

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390135

研究課題名(和文) 次世代分散処理環境を前提とした完全メッシュレス法の開発と工学的応用

研究課題名(英文) Development of Complete Meshless Method Based on Next Generation Distributed Processing Environment and Its Technological Application

研究代表者

生野 壮一郎 (Ikuno, Soichiro)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・教授

研究者番号：70318864

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、メッシュレス法で用いる新たな形状関数の開発とメッシュレス法より得られる連立一次方程式の解法を次世代分散処理機器であるGraphics Processing Unit (GPU)やMany Integrated Core (MIC)クラスタへの実装を行ない、数値的安定性の向上と計算速度の向上を行なった。また、並列化効率の劣化の原因となる、集団通信を回避するアルゴリズムを反復法に実装し、本手法の数値的検証を行なった。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we successfully developed the new shape function for meshless approaches, and successfully developed the new iterative solver based on next generation distributed processing architectures such as graphics processing unit (GPU) and Many Integrated Core (MIC) for linear systems obtained by meshless approaches. The numerical results indicate that the numerical instability of the new method with the new shape functions is drastically increased. In addition, we developed Krylov subspace method with communication avoiding technique, and the numerical features are investigated.

研究分野：数値電磁気学

キーワード：シミュレーション工学 メッシュレス法 並列計算 Krylov部分空間解法 通信回避アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

有限要素法 (FEM) と境界要素法 (BEM) は、これまで計算科学の分野で幅広く用いられて来たが、FEM と BEM 自体が内包している次のような問題点が挙げられる。両方法を用いた解析手法では、解析対象領域やその境界を幾何学的形状をもつ要素の集合に分割する必要があり、この要素分割は解析手法全体の大半を占める。一般にこの手続きには、マンパワーと計算時間を浪費することが知られている。また、これらの要素を用いて支配方程式を離散化した後に得られる代数方程式は大規模であるため、求解に費やす時間が莫大となる。

上記の一つ目の問題をある程度克服した方法としてメッシュレス法が挙げられる。メッシュレス法は解析領域内の要素分割を必要とせず、領域内や境界上に節点を散布・配置し、それぞれの節点上に形状関数を配置すればよい。そのため、これまで要素分割に掛かっていた時間を大幅に縮小することが可能となる手法である。また、近年、次世代分散処理機器として Graphics Processing Unit (GPU) や Many Integrated Core (MIC) などが数値計算分野に登場し、注目を集めている。

本研究では、GPU や MIC への実装と計算速度の向上を前提としたメッシュレス法の開発を行い、さらに、同技術を用いて電磁界解析の具体的な計算を行う。

2. 研究の目的

本研究の目的は、次世代分散処理機器である、Graphics Processing Unit (GPU) や Many Integrated Core (MIC) への実装を前提としたメッシュレス法の開発を行うことである。また、同手法より得られる大規模連立一次方程式の解法を GPU や MIC へ実装し、求解速度の向上と、数値的に安定な計算手法の確立である。具体的には、研究期間内に達成する目標として、3 つの段階を設定する。第 1 段階の「安定的な計算可能な形状関数の開発」では、計算精度を向上する新たな形状関数の開発を行う。これまでメッシュレス法で用いられて来た、Moving Least-Square をベースに生成される形状関数はデルタ関数特性をもたないため、計算時間が掛かるという難点をもつ。また、時間領域型の手法に適用した場合、計算が破綻するという問題があった。第 2 段階の「次世代分散処理機器を前提とした連立一次方程式の高速ソルバーの開発」では、GPU や MIC を前提とした反復解法の開発を目指す。最後に、第 3 段階の「工学的実証」では、本研究で提案するメッシュレス法と連立一次方程式の高速解法を電磁界解析に適用し、その有効性を数値的に実証する。

3. 研究の方法

本研究を推進するために、上述のように 3

つの段階に研究を分けて開発・実装・検証を行う。

(1) 安定的な計算可能な形状関数の開発

従来の Element-Free Galerkin (EFG) 法や Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) 法などの従来のメッシュレス法では、移動最小自乗近似法 (Moving Least-Square Approximation, MLS) を用いて形状関数が生成されていたが、本形状関数はデルタ関数特性をもたないため、時間発展問題に適用する場合に、計算時間が莫大になるという難点をもつ。他方、Radial Point Interpolation Method (RPIM) で用いられる形状関数は、デルタ関数特性をもつため、時間発展問題に適用可能であるが、時間発展中に計算精度が劣化し、数値不安定性を発症する問題点があった。

