

“FIRST”- 第一世代天体の起源解明のための 専用・汎用計算機融合型クラスタ

朴 泰祐^{†1} 梅村 雅之^{†2} 佐藤 三久^{†1}
高橋 大介^{†1} 中本 泰史^{†2}
須佐 元^{†3} 森 正夫^{†4}

宇宙の黎明期、特にビッグバン後 50 万年から 1 億年の間、第一世代の天体がどのようにして形成され、発展してきたかという問題は、宇宙物理学の基本的問題である。これらの天体形成の解析には、単純な重力多体問題だけでなく、流体力学・化学反応等の複合要素を総合的に扱う膨大な計算量の計算機シミュレーションが必要である。

我々は、汎用高性能クラスタの各演算ノードに、重力計算専用ボードとして新たに開発した BladeGRAPE を実装した、ハイブリッド型クラスタ FIRST を開発中で、2005 年 4 月現在、全システムの 1/16 である 16 ノードシステムが完成・稼動している。最終的なシステム構成は 256 ノードとなり、総演算性能 36.8 Tflops (専用計算機部 33.3 Tflops、汎用計算機部 3.5 Tflops) として 2006 年中に稼動開始する予定である。

“FIRST” - a hybrid cluster system for the elucidation on the origin of FIRST generation objects in the universe

TAISUKE BOKU,^{†1} MASAYUKI UMEMURA,^{†2} MITSUHISA SATO,^{†1}
DAISUKE TAKAHASHI,^{†1} TAISHI NAKAMOTO,^{†2} HAJIME SUSAI^{†3}
and MASAO MORI^{†4}

It is one of the essential problem on astrophysics to analyze how the first generation objects created from 5×10^5 to 1×10^8 years after the big-bang. To solve this problem, it is necessary to perform precise computer simulation including various effect such as fluid dynamics and chemical reaction as well as gravity reaction.

We have been developing a special purpose PC cluster named FIRST of which computation nodes are equipped with a dedicated gravity engine BladeGRAPE. At the present time, 1/16 of the full system with 16 nodes is completed and running. The full system will be installed in year 2006 with 256 nodes providing 36.8 Tflops of total performance with 33.3 Tflops by the special purpose part and 3.5 Tflops by the general purpose part.

1. はじめに

ビッグバン以降、第一世代の天体がどのようにして

形成されたかは宇宙物理学における重要な基礎問題の一つである。各種観測及び理論計算により、ビッグバン直後から 50 万年経過した時点までの宇宙の様子は宇宙背景放射から理論的に推察され、一方ビッグバン後 1 億年以降については観測等により天体形成の様子が有る程度明らかになっている。しかし、それらの間の時点において、どのように第一世代の天体が形成されたかという途中経過については未だに解明されておらず、「宇宙暗黒時代」と呼ばれるミッシングリンクとなっている。今日、様々なスケールでの計算宇宙物理問題が高性能計算機によってシミュレーションされているが¹⁾、宇宙暗黒時代に関しては、光と物質の相互作用に自己重力が作用するという極めて複雑な状況に対する精細なシミュレーションが必要であり、そのモデルの複雑さと計算量の膨大さから現実的な時間で

^{†1} 筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻

Department of Computer Science, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

^{†2} 筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻

Department of Physics, Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba

^{†3} 立教大学理学部物理学科

Department of Physics, College of Science, Rikkyo University

^{†4} 専修大学自然科学研究所

Institute of Natural Sciences, Senshu University

の計算が不可能であった。

筑波大学計算科学研究センターでは、以前より multi-scale、multi-physics 問題を現実的な時間で処理するための融合型並列計算機 HMCS (Heterogeneous Multi-Computer System)²⁾ の開発を行ってきた。今回、第一世代天体のシミュレーションを行うに当たり、従来の HMCS 以上に密接な汎用計算機・専用計算機の結合が必要となり、新たな HMCS の形態として HMCS-E (Embedded-type HMCS) を実装するに至った。

