

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 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760061

研究課題名（和文）

ペタスケールコンピューティングに適したBDDC法による構造物健全性評価

研究課題名（英文）

Structural Strength Analysis Using BDDC Method for a Petascale Computing

研究代表者

荻野 正雄 (OGINO MASAO)

名古屋大学・情報連携基盤センター・准教授

研究者番号：00380593

研究成果の概要（和文）：構造物健全性評価における大規模構造解析シミュレーションの期間短縮と高精度化を可能とするために、ペタスケールコンピュータに適した数値解析手法として、balancing domain decomposition法に基づく並列有限要素法を開発した。これにより、京コンピュータ 3千ノードを用いて2億自由度規模大規模プラントモデルの静解析が約1分で完了するなど、有効なシステムの構築に成功した。

研究成果の概要（英文）：To reduce costs and improve accuracy of large-scale numerical simulation of structural strength analysis, as a numerical parallel numerical algorithm suitable for a petascale computing, a parallel finite element analysis system based on a balancing domain decomposition was developed. As a result, a static stress analysis of a large-scale plant with about 200 million degrees of freedom mesh was successfully performed in about 1 minute on the K computer of 3,000 nodes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野： 計算力学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎, 工学基礎

キーワード：ハイパフォーマンスコンピューティング, 構造工学・地震工学, 計算機システム, 計算力学

1. 研究開始当初の背景

国内外でペタスケールの演算性能を持つスパコンが整備されてきており、これら次世代スパコンを活用する有用なアプリケーションが必要となってくる。一方、国民の生命と財産を守るために不可欠の構造物の健全性評価では3次元弾塑性有限要素解析に基づく数値解析シミュレーションが重要となる。これらを解決するため、ペタスケールの演算性能を持つ次世代スパコン上において3次元有限要素法などの実用的な手法を高効率に

用いるためには、数値解析アルゴリズムと並列計算機技術の実績を持つ研究代表者がこれまでの成果を踏まえて、balancing domain decomposition法及びBDDC法を中心とした数値解析手法の研究開発を行う。これは、数学者を中心とする海外の研究者では行われることがないであろう、同手法のスパコン向け実装及び応用問題への適用を実現することになる。

2. 研究の目的

本研究は、ペタスケールの演算性能を持つ大型計算機システムに適した数値解析手法として、バランシング領域分割法(BDD 法)及び制約条件付きバランシング領域分割法(BDDC 法)に基づく並列有限要素法を研究開発することで、構造物健全性評価における大規模構造解析シミュレーションの期間短縮と高精度化を同時に実現することが目的である。

3. 研究の方法

本研究は、a) BDDC 法を中心とする大規模自由度問題向け数値解析アルゴリズムの研究、b)次世代スパコン適用に向けた並列アルゴリズムの研究と性能評価、c)複雑な弾塑性問題における大規模自由度問題の実用性評価、及び d)実用問題への適用による有用性評価の4項目に分けて実施した。特に最初の2年間で a)及び b)を実施し、最後の1年で c)及び d)を実施した。研究前半期は PC クラスタを利用して研究を進め、後半期は実際に京コンピュータなどのスパコンを利用することで本研究の有効性を確認した。

4. 研究成果

(1) 平成 21 年度には以下の成果が得られた。

事前調査済みであった BDDC 法アルゴリズムについて、計算機への実装に適した行列形式による書き下しを行った。これにより、従来手法である BDD 法に比べて線形代数演算の性能がより重要となることが判明したため、並列計算機実装の基礎となる階層型領域分割法の次世代計算機向け並列実装の最適化を行った。特に、CPU 内に複数の演算コアを持つメニーコア CPU におけるコア間並列化方法として、行列非記憶方式(Matrix Storage-Free)に基づく領域分割法実装を提案し、Intel Core i7 などの 4 コア CPU に対して 3 倍以上の並列効率を出すことに成功した。また BDDC 法は BDD 法と同様に coarse 問題の計算コストが重要となるため、その予備調査として BDD 法における coarse 問題演算性能の定量的評価を行い、それに基づく最適領域分割数の提案を行った。これにより、超並列計算機上において計算時間を準最適化するパラメータ設定を容易にした。さらに、不完全バランシング法における不完全さが収束性に与える影響を調べるため、反復法に基づく coarse 問題解析の実験を行った。図 1,2 に coarse 問題を共役勾配(CG)法で解いた場合における、CG 法収束判定値と BDD 法の収束履歴の関係を示す。図より、coarse 問題の解析精度は 2-3 桁程度で十分であり、特に IBDD-DIAG 法では収束判定値 1 桁でもよいことが得られた。これは、将来の超大規模解析において重要な指標と言える。

