

平成 30 年 4 月 23 日現在

機関番号：32670

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04762

研究課題名(和文) 超大規模領域分割計算の高速化手法の産業応用推進

研究課題名(英文) Acceleration of industrial application of speed-up methods in ultra large_scale domain decomposition computation

研究代表者

金山 寛 (Kanayama, Hiroshi)

日本女子大学・理学部・研究員

研究者番号：90294884

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)：静磁場の有限要素近似から導かれる連立1次方程式を部分構造法のように内部自由度を消去したインターフェース問題を解くことに帰着させた時の前処理行列を、弾性問題や熱伝導問題で実績のあるMandel法のアナロジーで解いた時の性能向上は現在未解決の課題である。これに対し、一つの方法を提案し、その効果を実装することにより、確かめている。現時点では1パートの場合が中心であるが、BDD法のバリエーションとして知られているBDD-DIAG法が、フリーソフトウェアADVENTUREのデフォルト前処理であるDIAGと同様な効果を持つことが分かり、そのマルチパート化を現在進めている。

研究成果の概要(英文)：An iterative domain decomposition method is proposed for numerical analysis of 3-Dimensional (3D) linear magnetostatic problems taking the magnetic vector potential as an unknown function. The iterative domain decomposition method is combined with the Preconditioned Conjugate Gradient (PCG) procedure and the Hierarchical Domain Decomposition Method (HDDM) which is adopted in parallel computing. Our previously employed preconditioner was the Neumann-Neumann (NN) preconditioner. Numerical results showed that the method was only effective for smaller problems. In this research, we consider its improvement with the Balancing Domain Decomposition DIAGonal scaling (BDD-DIAG) preconditioner. Specially, the multi-part processing is challenged for the first time though our present success is mainly limited to a single part processing.

研究分野：偏微分方程式の有限要素近似による大規模計算

キーワード：BDD-DIAG前処理 DIAG前処理 静磁場解析 熱対流解析

1. 研究開始当初の背景

3次元電磁場の有限要素解析はこれまでやや試行錯誤的に行われており、信頼のおける数値解法が未だ十分確立されていない状況にある。このようななかで、我々は菊地理論をベースに、工学的応用を展開するという形を採っており、国際的に見ても極めてユニークな注目すべき研究を展開している。これまでに開発されてきた文部科学省支援研究による電磁場解析ソフトウェアの骨格を一貫して提供してきたという自負もある。今後の低炭素社会に向けて、燃料電池車とともに電気自動車の利用が推進されているが、電磁環境適合性(EMC)のためにも電磁場解析の有用性は増している。非圧縮性粘性流・熱対流や固体力学の大規模解析も統一的手法で研究を進めているので、それらとの連成解析が有利に行えるという利点も持っている。

2. 研究の目的

(1) 静磁場解析におけるインターフェース問題のBDD前処理の実装

磁場解析の分野ではこれまで約20年近く、東京大学の菊地文雄名誉教授が線形静磁場問題で確立した独創的な混合法的定式化を自然な形で3次元渦電流問題や3次元非線形静磁場問題に独自の工夫を加えて拡張し、ADVENTURE_Magneticを公開してきた。最近部分領域問題を直接法で解くことにより1億自由度や約5,000万複素自由度の大規模解析を可能にした魅力を次世代計算機で更に活かすためにはもう1桁程度の計算速度の改善が望ましい状況がある(速ければ速いほど、実際の設計に用いる計算モデルを更に詳細化できる)。本研究では、この高速化に対応する研究を行い、もう1桁高速化したソフトウェアを公開していく。ここに述べた手法に基づく磁場解析ソフトウェアは、国産市販ソフトウェアは言うまでもなく国際的に見てもあまり例がない。また現在数百万自由度規模程度で留まっている電磁場解析の規模の拡大にとって研究開始時点ですでにブレークスルーを引き起こした研究になっている。実際、大規模解析では我々のレベルを目標にする研究チームもいくつか現れているが、本研究では得意とする大規模化に更に高速性を加味することにより、追従者の上を行くPerfect Only Oneを目指す。

(2) 熱対流解析コードの機能強化

非圧縮性粘性流解析・熱対流解析の分野では研究開始時点のADVENTURE_sFlowをもとに計算サービスを行っているベンチャー企業も現われている。ADVENTURE_sFlowでは磁場解析や構造解析と同様な手法で計算しているので、高速化の検討を共通の課題として行え、入力データの共有化がしやすく連成解析が行いやすいという特長がある。低炭素社会向けシミュレーション技術に応用分野を特化し解析機能を限定してでも、この特長を早

く引き出したいと考えている。

3. 研究の方法

(1) 静磁場解析におけるインターフェース問題のBDD前処理の実装

3次元磁場の有限要素法による解析、特に3次元渦電流解析(複素自由度4,355万の問題が32台のPCクラスタを用い5時間弱で解けている)並びに1億自由度を最近可能にした3次元非線形静磁場解析に対しては、領域分割法を用いる際の数値計算上の諸問題を以下の更なる高速化に関する課題に焦点を絞って研究する。

