

## 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 5月31日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760701

研究課題名（和文） 国際熱核融合実験炉 ITER のリアルタイムモニタリングシステムの開発

研究課題名（英文） Optimization of plasma stability analysis system for nuclear fusion reaction

研究代表者

櫛田 慶幸 (KUSHIDA NORIYUKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究員

研究者番号：50435608

研究成果の概要（和文）：

核融合炉ではプラズマ破れによる燃焼の中断が問題となっている。これを回避するための有力な方法の一つとして、プラズマの安定性をチェックし不安定の兆候があれば即安定化させるという方法がある。しかし、プラズマの安定性解析は非常に大きな計算でありながら、極めて短時間(2~3秒程度)で計算を完了しなければならない。本研究では、最先端計算機である Cell クラスタを用いた適したアルゴリズムを開発し、目標時間内に計算を完了させることができた。

研究成果の概要（英文）：

Plasma disruption is the one of the most important issue for continuous plasma burning. In order to avoid plasma disruption, constant stability monitoring is said to be a promising method. However, the stability analysis requires huge amount of computation and has to be completed within quite short time (2~3 seconds). Therefore, we employ a state of the art computer called Cell cluster and develop a new algorithm for it. Consequently, we could achieve the target computational speed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：核融合学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード: Cell プロセッサ, ハイパフォーマンスコンピューティング, リアルタイムコンピューティング, 数値計算, 国際熱核融合実験炉 ITER

## 1. 研究開始当初の背景

入力に対し、わずかな時間の中に数値シミュレーションを実行し結果を出力するリアルタイムシミュレーションは様々な分野で必要とされている。そのような例として核融合実験炉のモニタリングが挙げられる。国際熱

核融合実験炉 ITER[1]は、従来にない大規模電流を利用するため、今までは問題にならなかった、プラズマの不安定性により引き起こされる電流発生が、機器に深刻なダメージを与える可能性がある。そのため、つねにプラズマの状態を把握する必要があるが、直接観測する事はできず、センサーの情報をもとに

数値シミュレーションを行い、モニタリングを行う必要がある。

安全運用のためにモニタリングを行う場合、プラズマの不安定性が全体に波及するまでの時間スケールが数秒であるため、1秒程度でシミュレーションを終了する必要がある。このような要請を満たすべく、モニタリング装置の中核となるソフトウェア MARG2D の開発が既存のスーパーコンピューター上（日本原子力機構が所有する Altix3700Bx2）で行われている。Altix3700Bx2 はクラスター型のスーパーコンピューターであり、演算処理装置の数を増やすことで高速化を達成するシステムである。しかしながら、クラスター型のスーパーコンピューターは一般に処理装置の数が増加すると処理効率が低下する。実際 MARG2D でも 128 台まで装置を増加させることで 1 秒と言う要請を満たそうとしたが、効率低下に苦しんでおり、さらなる改善を模索している。

## 2. 研究の目的

近年、このような課題に対して解の一つとなりうる、演算加速装置が開発されてきている。演算加速装置は一つの機器で高い性能を持つため、効率低下の問題が低減される。しかしながら、演算加速装置の高い演算性能を十分に発揮するためには、特殊なプログラミング手法が必要となる。本研究は、MARG2D において大きな処理時間を占める、ブロック三重対角行列ソルバーと、行列生成処理を演算加速装置上への実装し、必要な計算性能を満たすことが目的である。

## 3. 研究の方法

演算処理装置（アクセラレーター）は、様々なものが開発されているが、中でも IBM が開発を行った Cell は、次の点で非常に優れた特徴をもつ。

- (1) 一つの演算装置に高い演算性能（一般的な CPU の 10 倍以上）を持たせることができる
- (2) 演算性能に関して一般的な CPU よりも費用対効果が高い

ということにある。このため、本研究では Cell を演算処理装置として用いること、また、Cell の性能を最大限活用できるアルゴリズムを開発することで MARG2D の高速化を達成する。