HMCS-E のコンセプトに基づき、高密度実装された専用計算機ボードを汎用高性能クラスタに組み込み、汎用・専用計算機間の通信バンド幅問題を解消すると共に、両者を融合するアルゴリズムを並列処理プログラムに組み入れて複雑なシミュレーションを高速に行う環境を実現する。本研究プロジェクトは FIRST と名づけられ、そのインフラストラクチャとして高性能 PC クラスタの各ノードに、新規開発した重力専用加速エンジン BladeGRAPE を組み込んだ、FIRST cluster を実装中である。本稿では HMCS-E の概念、BladeGRAPE 及び FIRST cluster の現状と予備性能評価について述べる。

2. HMCS-E

異なるスケール・異なる相互作用に基づく計算機シミュレーションは、先端的計算科学においてその重要性が高まっている³⁾。連続系計算と粒子系計算の連成計算等では、それぞれの系における処理を高速化することが必要であり、従来のベクトル、クラスタ、専用機といった画一的なプラットフォームだけではこれを賅うことが困難である。

HMCS はこのような問題に対する一つの解として、連続系計算を汎用超並列計算機で、粒子系計算を専用超並列計算機で行い、両者を高バンド幅ネットワークによって相互結合し、計算途中で互いのデータを交換しつつシミュレーションを進めるというシステム概念である。我々は、このシステムのプロトタイプとして、PC クラスタと重力専用計算機 GRAPE-6¹⁾ を結合したシステムを開発した。図 1 に HMCS の概念図を示す。システムは大きく分けて、左側の汎用計算機部を構成するクラスタ、中央の Ethernet スイッチ、右側の GRAPE-6 ボード群及びそれを管理する小型 PC クラスタからなる。汎用計算機部は HMCS において連続系シミュレーション (continuum simulation) を司り、専用計算機部、すなわち GRAPE-6 クラスタは重力計算 (gravity calculation) を受け持つ。現在、32 ノード (64 CPU、ピーク性能 180 GFLOPS) の PC クラスタを汎用計算機部として、この上で SPH⁴⁾ (Smoothed Particle Hydrodynamics) と呼ばれる流体計算と光の相互作用 (輻射)、さらに化学反応の計算を行い、各粒子間の重力相互作用を GRAPE-6 (256

chip、ピーク性能 8 Tflops) で処理するシステムが稼動中である。

汎用計算機部のクラスタのうち数台は、全ノードを代表して GRAPE-6 クラスタとの通信を行う、Agent と呼ばれる働きを持つ。この実装では、汎用計算機部に超並列計算機を接続できるよう、汎用計算機部と専用計算機部の結合は複数の Fast Ethernet リンクをトランク結合して高いバンド幅を得ている。プログラム実行中、シミュレーションの各タイムステップにおいて、汎用計算機部から粒子の全データが専用計算機部に送られ、GRAPE-6 における重力加速度の計算結果が送り返される。

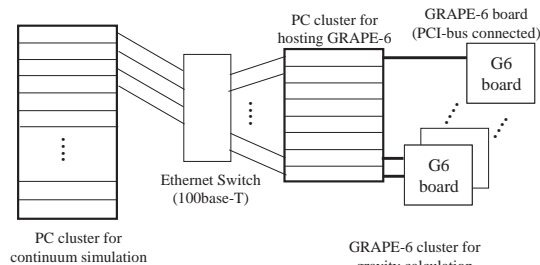


図 1 従来の HMCS の構成

これまでの HMCS では数十万粒子を対象とした流体・輻射・重力の相互作用を計算することにより、宇宙初期の天体形成の様子を解明してきた⁵⁾。しかし、FIRST プロジェクトの目的である第一世代天体のシミュレーションを行うには、数百万から 1 千万程度の粒子を扱う必要があり、さらにより複雑なアルゴリズムを導入する必要が生じる。このため、汎用計算機部に数 Tflops、専用計算機部に数十 Tflops 規模の計算リソースを割り当てる必要があるが、現行の HMCS ではこの点について以下のような問題がある。

- 汎用計算機部と専用計算機部間の通信能力：両者間を各タイムステップ毎に流れる粒子・加速度データは数百 MB になり、かつ汎用計算機部ではそれらは一般的に並列化されているため、その集約のためのコストがかかる。結果的に、両システム間の通信時間は無視できない。
- GRAPE に対するデータ通信能力：GRAPE-6 はスタンドアロン型計算機ではなく、そのホスト計算機となる PC サーバに PCI 等の標準インターフェースを介して接続される、一種の入出力装置である。数十 Tflops の性能を持つ GRAPE-6 システムは数百モジュールからなり、これらを少数のホスト計算機で制御すると、大量の粒子データを転送する時間が無視できない。