「離散化に伴い生じる超大規模(1億自由度以上)の疎な対称連立1次方程式と連立非線形方程式に対する領域分割法を意識した効率的な数値解法を確立し、特にもう1桁の高速化を可能にする前処理方法を確立する。」

(2) 熱対流解析コードの機能強化

3次元非圧縮性粘性流解析についてはこれまでの内容を発展させた新アルゴリズムの導入を図る。2006年7月に公開したモジュールADVENTURE_sFlowはその後水素利用社会向けシミュレーション技術でも応用があったので、熱対流解析の基本機能が非定常解析機能も含めて追加され、前処理機能の強化による高速化が実現されたため、実用レベルの有効性をチェックする段階になっている。非定常解析機能ではStokes問題のみならず、Navier-Stokes問題に対しても特性曲線法の活用により対称な連立1次方程式ソルバーを活用できることがポイントになっている。今回の研究では、熱方程式の部分に改良の余地があるので、そこを重点的に改良する。

4. 研究成果

(1) 静磁場解析におけるインターフェース問題のBDD前処理の実装

2014年度からBDD前処理の実装実現のために1コア処理に限定して三つの課題を設定した。一つはシュアコンプリメント行列Sとベクトルpの積qを計算する部分を独立して利用可能にすること、二つ目はノイマンノイマン前処理を実装させること、三つ目はコース行列を作成し、それを既存の平行ソルバーで解くことである。この三つが実現できれば、BDDの実装はほとんど実現できると言ってよいほどの重要な3項目になる。ノイマンノイマン前処理は2005年に一度成功した実績があるが当時の記録が紛失しており、新たな開発を行うことになった。現時点ではコードの骨格はできたが、残念ながら効果が全く出ない。部分領域数が大きくなると手法自体の特徴として効果が出ないのか、何かミスをしているのかを見極める必要がある。

予想外に時間がかかったのは最初の $q=Sp$ の計算であり、いくつか試みた結果、2015年度から2016年度にかけて LexADV の TryDDM を適用することにより、ようやく1コアの BDD 前処理に見通しをつけることができた。ただし本来の BDD 前処理は内蔵しているノイマンノイマン前処理ともども依然として効果がでておらず、唯一 BDD 前処理を簡易化した BDD-DIAG 前処理のみが収束する。前述のとおり LexADV の TryDDM を適用したので、自由度規模が100万以内に抑えられている。この程度の規模では BDD-DIAG 前処理の効果は芳しくなく、ADVENTURE_Magnetic のデフォルト前処理になっている簡易対角スケリング前処理(diag)の反復回数を減らすことができない状態である。2017年度も現在に至るまで、いくつかのベンチマーク問題で BDD-DIAG 前処理の効果をいろいろな視点からテストしているが、いずれの場合もほぼ同様な事情になっている。2017年度は特にマルチコアでの処理を可能とし、シユアコンプリメント行列 S を陽に作成しないアプローチを可能にした。3番目のコース行列作成部分は当初、既存技術の適用で問題がないと思っていたが、出発点になっている静磁場問題の不定性を反映して、コース問題にも特異性があることが判明し、2016年度はこのコース問題を反復法で解くことを試みた。ここでも前処理なしの CG 法を利用しているが、相対残差が落ちるまで収束させるより、初めの10回で強制的に終了させる CG(10) が ADVENTURE_Solid 等で用いられている不完全分解に対応して有効であることが数値的に確認できた。今後、問題を変更しても10回で良いのか等の確認が必要である。また、2017年度はこのコース問題を直接法の系統で解けないかということも検討した。計算時間の短縮のためにどうしても必要であるからである。

(2) 熱対流解析コードの機能強化

このテーマは2014年度からの課題として公開用ドキュメントの整備以外に以下の4課題を設定した。すなわち ADVENTURE_sFlow への機能強化として

- ・熱方程式部分への DDM フレームワークの適用
 - ・熱流束境界条件入力機能の追加
 - ・熱伝達境界条件入力機能の追加
 - ・BDD 前処理における通信処理改善の検討
- を図るものである。最初の DDM フレームワークの適用は開発ライブラリのプロトタイプ (LexADV の TryDDM) のテストを兼ねたものであり、一応利用可能になった。2番目、3番目のテーマは1番目のテーマが可能になった時点で、DDM フレームワークでの実現が可

能になった。4番目は派生した問題を解決しながら検討を続けた結果、これも可能になった。以上の成果を踏まえて ADVENTURE_sFlow の Ver.1.0 を公開した。2015年度は自動販売機内の熱対流計算での実践を通して、Ver.1.0 の信頼性をチェックすると同時に、燃料電池自動車の市場投入に同期させて水素漏洩時の拡散現象を熱対流のアナロジーで解く試みを本格化させる準備を行った。2016年度は水素漏洩時の拡散現象を中国の中山大学の Yao 准教授の協力で実際に計算することができた。今後の課題は静磁場解析同様、熱解析の部分が LexADV の TryDDM を使っているための100万自由度の壁を突破することと ADVENTURE_Thermal を参考にしながらの BDD 前処理を導入することである。これらの課題をクリアしていくことにより、自動販売機の熱対流解析、燃料電池自動車からの水素漏洩時の拡散解析を核にして ADVENTURE_sFlow の産業界での応用を促進していく。2017年度は全精力を(1)の課題に注いだため、(2)の課題は2018年度以降に持ち越された。

