次世代超並列計算機開発
—多粒子系向け超並列計算機の開発

Next-Generation Massively Parallel Computers
— Massively Parallel Computer for Particle-based Simulations

牧野淳一郎（東京大学大学院総合文化研究科）

1　研究組織

サブリーダー	牧野淳一郎	東京大学大学院総合文化研究科助教授
		重力 / クーロン力専用計算機開発
	蜂巣泉	東京大学大学院総合文化研究科助教授
		応用ソフトウェア開発
	泰地真弘人	統計数理研究所助教授
		プロセッサチップ論理設計
	船渡陽子	東京大学大学院総合文化研究科助手
		応用ソフトウェア開発
	福重俊幸	東京大学大学院総合文化研究科助手
		重力 / クーロン力専用計算機開発、FPGA システム開発
	高橋広治	日本学術振興会研究員 (ポストドクター)
		応用ソフトウェア開発

2　研究の目的

この研究の目的は、粒子系に特化した次世代超並列計算機を開発し、汎用計算機では不可能な規模のシミュレーションを可能にするとともに、その応用範囲をさらに拡大することである。多粒子系の場合は、粒子間相互の計算に専用化したプロセッサを作ることでコスト・パフォーマンスを大幅に向上させることができることがわかっている。我々が 1995 年に完成させた GRAPE-4 [TMF+96], [MTES97] は、世界で初めてテラフロップスの速度を達成した計算機となった。

本研究では、GRAPE-4 の性能を 100 倍以上向上させたサブペタフロップスの計算速度をもつ専用計算機を実現する。さらにその専用計算機と、汎用の超並列計算機、さらにこの二つの中間に位置する FPGA を用いた再構成可能論理を使った多目的計算機を組み合わせてヘテロジニアス・マルチコンピュータを構築する。このシステム全体を GRAPE-6 と呼ぶ。

以下に、汎用の高速計算機に比べた GRAPE-6 システムの位置づけと、高速が実現できる理由を簡単にまとめる。図 1 に、過去 20 年間の計算機の速度の進歩を示す。ベクトル並列型の速度は 90 年代に入って頭うちになっていること、その後の並列計算機の速度の

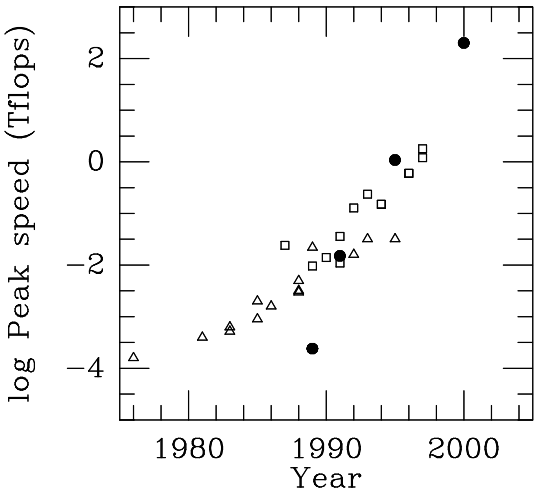

図 1: 計算機のピーク速度の進化。三角はベクトル / ベクトル並列型、四角は超並列、黒丸は GRAPE である。2000 年の GRAPE の点は GRAPE-6 の目標性能である。

進歩はおおむね一定速度 (10 年で 100 倍) で進んできていることが見てとれる。GRAPE の速度の進歩はそれよりもかなり早い。

GRAPE の性能の急速な向上には、もちろん投入予算の増大もある程度の寄与がある。しかし、それよりも相対的な価格性能比の向上が果たした役割が大きい。具体的には、GRAPE-6 の予算は GRAPE-4 の 2 倍強 (5 億程度) である。これに対し、2000 年頃の最高速の汎用超並列計算機はいわゆる ASCI プロジェクト、あるいは地球シミュレータにより実現されるであろう。いずれも速度は 3–10 Tflops 程度、コストは 100 億円以上と見込まれる。すなわち、価格性能比で GRAPE-6 は汎用並列計算機の 400 ないし 1000 倍以上よいことになる。GRAPE-4 ではこの比は 100 ないし 200 程度であったので、 GRAPE-6 ではいっそう改善していることがわかる。

差が広がっていく本質的な理由は、汎用計算機では使っている半導体の面積のうち有効な計算に使える割合が次第に減少していくからである。この状況は図 2 に示されている。図 2 は高性能マイクロプロセッサの、サイクルタイム当たり実行可能な浮動小数点演算の数を示している。これを見ると、70 年代から 80 年代中頃にかけてまでの進歩は非常に速い。しかし、80 年代後半に演算数が 1 を超えたころから、進歩が非常に遅くなっていることがわかる。トランジスタの数では 10 年間にほぼ 100 倍の進歩が実現しているのに、演算器の数は数倍にしかなっていないのである。