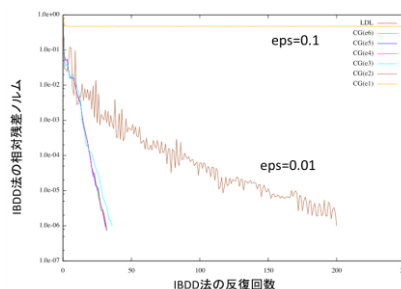


図 1 coarse 問題収束判定値と IBDD 法の収束履歴

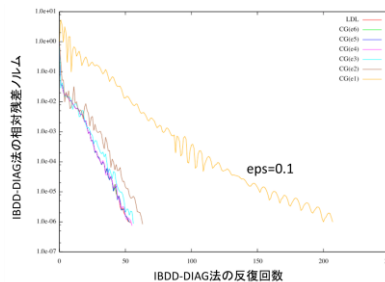


図 2 coarse 問題収束判定値と IBDD-DIAG 法の収束履歴

また、実用問題への応用として、BDD 法の鈍化き裂付きモデルの大変形弾塑性解析を実施し、塑性の進行に伴って収束性の改善が得られにくくなることが分かった。これは BDDC 法においても同様の傾向となることが推定できたため、塑性が大きく進行したときの条件数悪化を改善するための手法開発が不可欠であることが得られた。

(2) 平成 22 年度には以下の成果が得られた。

平成 21 年度に行列形式での書き下しを行った BDDC 法を並列計算機上に実装することに成功した。簡易形状モデルを用いた収束性評価により、従来手法である BDD 法と比較して収束性の向上を得ることができた。しかし、各領域において制約条件を課す primal 自由度の選択によっては収束性が悪化することが分かった。また、大規模有限要素解析で重要となる Delaunay 四面体分割と METIS 領域分割を組み合わせたモデルに対しては、収束性が大きく悪化した。これは、文献調査によって、primal 自由度の選択方法によって対応できることが分かったため、BDD 法と BDDC 法の両方とも開発を継続していくこととした。

次に、BDD 法全体の高速化かつ省メモリ化を実現するために、局所ファイン修正法について調査した。特に非正則問題となる局所ファイン問題に対して、ローカルシュアコンプリメント行列を陽に作成する手法(S)と、ロ

一カル剛性行列で簡易化する手法(K)のそれぞれについて、CG法、共役残差法(CR)、最小残差法(MINRES)、対角化近似(DIAG)、正規化行列による直接解法(GINV)、疑似逆行列(PINV)を用いた場合のBDD法収束性比較を行った。その結果を図3,4に示す。これより、総計算時間と使用メモリの観点から、K-DIAG型が最適であることが得られた。これは、研究代表者が提案してきたBDD-DIAG法と同じ手法でもあり、提案手法の有効性を示すことができた。

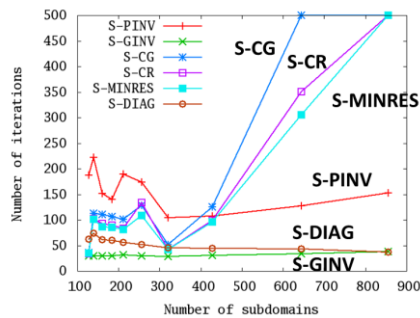


図3 ローカルシュアコンプリメント行列を用いた局所ファイン修正法とBDD法の収束性評価

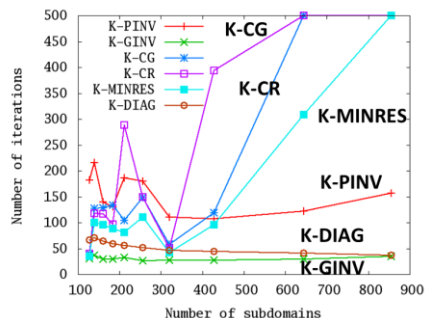


図4 ローカル剛性行列を用いた局所ファイン修正法とBDD法の収束性評価

次に、ペタコンの次の世代における計算機アーキテクチャについて調査し、メニーコアCPUとGPUなどの拡張演算装置のハイブリッド型が主流となることが推測された。よって、GPU向けの並列有限要素法の実装を行った。BDD法における係数行列ベクトル積で必要となるローカルシュアコンプリメント行列を陽に作成するアルゴリズムを提案し、CUBLASライブラリを用いることで、プログラムの大幅な改良なくGPUへの移植を実現し、約100万自由度規模解析において単一GPUで単一CPUと比較して2倍の高速化に成功した。