これらの問題を解決するには、両通信を空間的に分散させ、システム全体を並列アルゴリズムの下で効率的に運用させる仕組みが必要である。そこで、我々

は GRAPE-6 を中心とする HMCS の発展形として、HMCS-E (Embedded-type HMCS) を提案する。

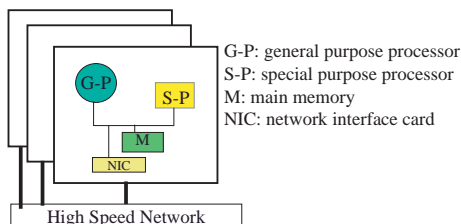


図 2 HMCS-E の概念図

HMCS-E の概念図を図 2 に示す。基本は大規模 PC クラスタであり、各計算ノードに比較的小規模の GRAPE-6 システム (例えば 1 モジュール単位) を搭載する。汎用計算部はアルゴリズムに応じて隣接あるいはブロードキャスト/リダクション等の通信を用いて全ノードで並列処理し、全粒子間の重力計算が必要になった段階で、全対全通信によって粒子データを共有し、各ノードの分担粒子の重力加速度計算を独立に行う。これらの計算過程では、クラスタの持つノード間通信性能を最大限に活かし、Agent による性能ボトルネックを排除した高速な複合系計算が可能になる。

3. BladeGRAPE

計算宇宙物理学における複合系計算を行うための HMCS-E の実装において、特に重力計算を司る専用計算機として、GRAPE-6¹⁾ は現状で最も理想的なハードウェアである。GRAPE-6 の基本になっているのは図 3 に示す GRAPE-6 モジュールである。モジュールは小さな基板で、その上に 4 つの GRAPE-6 チップを搭載している。



図 3 GRAPE-6 モジュール

重力計算においては、粒子数 N に対し、全体で $O(N^2)$ の総当り演算を行うが、GRAPE-6 では全粒子データを全チップにブロードキャストし、個々の GRAPE-6 チップに結合された SRAM メモリに格納する (これを j 粒子と呼ぶ)。その後、改めて全粒子データを分割して GRAPE-6 チップに与える (これを i 粒子と呼ぶ)。各チップ内では与えられた i 粒子と、メモリ上の全 j 粒子間の力の計算を、パイプ

ライン演算装置によって行う。この作業を全 i 粒子の処理が終わるまで繰り返す。モジュール内では 4 つの GRAPE-6 チップに対するこれらの処理を効率的に行えるよう設計されている。

GRAPE-6 はこのモジュールをどのような単位で実装するかに応じて以下の 2 つのタイプに分かれる。

- マザーボードタイプ: ラックマウント型の実装を行えるよう、最大 8 つのモジュール (合計 32 チップ) をドータボードの形で、1 つのマザーボード上に実装したもの。ホスト計算機 (PC) と PCI バスによって結合できるよう、PCI 接続用インタフェースボードとマザーボードの間を特殊ケーブルで接続している。マザーボード全体で 1 Tflops のピーク性能を持つ。
- GRAPE-6A: 通常の PC の PCI バススロットに挿せるよう、1 つの GRAPE-6 モジュールを標準 PCI ボード上にマウントし、ヒートシンクとファンを装着したもの。PCI ボード 1 枚で 130 Gflops のピーク性能を持つ。

これまでの HMCS ではマザーボードタイプを使用してきた。これは、汎用計算機部と専用計算機部がそれぞれ、大きな粒度で処理を行う 2 つのシステムとして捉えられ、GRAPE-6 クラスタに集約された全粒子を一気に処理するため、少数のノードを持つ PC クラスタで GRAPE-6 をホスティングできるようにするためである。

しかしながら、前節に述べた HMCS-E の実装のためには、各 PC ノードに GRAPE-6A のような比較的小規模なモジュールを載せ、クラスタを構成する全ノードで大きな計算能力を提供するのが望ましい。またその際、各 PC ノードをコンパクトにするため、GRAPE-6 PCI ボードもできるだけ小型化されるのがよい。しかし、GRAPE-6A の 1 ボードはピーク時で約 50W の消費電力を要し、これを冷却するために、モジュールに接合された汎用 CPU 用のヒートシンクとファンが必要であった。従って、通常の ATX ボックスに収められる標準的な IA32 用マザーボードの場合、実際上は GRAPE-6A ボードを 1 枚搭載するのが限界であった。