本研究では、上記の 2 つの問題点を解決するために、Interpolating Moving Least-Squares (IMLS) をベースとした、新たな形状関数の生成に成功した。本形状関数を用いることにより、時間発展型メッシュレス法である、Meshless Time-Domain Method (MTDM) の計算精度が飛躍的に向上し、計算途中での数値的不安定性による計算破綻を引き起こすことなく、所望の時間ステップまで計算することが可能となった。

(2) 次世代分散処理機器を前提とした連立一次方程式の高速ソルバーの開発

メッシュレス法より得られる連立一次方程式は、次元数が莫大であるため、Gauss の消去法や LU 分解法などの直接法を適用するのは非現実的である。また、対角ブロックにゼロ行列をもつため、SOR 法や Gauss-Seidel 法などの定常反復法を適用するのは困難である。そこで、本研究では、非定常反復法である Krylov 部分空間解法に着目し、本手法をベースとした、新たな可変的前処理付き Krylov 部分空間解法の開発と次世代分散処理機器への実装を行う。

Krylov 部分空間解法のアルゴリズムは、行列ベクトル積、ベクトルの内積、ベクトルの加減算で構成されているため、並列化効率を引き出すのは比較的容易である。しかしながら、並列分散数の増加と共に、分散プロセッサ間の集団通信量が増加し、結果として、分散効率の劣化が起きてしまうことが知られている。また、GPU や MIC は物理的に計算機のメインメモリとは繋がっていないため、機器とメインメモリとの通信が非常に遅い。そのため、この集団通信の増加は並列化効率には致命的である。

本研究では、この問題点を克服するために、Krylov 基底を事前に計算することで、内積演算を展開し、集団通信無しにある程度反復を行う手法である、通信回避アルゴリズム Krylov 部分空間解法の開発を行う。

(3) 工学的実証

本段階では、開発した IMLS を適用した MTDM を用いて、複雑形状をもつ導波管内電磁波伝播解析を行う。また、Extended Element-Free Galerkin 法より得られる大規模連立一次方程式に対して、可変的前処理付き Krylov 部分空間解法を適用、GPU クラスタスーパーコンピュータに実装し、開発した解法の性能の数値的検証を行う。さらに、通信回避アルゴリズム付き Krylov 部分空間解法の数値的検証を行い、適用の可能性を模索する。

一方で、MTDM との比較検討を行うため、時間領域付き電磁界解析手法である Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 法を用いて、導波管内電磁波伝播現象解析を行う。

4. 研究成果

まず、IMSL より得られる形状関数を用いた時間発展型メッシュレス法、MTDM では、RPIM で用いられている形状関数を用いた場合と比較して、計算精度、数値的安定性が飛躍的に上がった。

メッシュレス法の特徴である、複雑形状をもつ解析領域への適用の場合、従来法では、数百ステップ～数千ステップで数値的に破綻してしまうが、提案手法を適用した場合、1000000 ステップを経過しても安定的に計算できることが確認できた。また、本手法を用いることにより、U 字型導波管、S 字型導波管への適用が可能となり、新たな現象の解明にも繋がると考えられる。

次に、GPU/MIC クラスタへの可変的前処理付き Krylov 部分空間解法の実装では、通常の解法と比較して、最高で約 41 倍程度の高速化に成功した。一方、通信回避アルゴリズム付き Krylov 部分空間解法では、通信を回避するステップ数の増加と共に、収束特性が劣化することが数値的に確認できた。しかしながら、最初の数反復で相対残差が 1 未満に収束することが確認できたため、本手法を可変的前処理の解法として適用した結果、最高で約 2 倍程度の高速化を実現することができた。特筆すべきは、通信回避アルゴリズム付き Krylov 部分空間解法は、問題への依存性が高いため、今後継続的に研究を行う必要があると考える。

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 11 件)

T. Itoh, S. Ikuno: “Efficient Simulation of Electromagnetic Wave Propagation in Complex Shaped Domain by Hybrid Method of FDTD and MTDM Based on Interpolating Moving Least-Squares Method”, IEEE Trans. Magn., Vol. 99,

