

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 7 日現在

機関番号：32670

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560075

研究課題名(和文) 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

研究課題名(英文) Unified construction of preconditioners in ultra-large-scale domain decomposition analysis

研究代表者

金山 寛 (Kanayama, Hiroshi)

日本女子大学・理学部・教授

研究者番号：90294884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)： 静磁場解析におけるインターフェース問題のバランシング領域分割(BDD)前処理の実装は初年度にまず理論的な部分をほぼ完成し、2年目からは実装に力を入れた。最終年度はBDD前処理の実装実現のために1コア処理に限定して研究を進め、今後必要な研究に対する大いなる見通しを得ることができた。

熱対流弱連成解析コードの機能強化は主に熱方程式部分に改良を加え、ADVENTURE_sFlowのVer.1.0の年度内公開を実現した。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(共役勾配法(CG)や最小残差法(MINRES))を活用できることがポイントになっている。

研究成果の概要(英文)： Theoretical part of implementation of the Balancing Domain Decomposition (BDD) preconditioner for the interface problem in magnetostatic analysis has almost been completed in the first 2012 FY of this research. During 2013 FY and 2014 FY, we have tried to perform real implementation of the preconditioner. In the final 2014 FY, we have concentrated our attention to one core implementation only and confirmed the future possibility of this preconditioner, leaving some unsolved matters.

Power-up of thermal convection weak coupling analysis code (ADVENTURE_sFlow Version 1.0) has mainly been done for thermal analysis, producing the open publicity of the code during 2014 FY. The characteristic curve method (the Lagrange-Galerkin method) is effectively used to have the resultant symmetric coefficient matrices for each time step, which makes the symmetric solvers like the Conjugate Gradient (CG) method or the MINimal RESidual (MINRES) method useful.

研究分野：計算理工学

キーワード：超大規模計算 領域分割法 高速化手法 前処理 統一的構築

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の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な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。ごく最近部分領域問題を直接法で解くことにより1億実自由度や約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

初年度にまず理論的な部分をほぼ完成し、2年目からは実装に力を入れた。最終年度は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。一つはシユ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、それを既存のパラレル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もよいほど重要な3項目になる。ノイマンノイマン前処理は2005年に一度極めて単純な問題で成功した実績があるが、当時のプログラムが紛失しており、BDD前処理の中間結果としても重要なので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、残念ながら部

分領域数が大きい場合には効果が全く出ていない。よく言われるように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だと思われるが、効果が出ない理由も含めて、今後も更なる検討が必要である。3番目のコース行列作成もテストランは行えるようになったが、今後もより詳細な検討が必要と思われる。予想外に時間がかかっているのは最初の $q=Sp$ の計算であり、いくつか試みたがまだうまくいっていない。最後の切り札として名古屋大学で開発された LexADV_TryDDM を試して、1 コアの BDD 前処理に早く見通しをつけたいと考えている。

関連した成果として、初年度に目途を付けた理論的な部分の細かい修正を行ったこと、ほぼ同様な考え方で九州大学の田上大助氏により、BDD 前処理の効果を示す簡易問題に対する成果が出てきたことが挙げられる。

(2) 熱対流解析コードの機能強化

このテーマは最後の2年間の課題として公開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(1)のテーマと連携しながら、開発ライブラリのプロトタイプ (LexADV_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番目の課題は1番目の課題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流れ解析部分の検討を続けた結果、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 の年度内公開を実現した。

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)

A. TAKEI, S. SUGIMOTO, M. OGINO, S. YOSHIMURA and H. KANAYAMA, EMC Analysis in a Living Environment by Parallel Finite Element Method Based on the Iterative Domain Decomposition Method, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, Vol. 62, pp.237-245, 2014, 10.11345/nctam.62.237
H. KANAYAMA and H. DAN, A Tsunami Simulation of Hakata Bay Using the Viscous Shallow-Water

Equations, Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, 査読有, Volume 30, Issue 3, pp605-624, 2013,

10.1007/s13160-013-0111-7

H. KANAYAMA, M. OGINO, S. SUGIMOTO and S. TERADA, Large-scale Magnetostatic Domain Decomposition Analysis Based on the MINRES Method, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 査読有, Vol.49, No.5, pp. 1565-1568, 2013,

10.1109/TMAG.2013.2238612

A.PREMONO and H. KANAYAMA, Characterization of Void Coalescence in Alpha-iron in the Presence of Hydrogen, Journal of Computational Science and Technology, 査読有, Vol.7, No.3, pp.395-409, 2013,

10.1299/jcst.7.395

H. KANAYAMA, M. OGINO, S. SUGIMOTO, Q. YAO and E. KOMALASARI, A Preconditioner Construction for Domain Decomposition Method of Large Scale 3D Magnetostatic Problems, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, Vol.60, pp.381-390, 2012,

10.11345/nctam.60.381

M. OGINO, S. SUGIMOTO, S. TERADA, Y. BAO, and H. KANAYAMA, A Large-scale Magnetostatic Analysis Using an Iterative Domain Decomposition Method Based on the Minimal Residual Method, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 査読有, Vol.16, No.4, pp. 496-502, 2012,

<https://www.fujipress.jp/JACIII/>

H. DAN and H. KANAYAMA, Finite Element Analysis of Tsunami by Viscous Shallow Water Equations, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 査読有, Vol.16, No.4, pp. 508-513, 2012,

<https://www.fujipress.jp/JACIII/>

[学会発表](計3件)

H. KANAYAMA, M. OGINO, S. SUGIMOTO, Preconditioners in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems, FEF2015, March 18, 2015, Taipei
H. KANAYAMA and E. TAKAMATSU, Domain Decomposition Analysis of Industrial

Thermal Convection Problems,
JSME-KSME Joint Symposium on CM
& CAE 2014, 招待講演, May 1, 2014,
Jeju
H. KANAYAMA, An Industrial
Application of Thermal Convection
Analysis, The 5th International
Conference on Computational Methods
(ICCM2014), 招待講演, July 30, 2014,
Cambridge

〔図書〕(計3件)

吉村 忍 他 WG2 メンバー(3 番目/10
名中), 第4章力学体系に基づく津波被害
のメカニズムの理解, 『東日本大震災合
同調査報告(機械編)』, 日本機械学会他
7学会による編集委員会, 2013, 93
Guest Editors: S. SUN, M. F. EL-AMIN,
Z. CHEN and H. KANAYAMA,
『Journal of Applied Mathematics,
Special Issue, "Mathematical and
Numerical Modeling of Flow and
Transport 2012"』共編(25編の投稿論文),
Hindawi Publishing Corporation, 2013,
397 ページ
編集 金山 寛 (著者は計 10 名),
『Propagation of Ultra-large-scale
Computation by the
Domain-decomposition-method for
Industrial Problems (PUCDIP 2012)』
の開催とその論文集の刊行, IMI,
Kyushu University, 2013, 121

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.jwu.ac.jp/kgr/jpn/ResearcherInformation/ResearcherInformation.aspx?KYCD=00012701>

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数物科学科・特任教授

研究者番号： 90294884