事前の見積もりにより、必要な計算量（全体で 10 万次元の複素行列の生成および求

解： $10^{10}$  回の計算が必要）と Cell が持つ計算性能（一秒間に  $2 \times 10^{11}$  回計算可能）が比較できており、1 秒程度という要請は十分に現実的な目標である。しかしながら、Cell は開発されてからまだ間がないこともあり、実用的な数値計算プログラムの開発はまだ行われていないのが現状である。そのため、Cell の性能限界と、どのようにその高い性能を発揮すればよいかを見極めながら研究を進める。

Cell が既存のプロセッサと大きく異なる点は二つある。すなわち、(a) 多数の小型演算装置群から構成されていること、(b) 各演算装置が独自の、高速だが少量のメモリーを持つこと、である。これら二つの特徴を生かすことが Cell の高い性能を発揮するために必要である。(a) に関しては超並列計算環境での実装を参考にプログラムを行う。他方、(b) に関しては、計算を小さな問題に分割するブロッキングなどの技術を応用し、対応する。

## 4. 研究成果

MARG2D の中で最も計算時間がかかるのは、行列の最小固有値を求める箇所である。従来は最小固有値を求めるために逆べき乗法と呼ばれるアルゴリズムを採用していたが、Cell に適した方法である共役勾配法を採用し、Cell 上で高速動作することを狙った。共役勾配法は、繰り返しの計算を行うことで最小固有値の近似値を改善していく方法である。この繰り返し計算の回数を少なくすることで高速に計算できるようにする方法が知られており、前処理技術と呼ばれる。

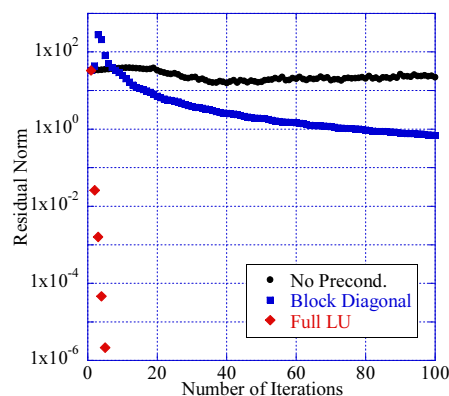


図 1 前処理を変えた場合の共役勾配法の収束性

図 1 に代表的な前処理手法である、LU 分解前処理 (Full LU) ・ブロック対角前処理 (Block Diagonal) ・前処理なし (No Precond.) の三種

類の前処理を施した共役勾配法の収束の様子を示す。横軸は繰り返し計算の回数であり、縦軸は残差と呼ばれる誤差を推定する指標である。我々が調査を行ったなかでは唯一 LU 分解前処理を施した共役勾配法のみが木法計算速度を達成できる見込みが得られたため、Cell への実装する際はこのアルゴリズムを採用した。

Cell は幾つかの計算を同時並行で行うことで計算速度を高めた並列計算機である。本研究では、さらに高い性能を得るために、Cell を複数台接続した Cell クラスターを用いて高速化を図った。

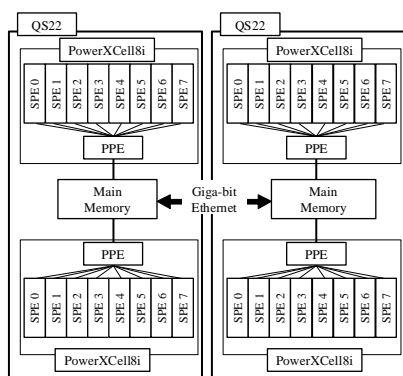


図 2 Cell クラスターの概略

図 2 に Cell クラスターの概略を示す。Cell の数値計算向け改良版である、PowerXCell8i を二つ搭載した QS22 を採用し、それを最大四台ギガビットイーサネットで接続し開発を行った。図中 SPE が実際に計算を行う演算装置であり、一つの Cell のなかに 8 台封入されている。PPE は、それらを統括する装置である。