また、高圧圧力容器への応用として、FRP材料の引張り試験を数値解析で行い、繊維強化軸と荷重方向の関係でBDD法の反復回数

に2倍程度の差が生じる結果が得られ、アルゴリズムを改良する必要があることが分かった。

(3) 平成23年度には以下の成果が得られた。

平成22年度までに構築したBDDC法について、規則的な領域分割問題に比べて収束性が大きく悪化するjagged interface問題の収束性評価を行った。これにより、primal自由度を領域間境界面の重心などに追加することで一定の改善効果を得ることに成功した。しかし、根本的な改善とは言えず、四面体要素モデルが多く用いられる実問題に対しては、総計算時間の観点からもBDD法の方が優れていることが分かった。これら領域分割パターンの違いにおける各手法の収束履歴図を図4,5に示す。

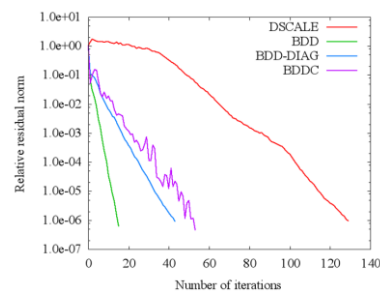


図5 規則的な領域分割におけるBDDC法の収束履歴

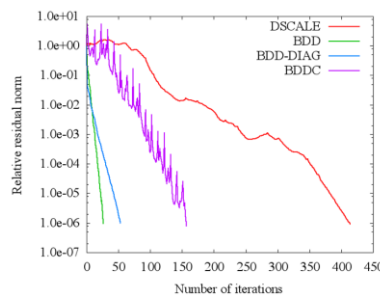


図6 不規則的な領域分割におけるBDDC法の収束履歴

次に、BDD法を京コンピュータに実装し、性能評価を行った。マルチコアCPUに対する並列処理として、BDD法の領域内部自由度問題、Neumann-Neumann前処理、及びcoarse行列作成で現れる部分領域方向に対するループ処理をOpenMPでスレッド並列化し、ループの静的ブロック分割と動的サイクリック分割を適切に使い分けることで、効率的なハイブリッド並列化に成功した。また、大規模疎行列向け直接法ライブラリを調査し、MUMPSライブラリの有効性が確認されたため、coarse修正に適用した。これにより、従来手法に比べて計算時間の大幅短縮に成功した。結果として、京コンピュータ3,000

ノード以上を用いて 2 億自由度規模大規模プラントモデルの静解析が約 1 分で完了するなど、構造物健全性評価に有効なシステムの構築に成功した。

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 10 件)

① Kanayama, Ogino, Sugimoto, Yao, Komalasari, A preconditioner construction for domain decomposition method for large scale 3D magnetostatic problems, Theor. Appl. Mech. Jpn., 査読有, 60, 2012, pp.381-390

DOI:10.1109/ICMSAO.2011.5775641

② Liu, Miresmaeili, Ogino, Kanayama, Finite element implementation of an elastoplastic constitutive equation in the presence of hydrogen, J. Comput. Sci. Tech., 査読有, 1-5, 2011, pp.62-76

DOI:10.1299/jcst.5.62

③ Kawai, Ogino, Shioya, Yoshimura, Large scale elasto-plastic analysis using domain decomposition method optimized for multi-core CPU architecture, Key Eng. Mater., 査読有, 462-463, 2011, pp.605-610

DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.462-463.605

④ 金山, 荻野, 杉本, 趙, 階層型領域分割法を用いた 1 億自由度の非線形静磁場解析, 日本シミュレーション学会論文誌, 査読有, 2-1, 2010, pp.1-8

https://www.jstage.jst.go.jp/article/tjsst/2/1/2_1_1/_article/-char/ja/

⑤ Takei, Sugimoto, Ogino, Yoshimura, Kanayama, Full wave analyses of electromagnetic fields with an iterative domain decomposition method, IEEE Trans. Magn., 査読有, 46-8, 2010, pp.2860-2863

DOI:10.1109/TMAG.2010.2044775

⑥ Yao, Kanayama, Notsu, Ogino, Balancing domain decomposition for non-stationary incompressible flow problems using a characteristic-curve method, J. Comput. Sci. Tech., 査読有, 4-2, 2010, pp.121-135

DOI:10.1299/jcst.4.121

⑦ Yao, Kanayama, Notsu, Ogino, Incomplete balancing domain decomposition for large scale 3-D non-stationary incompressible flow problems, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 査読有, 10, 2010, 012029