FIRST プロジェクトでは、各ノードに GRAPE-6 モジュールを搭載した、数百ノード規模のクラスタの構築を目指している。従来の GRAPE-6A ボードを搭載した ATX ボックス型の PC ではシステムの実装密度が低い。そこで、19 inch ラックマウント型の厚さ 2U の PC サーバノード上にこれを実装できるよう、新たな PCI ボードを設計・実装した。このボードはその形状から “BladeGRAPE” と名づけられた。

東京大学で開発されたボードは GRAPE-6A と呼ばれており、これが商用化されたものは MicroGRAPE と名付けられている⁶⁾。本稿ではこれらを統一して GRAPE-6A と呼ぶことにする。

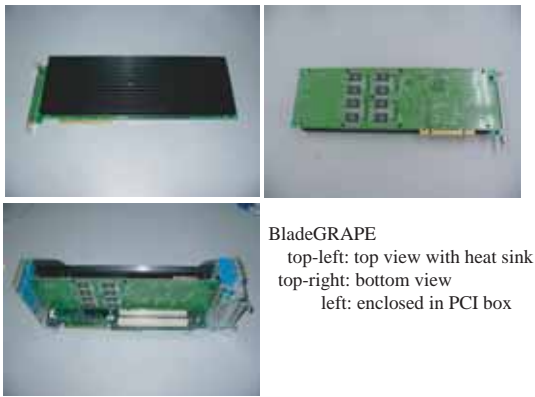


図 4 BladeGRAPE ボード

図 4 に BladeGRAPE の概観写真を示す。BladeGRAPE は従来の GRAPE-6A と基本回路は同等であるが、以下の改良を行っている。

薄型 PCI ボードの実現： GRAPE-6A では、PCI インタフェースを持つ基本ボード上に従来の GRAPE-6 モジュールをドータボードとしてコネクタ実装している。BladeGRAPE では、ラックマウントサーバへの組み込みのため極力薄いボードを作成する必要があるため、モジュール構造をやめ、1 枚の PCI ボード上に 4 つの GRAPE-6 チップを直接装着する形で実装し、全体の厚さを薄くした。

ファンレス実装： GRAPE-6A では Pentium クラスの CPU 用のヒートシンクと冷却ファンを利用する必要があった。BladeGRAPE はラックマウントサーバへの組み込みのため冷却ファンを除去する代わりに、基板全体を細長くレイアウトしこの上を完全にカバーする大きなヒートシンクを装着した。

安定動作のための基板の層数増強： GRAPE-6A の PCI 基板は 6 層であったが、モジュール構成をやめた新基板の設計段階で、安定性を高めるために 10 層構成を取った。

GRAPE-6 チップ用メモリ容量増強： GRAPE-6A のモジュールにはチップ当り 8MB のメモリが搭載されていたが、BladeGRAPE ではより大規模な問題に対応できるよう、メモリ容量を倍増して 16MB とした。これは 26 万粒子を一度に処理できる量である。

図 4 の下の写真は、2U ラックマウントサーバの PCI ボックスに収まった BladeGRAPE である。この PCI ボックスにはフルサイズの PCI カード 3 枚が入るようなスペースとスロット構成になっているが、実際には BladeGRAPE が 2 スロット分のスペースを占めている。残り 1 スロット（写真の一番手前のスロット）

MicroGRAPE として商用化されているバージョンでは安定性向上のため PCI 基板は 8 層構成になっている。

には quad-port Gigabit Ethernet カードが装着される（後述）。

BladeGRAPE のヒートシンクは冷却ファンをなくすために非常に大きなものとなっており、基板も全体で 2 スロット分の厚さとなつてはいるが、ラックマウントサーバに組み込むには厚さを絶対に抑える必要があり、このような設計となった。理想的には 1U サイズのサーバに組み込みたいが、50W の消費電力を持つ PCI ボードの装着は最低でも 2U サイズでないと不可能である。ヒートシンクの冷却能力に対する実験として、数種類の市販の 2U ラックマウントサーバに装着して密閉状態でのテストランを行ったが、いずれの場合も、サーバが PCI スロットの周辺装置冷却用に提供する内蔵ファンによる空冷で十分安定動作することが確認された。

4. FIRST cluster

我々は、HMCS-E コンセプトに基づき、BladeGRAPE を搭載した高性能 PC サーバを用いた大規模クラスタの構築を進めている。このクラスタはプロジェクトの目的にちなみ、“FIRST cluster”と名づけられている。

4.1 システムの規模とバランス

FIRST cluster の設計に際し、システム規模を以下のように見積もった。表 1 は粒子法による大規模輻射流体計算における演算時間の見積もりである。“PC”は PC 側での処理、“GRAPE”は BladeGRAPE 側での処理を表す。

表 1 粒子法に基づく 1 千万 (10^7) 粒子の 1 万ステップシミュレーションの見積もり

輻射流体計算 (PC)	$83[\text{Tflops}] \times [\text{hr}] (N/10^7) (N_{\text{step}}/10^4)$
重力計算 (GRAPE)	$910[\text{Tflops}] \times [\text{hr}] (N/10^7) (N_{\text{step}}/10^4)$

N : 粒子数

N_{step} : シミュレーションステップ数

この見積もりに従うと、CPU 側処理と BladeGRAPE 側処理の重さが約 1:10 の比率であることがわかる。従って、単体ノードの CPU 性能と BladeGRAPE 性能はこの比率を保つことが理想となる。現在のラックマウント型の高性能 PC サーバは、周波数 3GHz 程度の Pentium Xeon クラスの CPU を 2 台、SMP 結合するのが標準となっている。例えば SSE3 命令を備えた 3GHz の Xeon を 2 台搭載した場合のピーク性能は 12 Gflops となる。一方、BladeGRAPE ボード 1 枚の重力計算ピーク性能は 130 Gflops であり、これらの組合せは上記比率をほぼ満たしている。

一方、ノード数に関しては予算と実装可能システム規模の点で、256 ノードが実現可能という見通しを立

ている。ノード当り 12 Tflops で計算すると、輻射流体計算部分は約 28 時間を要することになり、上述のように重力計算部分の時間はこれにほぼ釣り合っているため、ほぼ 1 日強で 1 種類のパラメータに基づくシミュレーションが終わることになる。この見積もりと、現在想定されているシミュレーションケースの総数から類推し、粒子法によるシミュレーションに基づく第一世代天体のシミュレーションはおよそ数ヶ月から半年程度で完了できると予想される。

4.2 ネットワーク構成

FIRST cluster は BladeGRAPE を搭載している以外は標準的な PC クラスタであるが、数百ノードを有する高性能・大規模クラスタである。従って、ノード間結合ネットワークの構成は並列処理効率を高めるために非常に重要である。高性能クラスタ向けのネットワーク候補としては、大きく分けると Infiniband や Myrinet に代表される SAN (System Area Network) と、Gigabit Ethernet (以下、GbE と省略) のようなコモディティネットワークがある。

前者はノード当り数百 MB/s ~ 1GB/s 当りの通信性能を実現できるためその性能は非常に高いが、数百ノード規模になると NIC だけでなく結合スイッチのコストが非常に高価になる。一方、GbE は NIC 及びスイッチが非常に安価で、特に近年では Layer2 スイッチのポート単価が極めて安くなっている。しかしながら、GbE リンク 1 本当りのバンド幅はピーク性能で 125MB/s であり、SAN に比べると低い。

現在、筑波大学計算科学研究センターでは FIRST cluster の他に、広範な科学技術計算向けの超並列クラスタとして PACS-CS⁷⁾ を構築中である。このシステムでは、トランクされた GbE リンクをさらに多次元展開し、ハイパクロスバ網⁸⁾として実現することにより、極めて高いノード当りバンド幅を低価格で実現する特殊 GbE ドライバである PM-Ethernet/HXB を開発している⁹⁾。このネットワークは、特に近接通信とブロードキャスト/リダクションの組合せで並列化される実空間モデルの大規模シミュレーションに適しており、FIRST cluster で想定している並列アルゴリズムもその範疇に入る。そこで、FIRST cluster でもこのネットワークを採用する。

PM-Ethernet/HXB では、1 次元方向当りのトランクされる GbE ネットワークインタフェース (NIC) 数を t 、次元数を d とすると、 $t \times d$ 個の NIC が各ノードに必要となる。256 ノードの FIRST cluster では 2 次元構成を採用する。現在、16 ~ 24 ポート程度の Layer2 GbE スイッチは非常に対価格性能比が良くなっているため、 16×16 の 2 次元構成で 256 ノードのネットワークを構築するのが合理的である。トランク数 $t = 2$ とすることにより、ノード当り 4 個の GbE NIC が必要となる。図 5 にこの様子を示す。2 本の GbE トランクにより、次元方向当りの単方向バ

ンド幅はピークで片方向当り 250MB/s となる。また、PM-Ethernet/HXB では多次元方向への同時転送をサポートしているため、隣接転送アルゴリズムや木構造ネットワークを用いたブロードキャストでは、この機能を利用することにより最大で片方向当り 500MB/s の通信性能を実現できる。

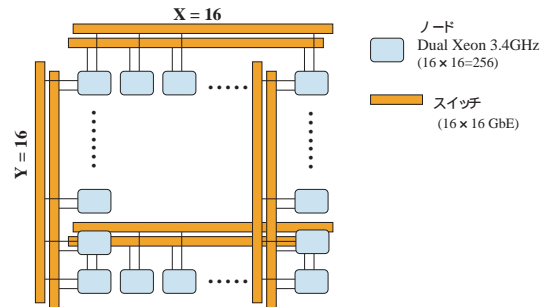


図 5 2次元ハイパクロスバ網によるノード間ネットワーク

FIRST cluster の各ノードは、このネットワークを実現するために 4 ポートの NIC (quad-port NIC) を 133MHz/64bit の PCI-X バスに装着している。この PCI-X の理論ピーク性能は 1GB/s であり、 $t = 2, d = 2$ の PM-Ethernet/HXB の双方向データ転送時の要求ピークバンド幅と一致する。PCI-X バスのバンド幅に余裕がないが、実際の FIRST cluster におけるアプリケーションでは輻射流体計算が非常に重いため、極めて粒度の粗い並列処理を行うことになる。さらに、GbE をベースにしているため、SAN に比べレイテンシが多少大きくなるが、対象とする粒子数は 1 千万規模であり、重力計算における粒子データの交換も同様に粗粒度通信となるため、レイテンシの影響は小さいと考えている。

4.3 FIRST cluster の諸元

FIRST cluster のシステム諸元を表 2 に示す。

表 2 FIRST cluster の諸元

項目	第一期構成	フル構成
ノード数	16	256
CPU 数	32	512
ノード PC	HP DL380G4	—
CPU	3.4GHz Xeon EM64T (dual)	—
BladeGRAPE 数	16	256
汎用計算機部性能	218 Gflops	3.5 Tflops
専用計算機部性能	2.08 Tflops	33.3 Tflops
総メモリ容量	32GB	512GB
管理用 NIC (GbE × 2)	Broadcom NC7782	—
データ通信用 NIC (GbE × 4)	Intel PRO/1000 QuadPort	—
データ通信ネットワークパイセクションバンド幅	4GB/s	64TB/s

現在、FIRST プロジェクトは3ヵ年計画の第一年度を終え、FIRST cluster の第一期分として全 256 ノード中の 16 ノードのインストールが完了している。ただし、ノード間ネットワークに関しては現段階では PM-Ethernet/HXB によるトランク・多次元化はされておらず、単一の GbE のみで構成されている。これは 2005 年中に上記仕様通りにアップグレードされる予定である。

4.4 重力計算性能評価

FIRST cluster は第一期のインストールが完了してまだ間もなく、複合系の並列プログラムもまだ完成していない。加えて、ノード間ネットワークは単純なスイッチ結合による 1 リンクの GbE である。アプリケーションの開発、2 次元 HXB ネットワークの構築と評価は今後の課題である。

しかしながら、16 ノードのクラスタと BladeGRAPE が正常かつ安定に動作することを検証する必要がある。その一環として、16 ノードを用いた並列処理による重力計算のみを行うベンチマークプログラム (BladeGRAPE により重力加速度を計算し、オイラー法による時間積分を実行) を開発した。粒子数 (N) が 26 万 ~ 104 万の場合の計測結果を図 6 に示す。