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7件)

S. SUGIMOTO, M. OGINO, H. KANAYAMA and A. TAKEI, Hierarchical Domain Decomposition Method for Devices including Moving Bodies, J. ADV. SIMULAT. SCI. ENG., 査読有, Vol.4, Issue 1, pp. 99-116, 2018, <https://doi.org/10.15748/jasse.4.99>

A. M. M. Mukaddes, R. Shioya, M. Ogino and H. KANAYAMA, Treatment of Block-Based Sparse Matrices in Domain Decomposition Method, International Journal of System Modeling and Simulation (ISSN Online: 2518-0959), 査読有, Vol 2(1), pp.1-6, 2017, DOI: 10.24178/ijsms.2017.2.1.01

杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, 階層型領域分割法による回転機の解析, IEEJ Transactions on Power and Energy, 査読有, Vol.137, No.3, pp. 195-201, 2017
10.1109/TMAG.2013.2238612

H. KANAYAMA, M. Ogino, S. Sugimoto, K. Yodo and H. Zheng, On the Coarse Matrix Solver of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis, IEEJ Transactions on Power

and Energy, 査読有, Vol.137, No.3, pp. 179-185, 2017

H. Zhu, Q. Yao and H. KANAYAMA, Large-Scale Computations of Flow around Two Cylinders by a Domain Decomposition Method, Mathematical Problems in Engineering, 査読有, Vol.2016, 8 pages, 2016, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4126123>

H. KANAYAMA, An Industrial Application of Thermal Convection Analysis, International Journal of Computational Methods, 査読有, Vol.13, No.2, pp.1640005-1 - 1640005-15, 2016, DOI: 10.1142/S0219876216400053

杉本振一郎, 田上大助, 荻野正雄, 武居周, 金山寛, 階層型領域分割法による時間調和渦電流解析の収束性改善, 日本シミュレーション学会論文誌, 査読有, Vol.7, No.1, pp.11-17, 2015, DOI: 10.11308/tjsst.7.11

〔学会発表〕(計10件)

H. KANAYAMA, Preconditioning of the Interface Problem in Magnetostatic Domain Decomposition Analysis (From Single-part to Multi-part Processing), CoMFoS2017, September 20-22, 2017, 沖縄科学技術大学院大学

H. KANAYAMA, M. Ogino, S. Sugimoto, A Coarse Matrix Incomplete Iterative Approach for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis, ICCM2017, July 28, 2017, 中国 桂林

H. KANAYAMA, M. Ogino, S. Sugimoto, A Coarse Matrix Iterative Solver for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis, COMPUMAG 2017, June 21, 2017, 韓国 大田

S. Sugimoto, M. Ogino, H. Kanayama and A. Takei, Efficient Parallel Numerical Analysis of Rotating Bodies based on Hierarchical Domain Decomposition Method, COMPUMAG 2017, June 19, 韓国 大田

H. Kanayama, Balancing Domain Decomposition (BDD) Related Preconditioners in Engineering Including Magnetostatic Problems, CoMFoS2016, October 22-24, 九州大学 西新プラザ

H. Kanayama, H. Zheng, S. Sugimoto and M. Ogino, The BDD-DIAG Preconditioner in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems, ICCM2016, August 1-4, University of California, Berkeley, CA, USA

H. Kanayama, M. Ogino, S. Sugimoto, H.

Zheng and K. Yodo, Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems, WCCM/APCOM 2016, July 24-29, Seoul

A. M. M. Mukaddes, R. Shioya, H. Kanayama and M. Ogino, Storing Techniques for Sparse Matrices -A Study on Thermal-Convection Problems, WCCM/APCOM 2016, July 24-29, Seoul

Q. Yao, Z. Shi, H. Kanayama, Large-scale Simulation of Carotid Hemodynamics by a Parallel Domain Decomposition Method, WCCM/APCOM 2016, July 24-29, Seoul

H. Kanayama, M. Ogino, S. Sugimoto, Preconditioners in Domain Decomposition Method for Magnetostatic Problems, ICCM2015, July 14-17, Pullman Hotel, Auckland, New Zealand

〔図書〕(計1件)

H. KANAYAMA and H. DAN, Tsunami Propagation from the Open Sea to the Coast, Tsunami edited by Dr. Mokhtari, InTech, 2016

〔その他〕

ホームページ等

<http://mcm-www.jwu.ac.jp/~kanayamah/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金山 寛(KANAYAMA, Hiroshi)

日本女子大学・理学部・客員研究員

研究者番号: 90294884