(2017) 1-1, 査読有

DOI: 10.1109/TMAG.2017.2658194

S. Ikuno, G. Chen, T. Itoh, S. Nakata, K. Abe: “Variable Preconditioned Krylov Subspace Method with Communication Avoiding Technique for Electromagnetic Analysis”, IEEE Trans. Magn., Vol. 99, (2017) 1-1, 査読有

DOI: 10.1109/TMAG.2017.2655513

S. Ikuno, G. Chen, S. Yamamoto, T. Itoh, K. Abe, H. Nakamura: “Krylov Subspace Method with Communication Avoiding Technique for Linear System Obtained from Electromagnetic Analysis”, Plasma and Fusion Research, Vol. 11 (2016) 2406021, 査読有

DOI: 10.1585/pfr.11.2406021

T. Itoh, S. Ikuno: “Interpolating Moving Least-Squares-Based Meshless Time-Domain Method for Stable Simulation of Electromagnetic Wave Propagation in Complex Shaped Domain”, IEEE Trans. Magn., Vol. 52, (2016) 7207404, 査読有

DOI: 10.1109/TMAG.2015.2478935

Y. Fujita, S. Ikuno, S. Kubo, H. Nakamura: “Finite-difference time-domain analysis of electromagnetic wave propagation in corrugated waveguide: Effect of miter bend/polarizer miter bend”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 55, (2015) 01AH06, 査読有

S. Ikuno, Y. Hirokawa, T. Itoh: “Speedup of Iterative Solver for Electromagnetic Analysis Using Many Integrated Core Architecture”, IEEE Trans. Magn., Vol. 51, (2015) 7201504, 査読有

DOI: 10.1109/TMAG.2014.2353036

T. Itoh, Y. Hirokawa, S. Ikuno: “High-Performance Computing of Electromagnetic Wave Propagation Simulation Using Meshless Time-Domain Method on Many Integrated Core Architecture”, IEEE Trans. Magn., Vol. 51, (2015) 7204804, 査読有

DOI: 10.1109/TMAG.2014.2353050

T. Takayama, S. Ikuno, A. Kamitani: “Numerical Simulation of Inductive Method for Measuring j_c and Detecting Crack in an HTS Film”, IEEE Trans. Appl. Superconductivity, Vol. 25 (2014) 9000140, 査読有

DOI: 10.1109/TASC.2014.2361060

A. Kamitani, T. Takayama, S. Ikuno: “High-Performance Method for Analyzing Shielding Current Density in HTS Films: Application to the Scanning Permanent-Magnet Method”, IEEE Trans. Appl. Superconductivity, Vol. 25 (2014) 9000505, 査読有

DOI: 10.1109/TASC.2014.2373658
Y. Ohi, Y. Fujita, T. Itoh, H. Nakamura, S. Ikuno: “Faster Generation of Shape Functions in Meshless Time Domain Method”, Plasma and Fusion Research, Vol. 9 (2014) 3401144, 査読有
DOI: 10.1585/pfr.9.3401144
T. Itoh, S. Ikuno, H. Nakamura: “Time-Domain Method with Modified RPIM-Based Shape Function for Electromagnetic Wave Propagation Simulation in Complex Shaped Domain”, Plasma and Fusion Research, Vol. 9 (2014) 3401088, 査読有
DOI: 10.1585/pfr.9.3401088

〔学会発表〕(計 41 件)

Y. Fujita, S. Ikuno, S. Kubo, T. Tsujimura, H. Nakamura, “Mode Analysis of Electromagnetic Wave Propagation in Polarizer Miter Bend”, 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 3/8/2017, Parea Kumamoto Prefectural Community Center, Kumamoto, Kumamoto
S. Ikuno, T. Itoh: “GPU acceleration of variable preconditioned Krylov subspace method for linear system obtained by eXtended element-free Galerkin method”, 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics, 3/8/2017, Parea Kumamoto Prefectural Community Center, Kumamoto, Kumamoto
生野壮一郎, 陳功, 伊東拓, 阿部邦美: 「通信回避アルゴリズム付き Krylov 部分空間解法と可変的前処理技術の電磁界解析への適用」, 第 25 回 MAGDA コンファレンス, 2016 年 11 月 25 日, 桐生市市民文化会館, 群馬県桐生市
G. Chen, Y. Fujita, T. Itoh, H. Kurokawa, S. Ikuno: “Implementation of Communication Avoiding Technique on Krylov Subspace Method”, NOLTA 2015, 12/2/2015, City University of Hong Kong, Hong Kong
T. Itoh, A. Saitoh, S. Ikuno, A. Kamitani: “Numerical Investigation of Preconditioning for Iterative Methods in Linear Systems Obtained by Extended Element-Free Galerkin Method”, The 34th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology, 10/13/2015, Toyama International Conference Center, Toyama, Toyama
S. Ikuno, G. Chen, T. Itoh: “Parallelization of VP Krylov Subspace Method for Linear System Obtained by XEFG on Multi-GPU Cluster”, The 34th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology, 10/13/2015, Toyama, Toyama