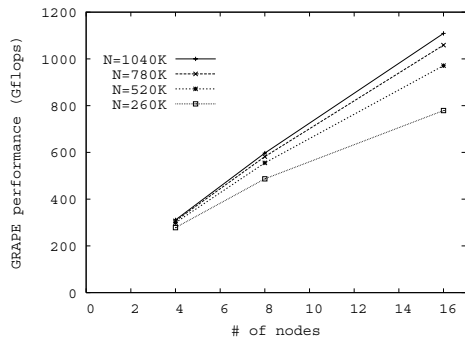


図 6 BladeGRAPE 部の並列重力計算性能

この結果より、現在のシステムでは 16 ノードでの重力計算性能が 1.1 Tflops 強であることがわかる。これは理論ピーク性能の約 53% の値である。主な原因としては、ネットワーク性能が弱く、また重力計算のための粒子データの総交換アルゴリズムが単純な「バケツリレー式」であり、チューニングが不足していることが考えられる。今後、ハードウェア/ソフトウェアを充実させ、複合系計算を実際に行ってフルシステムでの稼働の準備を進める必要がある。

5. おわりに

FIRST cluster は新規開発された重力専用計算ボード BladeGRAPE を搭載した高性能 PC をノードとする、宇宙第一世代天体のシミュレーションと解析を行

うことを目的とした大規模クラスタである。システムは HMCS-E コンセプトに基づいて構築され、高性能ノードに加え、Gigabit Ethernet のトランク結合と多次元化に基づく 2 次元ハイパクロスバ網によって高バンド幅ネットワークが提供される。

今後の計画として、2005 年度末までに 128 ノードのシステムと PM-Ethernet/HXB による 2 次元ハイパクロスバ網を持つ中間システムが構築され、それに続き 2006 年中ごろには 256 ノードのフルシステムが完成・稼働開始する予定である。

謝辞 本研究を進めるに当り、BladeGRAPE 実装に協力して頂いた浜松メトリクス株式会社、FIRST クラスタ 1 号機の構築に協力して頂いた日本ヒューレット・パカード株式会社、住商エレクトロニクス株式会社、ビジネスサーチテクノロジー株式会社の各社に感謝する。また、GRAPE 関連の貴重な助言を頂いた東京大学の牧野淳一郎博士並びに福重俊幸博士に謝意を表す。

本研究の一部は科学研究費補特別推進研究「融合型並列計算機による宇宙第一世代天体の起源の解明 (課題番号 16002003)」による。

参 考 文 献

- 1) J. Makino, et al., "A 1.349 Tflops simulation of black hole in a galactic center on GRAPE-6", in Proc. of SC2000 (CD-ROM), IEEE, Los Alamitos, 2000.
- 2) 朴 泰祐 他, "Heterogeneous Multi-Computer System における重力効果を含む宇宙輻射流体計算", 情報処理学会論文誌ハイパフォーマンスコンピューティングシステム, Vol.43, No. SIG 6 (HPS 5), 2002.
- 3) JST CREST プロジェクト, "粒子法によるマルチフィジクスシミュレータ", http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/report/heisei15/pdf/pdf05/05_1/001.pdf
- 4) M. Umemura, "Three-dimensional hydrodynamical calculations on the fragmentation of pancakes and Galaxy formation", The Astrophysical Journal, 406, 1993.
- 5) T. Boku, et al., "Formation of dwarf galaxies in reionized universe with heterogeneous multi-computer system", Proc. ICCS2004, 2004.
- 6) http://www.metrix.co.jp/micro_grape.html
- 7) 朴 泰祐 他, "計算科学のための超並列クラスタ PACS-CS の概要", 情処研報 2005-HPC-103 (SWoPP 武雄 2005), 2005.
- 8) T. Boku, et al., "CP-PACS: A massively parallel processor for large scale scientific calculations", Proc. ICS'97, 1997.
- 9) 住元 真司 他, "PACS-CS のための Ethernet を用いた高性能通信機構の設計", 情処研報 2005-HPC-103 (SWoPP 武雄 2005), 2005.