共役勾配法は並列計算に適した方法であるが、LU 分解前処理手法はそのままでは並列計算を行うことができない。このため、LU 分解前処理の最中においては、ある QS22 の内部の情報だけを用い、他の QS22 が持つ情報は無視するようなアルゴリズムを開発することで、並列計算を可能のしながら前処理の効果を維持する手法（局所化完全 LU 分解前処理）を開発し QS22 上で高い性能を発揮する LU 分解前処理を実装した。

固有値計算のみならず、行列を生成する箇所も同様に計算量が大きい。行列生成についても、共役勾配法を Cell 上に実装するとき得られた知見をもとに並列計算を可能とし、高速化することができた。

最終的に、ターゲットとなる問題(約 10 次元のブロック三重対角エルミート行列)について、行列生成に 1 秒、固有値発見に 1 秒で行うことができるようになり、目標性能を

達成することができた。

## 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 5 件)

[1] 櫛田 慶幸, 武宮 博: Cell プロセッサにおける境界値問題のための有限要素法の高速度実装, 日本計算工学会論文集, 査読有, 20100002, 2010.

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscs/2010/0/2010\\_0\\_20100002/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscs/2010/0/2010_0_20100002/_article/-char/ja/)

[2] Noriyuki Kushida, Hiroshi Takemiya, and Shinji Tokuda: High speed eigenvalue solver on the Cell cluster system for controlling nuclear fusion plasma, The proceedings of International Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing, 査読有, 2010, 482-488

DOI:10.1109/PDP.2010.22

[3] Noriyuki Kushida: Element-wise Implementation of Iterative Solvers for FEM Problems on the Cell Processor, The proceedings of International Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing, 査読有, 2011, 401-408,

DOI: 10.1109/PDP.2011.74

[4] Noriyuki Kushida, Ken-ichi Fujibayashi, and Hiroshi Takemiya: Development of a High-speed Eigenvalue-solver for Constant Plasma Monitoring on a Cell Cluster System, The proceedings of International Conference on Computational Science 2011, 査読有, 2011, 898-907,

DOI:10.1016/j.procs.2011.04.095

[5] Noriyuki Kushida: On-the-fly Computing on Many-core Processors in Nuclear Applications, Progress in Nuclear Science and Technologies, 査読有, Vol. 2, 2012, 663-669,

<http://www.aesj.or.jp/publication/pnst02/data/663-669.pdf>

[学会発表] (計 2 件)

[1] Noriyuki Kushida, and Hiroshi Takemiya: Implementation of plasma stability code on a Cell cluster system for

constant plasma monitoring, World Academy of Science, Engineering and Technology, issue 64, pp. 319-327, 2012, 2012/Apr/11, Venice, Italy.

[2] Noriyuki Kushida: Acceleration of Infrasonic and Radioactive Transfer Simulation with Multicore Processors, Proceedings of the Work in Progress Session held in connection with the 20<sup>th</sup> EUROMICRO International Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing, pp. 7-8, 2012, 2012/Feb/12, Garching, Germany.

〔図書〕 (計 0 件)

〔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

[1] 世界中の計算機を自在に連携した原子力シミュレーションの実現 - 原子力グリッド基盤 AEGIS の構築 -, 未来を拓く原子力原子力機構の研究開発成果 2009 (日本原子力研究開発機構成果普及情報誌), p 12-2, 2009.

[2] Cooperation of the World's Supercomputers for Nuclear Engineering Simulation -Development of Atomic Energy Grid Infrastructure AEGIS-, JAEA R&D Review 2009, p 12-2, 2009.

[3] Cell クラスタによる高速固有値解法の開発 - 核融合プラズマの実時間安定性制御を目指して - 未来を拓く原子力 原子力機構の研究開発成果 2009 (日本原子力研究開発機構成果普及情報誌), p 12-2, 2010.

[4] Development of Fast Eigenvalue Solver on a Cell Cluster - Toward Real Time Plasma Stabilization on ITER -, JAEA R&D Review 2010, p 12-2, 2010.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

櫛田 慶幸 (Kushida Noriyuki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究員

研究者番号：50435608

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし