

## 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 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21244020

研究課題名（和文） 専用計算機による惑星系・政談・銀河の進化の研究

研究課題名（英文） Study of the evolution of planetary system, star clusters and galaxies using a special-purpose computer

## 研究代表者

牧野 淳一郎（MAKINO JUNICHIRO）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50229340

研究成果の概要（和文）：新しく開発した、衝突系、無衝突系双方に利用できる Particle-Particle Particle Tree 法で使うことを考慮した重力多体問題専用計算機 GRAPE-8 を開発した。プロセッサチップ単体では 40Gflops/W と現在の汎用マイクロプロセッサの 30 倍以上の電力効率を実現し、システムとしても 6Gflops/W 程度を実現した。この結果、大規模な天体物理シミュレーションのために必要な電力コストを大きく削減できた。

研究成果の概要（英文）：We developed a new special-purpose computer, GRAPE-8, designed to be used with Particle-Particle Particle Tree method, which is a method to handle both collisionless and collisional systems efficiently. The processor chip of GRAPE-8 achieved the performance per watt of 40 Gflops/W, which is more than 30 times better than those of the latest general-purpose microprocessors. The performance per watt of the total system is around 6Gflops/W, nearly an order of magnitude better than that of usual PC clusters. Thus, we succeeded to reduce the cost of electricity for large-scale astrophysical simulations.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
2010 年度	15,400,000	4,620,000	20,020,000
2011 年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
総計	35,000,000	10,500,000	45,500,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学、天文学

キーワード：理論天文学

## 1. 研究開始当初の背景

天文学の扱う対象の殆どは自己重力系であり、重力不安定や重力熱力学的不安定によって自発的な構造形成をする。この例は惑星系形成、星形成、星団の形成・進化、銀河形成、大規模構造の形成等、殆どの天体の形成・進化である。これらの天体の理論的な研究には重力多体系の数値シミュレーションが重要な役割を果たす。しかし、重力多体シミュレーションでは粒子間相互作用の計算量が多

いため、最新の並列スーパーコンピューターを使っても分解能・精度が十分ではない。

我々が開発してきた GRAPE は、この粒子間相互作用の計算に特化した専用計算機であり、専用化することで通常の計算機に比べて 2-3 桁高い価格性能比と消費電力当り性能を実現してきた。特に、2002 年に完成した GRAPE-6 は、2008 年の現在でもシステム全体として消費電力 1W 当りの演算性能が 2Gflops とマイクロプロセッサベースのシ

システムに比べて1桁高く、価格当りの性能も大きく上回っている。

汎用の並列計算機やマイクロプロセッサベースのPCクラスタ以外の、専用計算機等によって大規模な天文シミュレーションを行う、というアプローチでは過去10年以上にわたって我々のグループが世界をリードしてきており、惑星形成、星団進化等いくつかの分野で日本のグループが世界をリードする原動力になっている。また、過去に開発してきたGRAPE-3からGRAPE-6にいたるシステムは世界中の数十に及ぶ大学・研究所等で使われてきた。

我々はGRAPE-6の次のプロジェクトとして、プログラム可能な汎用プロセッサを多数集積したGRAPE-DRプロセッサを開発した。このシステムはほぼ完成し、GRAPE-6に比べて10倍程度の性能を実現した。しかし、汎用化したことで効率は大きく下がった。具体的には、トランジスタ数では20倍に増えたのに、演算器の数では3倍弱にとどまる。つまり、7倍程度損になっている。このような問題があるのに汎用化を試みたのは、半導体の開発費が高騰したためである。20年前にはゲートアレイの開発費は数百万円であったが、GRAPE-DRの開発を検討していた時期には初期コストは4億円程度と見積もられており、開発費のための予算獲得には汎用化が必須であった。

一方、この10年で汎用計算機による大規模シミュレーションの状況も変化しつつある。汎用CPU以外のものとして、GPGPUを使う、というアプローチが様々な分野で試みられている。GPGPUとは、パソコンのグラフィックボードに搭載されている描画用のプロセッサ(GPU)を汎用計算に使おうという試みである。

過去のGPUは座標変換やレンダリング等の特定の機能に専用化したパイプラインを多数集積したものであったが、描画アルゴリズムが複雑化してきたことに伴い、多数のプログラム可能な処理単位を使って並列処理をする方式に変化してきている。これは我々のGRAPEからGRAPE-DRへの変化とほぼ同時期に、同じような意図の元に行われた。この変化のため、GPUをシミュレーション等の科学技術計算に使うことが可能になっている。GPUのメリットは価格であり、最新の製品が10万円以下で購入でき、汎用マイクロプロセッサに比べると数倍の性能を実現できることもある。しかし、多くの実用的なアルゴリズムでは汎用マイクロプロセッサの2倍程度に留まっている。

このようなアプローチが注目されている理由の一つはもちろんハードウェアの性能当りの価格が低いことだが、もうひとつの理由は電力コストである。計算機の価格あたりの

性能はここ数十年間指数関数的向上を続けているが、ここ20年ほどは価格当りの電力消費も急速に上昇し、結果として数年後には電力コストがハードウェアのコストを上回ると予測されている。このため、大規模シミュレーションを使った研究を進めるためには価格性能比が高いだけでなく電力当りの性能が高いシステム、計算手法を開発することが重要になってきた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、次世代の重力多体問題専用計算機GRAPE-8を開発し、それを有効に利用することで惑星形成、星団の進化、銀河形成等の研究を進めることである。

GRAPE-8は、1988年に開発が始まった重力多体問題専用計算機GRAPE(GRAVity Pipe)シリーズの第8世代となるべきものである。本研究では、初期コストの問題を、最近になって実用化が進んできたStructured ASICと呼ばれる技術を使うことで回避する。この技術はカスタムLSIとFPGAの中間的なもので、LSIの配線層の一部やピアだけをカスタマイズする。もちろん、セルベースのLSIに比べて回路規模では5倍ほど損になるが、初期コストが2桁近く下がるため小規模なプロジェクトでも利用可能となる。特に、今回のプロジェクトで採用を検討しているeASIC社の製品では、GRAPE-6チップ10個分程度の回路が集積でき、50-100倍の速度が実現できると見積もられる。

GRAPE-8では、1チップ当りTflops前後の速度を実現することで、国立天文台のスーパーコンピュータCray XT4をきく上回る速度を実現し、スーパーコンピュータを長期間占有しても不可能な計算を容易に実行可能にすることが目標である。このシステムの消費電力は10KW以下を目標とし、2009年現在のマイクロプロセッサに比べると電力当りの性能を2桁程度高くする。

より具体的には、第一の目標はGRAPE-8ハードウェアを完成させることである。3年の研究期間のうちの2年半をハードウェア開発に費やすため、GRAPE-8システムを使った天文学研究の成果の多くは研究期間終了後に得られることになる。

## 3. 研究の方法

まず、プロセッサチップの開発を行う。プロセッサチップにはStructured ASICであるeASIC社のN2Xを用いる計画である。

GRAPE-8では、基本的となる相互作用計算、時間積分アルゴリズムとして我々が最近開発したParticle-Particle Particle-Tree法(P3T法)を用いる。

現在、無衝突系の大規模シミュレーションには、並列化されたツリーアルゴリズムが広

く用いられている。この方法は1ステップ当りの計算量は  $O(M \log N)$  ( $N$  は粒子数) と小さいが、独立時間刻みと組み合わせた時に効率が急速に低下する、という困難がある。広く使われているアルゴリズムでは、粒子毎に時間刻みが違う場合、もっとも短い時間刻みでツリー構造を作り直す。このため、非常に短い時間刻みが発生した時に計算量が増える。部分的にツリー構造を修正する、というやり方は並列化されていないプログラムでは試みられているが、大規模並列プログラムではうまくいっていない。我々は、シンプレクティック法の多重時間ステップ化に用いられている、ハミルトニアンポテンシャル項をタイムスケールにより分割し、それぞれに別のタイムステップを与える方法を拡張する方法を開発し、銀河中心領域での星団の進化を近似なしに扱うことに初めて成功した (Fujii, et al. 2008)。P3T 法では、粒子同士の重力相互作用自体を近距離成分と遠距離成分に分割することで、銀河内の星団のような階層構造がはっきりした状況でなくてもハミルトニアン分割を可能にする。

この方法を使う場合には、計算量の大半はツリー法による遠距離相互作用計算となるので、専用計算機ではそちらだけを加速することを考え、重力の計算精度を落とし、ハミルトニアン分割に対応できるカットオフ関数を実装する。この計算スキームの実装・テストとプロセッサパイプラインの開発を並行して進め、計算スキームのある程度の検証ができた段階でハードウェア仕様を確定させ、プロセッサチップ、ボードを開発する。