International Conference Center, Toyama, Toyama
Y. Fujita, S. Ikuno, S. Kubo, H. Nakamura: “Electromagnetic wave propagation simulation in corrugated waveguide: Influence of miter bend on transmission mode”, The 34th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology, 10/13/2015, Toyama International Conference Center, Toyama, Toyama
Y. Fujita, S. Ikuno, S. Kubo, H. Nakamura: “Investigation of the Influence of the Polarization on the Polarizer Miter Bend”, The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 9/17/2015, Awaji Yumebutai, Awaji, Kobe
S. Ikuno, G. Chen, T. Itoh: “Implementation of Variable Preconditioned Krylov Subspace Method on GPU and Estimation of Optimal Parameters”, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, 7/21/2015, Hotel Circus Circus, Reno, USA
Y. Fujita, S. Ikuno, S. Kubo, H. Nakamura: “Electromagnetic Wave Propagation Simulation in Corrugated Waveguide with Miter Bend by FDTD: Influence of Induced Current Density”, COMPUMAG 2015, 7/2/2015, McGill University, Montreal, Canada
S. Ikuno, Y. Hirokawa, T. Itoh: “Acceleration of Iterative Solver for Electromagnetic Analysis using GPU/MIC”, COMPUMAG 2015, 6/29/2015, McGill University, Montreal, Canada
Y. Fujita, S. Kubo, H. Nakamura, S. Ikuno: “Numerical analysis of electromagnetic wave propagation in corrugated waveguide with dispersive media using Drude model in FDTD”, ISPlasma 2015, 3/26/2015, Nagoya University, Nagoya, Aichi
藤田宜久, 中村浩章, 久保伸, 生野壮一郎: 「誘起電流を考慮した FDTD 法によるコルゲート導波管の伝送効率検証」, 2014 年度日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学, 東京都新宿区
藤田宜久, 生野壮一郎, 久保伸, 中村浩章: 「表面電流を考慮した FDTD による導波管の電波効率に関する検証」, 第 23 回 MAGDA コンファレンス in 高松, 2014 年 12 月 5 日, サンポートホール高松, 香川県高松市
Y. Fujita, S. Kubo, S. Ikuno, H. Nakamura: “Electromagnetic wave propagation in waveguide considering influence of induced current”, 24th International Toki Conference, 11/07/2014, Ceratopia Toki,

Gifu

S. Ikuno, Y. Ohi, T. Itoh: “Numerical Investigation for Stable Calculation of Meshless Time Domain Method: Influence of Node Alignment on Numerical Stability”, JSST 2014, 10/28/2014, Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu, Fukuoka

T. Itoh, S. Ikuno: “Investigation of Meshless Time-Domain Method with Interpolating Moving Least-Squares Based Shape Functions”, JSST 2014, 10/28/2014, Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu, Fukuoka

藤田宜久, 生野壮一郎, 中村浩章: 「誘導電流密度がコルゲート導波管の伝送損失に及ぼす影響」, プラズマシミュレーションシンポジウム 2014, 2014 年 10 月 12 日, 核融合科学研究所, 岐阜県土岐市

伊東拓, 生野壮一郎: 「Modified RPIM の形状関数を用いた Meshless Time-Domain Method の安定化」, 日本応用数学会 2014 年度年会, 2014 年 9 月 5 日, 政策研究大学院大学, 東京都港区

Y. Fujita, N. Kashima, H. Nakamura, S. Ikuno: “Effect of Induced Current Density on Millimeter Wave Propagation Loss in Long Waveguide for Plasma Heating”, CEFC2014, 5/25/2014, The Imperial Palace, Annecy, France

6. 研究組織

(1) 研究代表者

生野 壮一郎 (IKUNO Soichiro)
東京工科大学・コンピュータサイエンス学
部・教授
研究者番号: 70318864