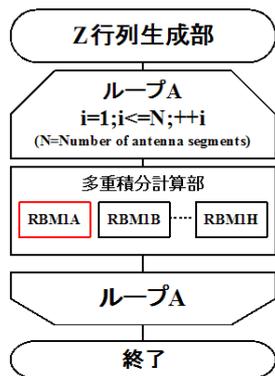


図 5 Z 行列の生成処理部フローチャート

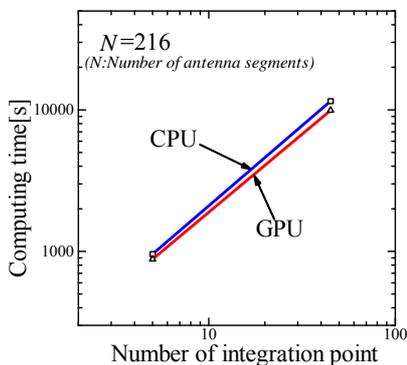


図 6 積分点数による多重積分計算時間
OpenACC は、ソースコードの多くの書き

換えを必要とせず、三種類のディレクティブの指定を行うだけで GPU プログラミングが可能であり、非常にシンプルである。研究ステップとしては、まず多重積分における積分点数による GPU 高速化の変化を確認する。次に、解析プログラムの有効性を確認する。最後に、具体的な解析モデルに関して、GPU による高速化の度合いを定量的に確認する。

なお、解析に使用した CPU(Intel®Corei7 760)と GPU(GTX5780)の性能をそれぞれ表 4 に示す。

表 4 CPU(Intel®Corei7 760)と GPU(GTX5780)の性能

| | CPU | GPU |
|--------------|------------------|---------|
| 型名 | Intel®Corei7 760 | GTX 580 |
| コア数 | 4 | 512 |
| クロック[GHz] | 2.8 | 1.5 |
| メモリ帯域幅[GB/s] | 21.2 | 192.4 |

まず、誘電体を含んだ Z 行列の計算に多重積分計算の収束性を確認する。積分点数に対して多重積分計算を行うルーチ 8 つのサブローションを GPU プログラムに置き換え、計算時間と収束性を確認された。積分点数による計算時間を図 6 に示す。図 6 より、積分点数の値が小さい時の計算時間は GPU の方が CPU より快速であることが確認され、大きな改善が見られなかった。しかし、積分点数の値が 45 を超えると、最大で約 1.16 倍の計算時間の短縮を確認することができた。GPU の使用により多重積分の高速化に有効であることが分かった[4]。

次に解析プログラムの有効性を確認する。図 7 に示す誘電体そばに置くダイポールアンテナモデルを使用し、市販されていた電磁気解析ソフトによる解析結果と比較し、ダイポールアンテナの入力インピーダンスに対して両者が概ね一致したことから、OpenACC を用いた GPU のプログラムの有効性が確認された[5]。