プロセッサチップには、粒子メモリや基本的な制御回路、計算と通信を並行して進めるためのダブルバッファとなるメモリ等を集積する。ボードにはこのチップを複数搭載し、ホスト計算機と PCIe インターフェースでつなぐ。

チップ自体に PCIe インターフェースを実装することも考えられるが、開発時間を短縮し、ホスト側の PCIe インターフェースの制限や変更に対応可能とするため、PCIe インターフェースは汎用の FPGA チップを使って実装し、FPGA チップと GRAPE-8 チップの間は単純な並列転送チャンネルで接続する。

#### 4. 研究成果

最重要な目標である GRAPE-8 プロセッサチップの開発と搭載したボードの開発・検証を終了した。図 1-4 にチップのアーキテクチャとボードのアーキテクチャをしめす。

図 1 はチップのトップレベルの構造である。相互作用を及ぼす粒子を格納する  $j$  粒子メモリ 1 ユニット、パイプラインブロック 6 ユニット、それから制御/インターフェースブロック 1 つからなる。

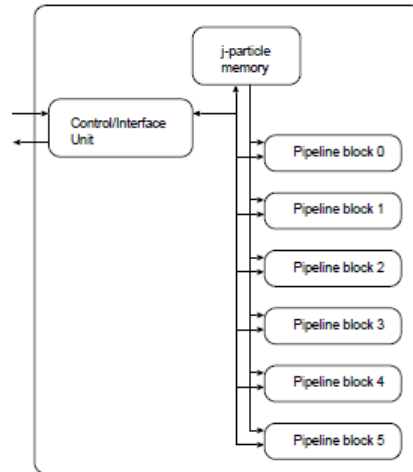


Fig. 1. The top-level structure of GRAPE-8 processor chip

図 2 はパイプラインブロックの構成をしめす。実際の重力計算パイプラインは 8 本あり、その他に入力データ用バッファメモリ、出力データ用側メモリ、近接粒子リスト用メモリを持つ。

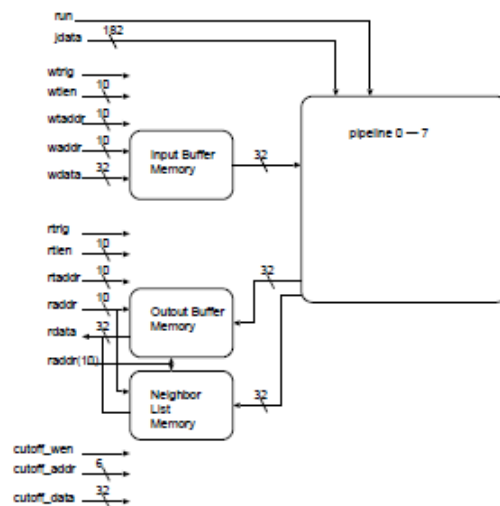


Fig. 2. The structure of the pipeline block

図 3 にパイプラインの構成をしめす。基本的に単純な粒子間のニュートン重力とそのポテンシャルを計算するが、P3T 法での利用のために重力を距離依存の任意関数でカットオフするためのユニットを装備する。入力の座標は固定小数点 32 ビット、最終の加速度等は固定小数点 64 ビット形式で計算・入出力する。その他の中間表現は仮数分 9 ビットの浮動小数点形式である。