DOI:10.1088/1757-899X/10/1/012029

⑧ 山田, 荻野, 吉村, バランシング領域分割法の最適領域分割数の予測とその数値検証, Trans. JSCES, 査読有, Vol.2009, 2009, 20090014

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscs/2009/0/2009_0_20090014/_article/-char/ja/

⑨ Kanayama, Ndong-Mefane, Ogino, Miresmaeili, Reconsideration of the hydrogen diffusion model using the McNabb-Foster formulation, Memories of the Faculty of Engineering, Kyushu University, 査読有, 69-4, 2009, pp.149-161

<http://kenkyo.eng.kyushu-u.ac.jp/memoirs-eng/bulletin/69/4/paper3.pdf>

⑩ Miresmaeili, Ogino, Nakagawa, Kanayama, A coupled elastoplastic-transient hydrogen diffusion analysis to simulate the onset of necking in tension by using the finite element method, Int. J. Hydrogen Energy, 査読有, 35-3, 2009, pp.1506-1514

DOI:10.1016/j.ijhydene.2009.11.024

[学会発表] (計 15 件)

① 荻野, 他 4 名, COCR 法に基づく領域分割法を用いた高周波電磁界有限要素解析, 第 61 回理論応用力学講演会 (招待講演), 2012 年 3 月 9 日, 東京大学

② 荻野, 他 3 名, BDD 法における大規模疎行列向けコースグリッド修正法, HPCS2012, 2012 年 1 月 25 日, 名古屋大学

③ Ogino, 他 3 名, Scalable and high performance implementation of a balancing domain decomposition method for multicore clusters, ICMR2011, 2011 年 11 月 21 日, 韓国, BEXCO

④ Ogino, 他 3 名, Large-scale magnetostatic analysis using an iterative domain decomposition method based on the minimal residual method, Int. Workshop on application of iterative methods to engineering and its mathematical element, 2011 年 10 月 24 日, 同志社大学

⑤ 荻野, BDDC 法による多階層並列前処理アルゴリズム, 第 24 回計算力学講演, 2011 年 10 月 8 日, 岡山大学

⑥ 荻野, 他 4 名, COCR 法を用いた高周波電磁界の大規模有限要素解析, 静止器/回転機合同研究会, 2011 年 8 月 25 日, 新潟大学

⑦ 荻野, 市田, 金山, 4 面体要素を用いた FRP 压力容器解析システムの構築に関する研究, 第 16 回計算工学講演会, 2011 年 5 月 27 日, 東京大学

⑧ 藤瀬, 荻野, 金山, GPU における 3 次元構造解析のための領域分割法の高実装, 第 16 回計算工学講演会, 2011 年 5 月 25 日, 東

京大学

⑨荻野, 領域間拘束に基づく BDD 前処理法の基礎的研究, 第 16 回計算工学講演会, 2011 年 5 月 25 日, 東京大学

⑩Ogino, 他 3 名, Parallel implementation of a balancing domain decomposition method for multi-core processors, BWCCA 2010, 2010 年 11 月 3 日, 福岡工業大学

⑪荻野, 金山, BDD 法における局所ファイン修正法の検討, 日本機械学会第 23 回計算力学講演会, 2010 年 9 月 24 日, 北見工業大学

⑫Ogino, Kanayama, An inexact balancing domain decomposition preconditioner for the cluster of multicore processors, WCCM/APCOM 2010, 2010 年 7 月 22 日, オーストラリア, Sydney Convention and Exhibition Centre

⑬荻野, 塩谷, 金山, マルチコア PC クラスタ環境における BDD 法のハイブリッド並列実装, 第 15 回計算工学講演会, 2010 年 5 月 27 日, 九州大学

⑭荻野, 金山, 大規模構造解析に適した additive Schwarz 型バランシング前処理法, 日本機械学会第 22 回計算力学講演会, 2009 年 10 月 10 日, 金沢大学

⑮荻野, 他 3 名, BDD 法のマルチコア向け実装と収束性評価, 日本計算工学会第 14 回計算工学講演会, 2009 年 5 月 13 日, 東京大学

[図書] (計 1 件)

①日本計算工学会・財団法人計算科学振興財団編集, 丸善, 計算力学シミュレーションハンドブック (第 2.7 節担当), 2009, 294

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.hpc.itc.nagoya-u.ac.jp/ogino/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荻野 正雄 (OGINO MASAO)

名古屋大学・情報基盤センター・准教授

研究者番号: 00380593

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者なし