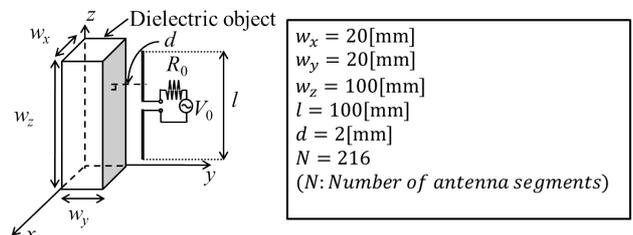


図 7 誘電体近傍に置くダイポール

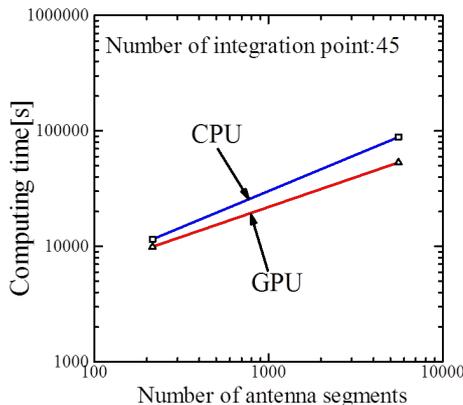
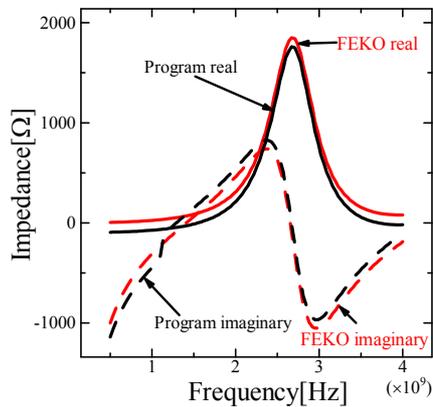


図8 ダイポールの入力インピーダンス
 図9 セグメント数による計算時間の比較
 最後に、GPUによるセグメント数に関する計算時間の短縮を確認する。図9にGPU及びCPUによる計算時間を示す。図9より、積分点数の値が45の時、セグメント数が増えるごとにGPUの計算時間がCPUに対して大幅に短縮できることが確認できた。この結果より、セグメント数が増えるにつれてGPUの計算時間が2倍、3倍と早くなることが可能である。ここで、100以上規模の解析データが載せていなかったが、その可能性も示されている。近々に100以上規模の解析データを学会で発表予定である。

本研究では、GPUにモーメント法の高速度化アルゴリズムの実装が成功し、従来高価のスーパーコンピュータで実行しなければならない誘電体を含む100以上の大規模な電磁界数値解析の高速度化が安価で行うことができた。従って、大規模なモデルの電磁解析が可能かつ高速化することにより、新型人工電磁材料の開発や、宇宙電力発電システムの開発、人・車・船・飛行機を含んだ散乱・放射問題に関する通信・レーダ分野の発展に大きく寄与ができ、極めて重要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- [1] K. Konno, H. Katsuda, K., Q. Chen, K. Sawaya, Q. Yuan, "Quantitative study of computing time of direct/iterative solver for MoM by GPU computing," IEICE Communications Express, vol. 2 (2013), no. 8, pp. 359-364, Aug. 2013.
- [2] K. Konno, Q. Yuan, Q. Chen, "Ninja Array Antenna -Novel Approach for Low Backscattering Phased Array Antenna-," IEEE Trans. AP, under review.

〔学会発表〕(計4件)

- [1] 萬代 光治, 袁 巧微, "GPU搭載可能なモーメント法の高速度アルゴリズムの開発," 平成26年度東北地区高等専門学校専攻科産学連携シンポジウム, 2014年11月.
- [2] 萬代 光治, 袁 巧微, "GPU搭載可能なモーメント法の高速度アルゴリズムの開発," 平成27年度東北地区高等専門学校専攻科産学連携シンポジウム, 2015年12月.
- [3] 清野 聖人, 袁 巧微, "GPUによる誘電体を含むZ行列生成の高速度に関する研究," 平成26年度東北地区高等専門学校専攻科産学連携シンポジウム, 2014年11月.(優秀賞)
- [4] 清野 聖人, 袁 巧微, "GPUによる誘電体を含むZ行列生成の高速度に関する研究," 平成27年度東北地区高等専門学校専攻科産学連携シンポジウム, 2015年12月.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

該当なし

取得状況(計0件)

該当なし

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

袁 巧微 (YUAN, Qiaowei)

仙台高等専門学校・総合工学科・教授

研究者番号: 80509729

(2) 研究分担者

陳 強 (CHEN, Qiang)

東北大学・工学部大学院・教授

研究者番号： 30261580

澤谷 邦男 (SAWAYA, Kunio)
東北大学・産学連携機構イノベーション
戦略推進センター・教授
研究者番号： 60108470

(3)連携研究者
該当なし

(4)研究協力者
今野 佳祐 (KONNO, Kesukei)
清野 聖人 (SEINO, Seito)
萬代 光治 (MANDAI, Koji)