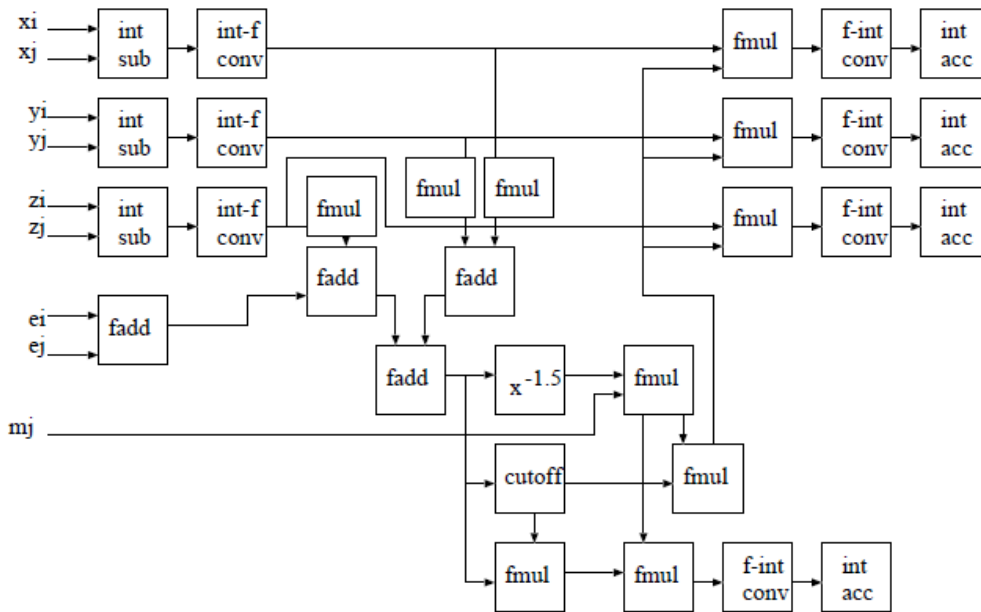


Fig. 3. The force calculation pipeline

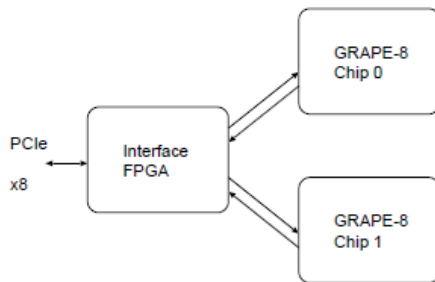


Fig. 4. The processor board

図5に開発したボードを示す。中央にあるのがPCIeインターフェースのためのFPGAチップであり、その両側に開発したプロセッサチップが搭載されている。



Fig. 5. The photograph of the processor board

プロセッサチップ単体の性能は 480Gflops 相当であり、消費電力は実測で 13W であった。また、カード全体のピーク消費電力は 46 W であった。これらははそれぞれ、電力当り性能としては 37 Gflops/W, 21Gflops/W に相当し、現在の汎用スーパーコンピュータに比べて 50-100 倍程度高い。また、最新

の「京」に比べても 20 倍以上高い電力当り性能になっている。

現在、量産したボードを用いたクラスタシステムを設置、調整中であり、今後天文学研究に使っていく。

#### 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1件)

(1)Oshino, S., Y. Funato, and J. Makino, Particle-Particle Particle-Tree: A Direct-Tree Hybrid Scheme for Collisional N-Body Simulations, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2011, 63, 881-890. 査読有り

〔学会発表〕(計9件)

(1)牧野 淳一郎、GRAPE-8 の性能評価 日本天文学会 春期年会 2012/3/22 龍谷大学

(2)牧野 淳一郎、グリーンスパコンを作る 情報処理学会 2011/3/2 東工大

(3)牧野 淳一郎、MD シミュレーションとアクセラレータ・専用計算機 2011/1/18 機構連携研究会 名古屋

(4)Makino, J., Accelerated Computing Cluster 2011, Sept 26-29 2011, Austin, TX, USA

(5)Makino, J. The performance of GRAPE-DR for dense matrix operations, ICCS2011, 1-3 June 2011, Singapore

(6)Makino, J. GRAPE and GRAPE-DR, MODEST-10 30 Aug-3 Sep 2010, Beijing, China

(7)Makino, J. GRAPE and GRAPE-DR GPU

Solutions to Multiscale Problems, Science and Engineering Workshop ,27-29 Jul 2010, Harbin, China

(8)Makino, J. GRAPE-accelerators, IAU 270 Computational Star Formation ,3 Jun 2010, Barcelona, Spain

(9)Makino,J.,GRAPE-DR and Next - Generation GRAPE Accelerator-based Computing and Manycore, Manycore and Accelerator-based Computing for Physics and Astronomy Applications, 2 Dec 2009, Menlo Park, CA, USA

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

牧野 淳一郎 ( MAKINO JUNICHIRO )  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号 : 50229340

### (2)研究分担者

船渡 陽子 ( FUNATO YOKO )  
東京大学・総合文化研究科・助教  
研究者番号 : 80292720

中里 直人 ( NAKASATO NAOHITO )  
会津大学・コンピュータ理工学部・准教授  
研究者番号 : 00392051

( 以下の 2 名は H21 年度のみ )

和田 桂一 ( WADA KEIICHI )  
国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・准教授 ( 当時 )  
研究者番号 : 30261358

吉田 直紀 ( YOSHIDA NAOKI )  
東京大学・数物連携宇宙機構・特任准教授  
研究者番号 : 90377961