トランジスタの数は 100 倍になっているのに、演算器の数が数倍にしかならない理由は 2 つある。一つは、それだけの数の演算器を有効に使うことが難しいということである。現在のマイクロプロセッサで主流であるスーパースカラーのアプローチでは、既存のプログラムを使う限り、数個以上の演算器を有効に使うことは困難であることがわかっている。

もちろん、並列度の高いアプリケーションでは、上の制限は問題にならない。しかし、

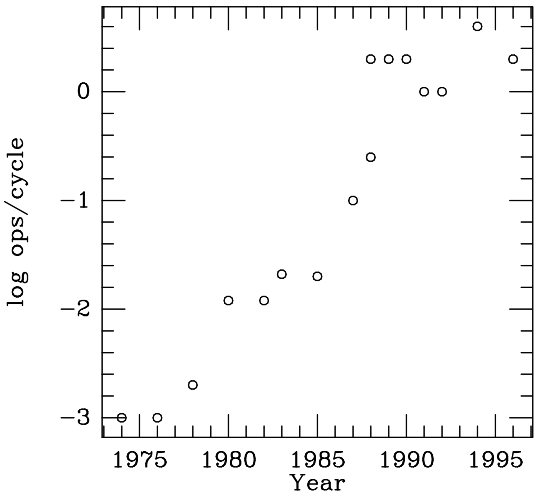

図 2: 代表的な高性能マイクロプロセッサの、サイクルタイム当たり実行可能な浮動小数点演算の数

この場合には、実際の演算速度の上限はプロセッサとメモリの間の転送バンド幅で決まってしまう [McC95]。 プロセッサとメモリの間の転送速度を上げるのは、プロセッサ内部の演算速度を上げたり演算器の数を増やしたりするのに比べてはるかに困難である。というのは、半導体プロセスを微細化するようにはチップ間配線は微細化できないし、また、転送周波数を上げることも物理的サイズが大きいために難しいからである。その結果、メモリとプロセッサ間のデータ転送速度は、過去 20 年の間にゆっくりとしか進歩してこなかった。このために、演算器を増やすことに意味がなくなっているのである。

これに対する究極的な解決の方法は、例えば [PAC+97] とそこで引用されているいくつかの論文で提案されている、いわゆる Processor in Memory (PIM) のアプローチであろう。これは要するにメモリとプロセッサを物理的に 1 チップに集積するもので、それによって高いバンド幅を得ようというものである。しかし、この方法では、プロセッサ間の転送バンド幅は非常に限られ、高い性能が得られるアプリケーションは現在の超並列計算機以上に制限されることになろう。実際、例えば GRAPE-6 が有効に使えるような多粒子系の問題でも、PIM を有効に使うためにはプロセッサ間通信が非現実的な程度に速いか、あるいは特殊なトポロジーを持つ必要がある。

これに対し、 GRAPE ではメモリとプロセッサ間の転送速度を押えたままで、プロセッサチップ内のほとんどのトランジスタを有効に演算に使うことができる。これは、根本的には、対象とする物理系の性質、すなわち多数の粒子が長距離相互作用によって影響しあい、しかも高精度の計算が必要であるということによるものである。このために、データ量は粒子数に比例するのに対し、演算量は粒子数の自乗に比例する。この性質をうまく生かしたアーキテクチャを構成することで、汎用計算機に比べて進歩を速くできるのである。いいかえれば、専用計算機の相対的な優位性は、これから大きくなりこそすれ小さくなることはない。

すなわち、今後の計算科学研究の進展に対して、専用計算機のアプローチが果たす役割はますます大きくなるものと考えられる。これは、汎用計算機に比べた相対的な利益が大きくなっていくからである。このことを実証し、専用計算機の開発の一つのモデルを提供することが、本研究の目標の一つである。

もう一つの目標は、FPGA を使った粒子系向け多用途計算機の構築である。FPGA とは、内部回路を書き換え可能な LSI であると思ってよい。通常のカスタム LSI に比べると集積度で 1/100、速度でもかなりのペナルティがあるが、そのかわりに開発の初期コストがかからない、また、間違えても修正可能であるといった、少数生産に向いた特長を持つ。このため、粒子系計算でも重力 / クーロン力計算ほどコストがかからない、そのかわり演算自体は複雑で多様性がある相互作用に使うのに適していると考えられる。

自己重力系、プラズマ物理、分子動力学シミュレーションなどでは、ミクロレベルで粒子として表現されている、あるいは遠隔相互作用が卓越するといった理由で従来から粒子モデルが主に用いられてきた。これに対し、連続体を扱う構造計算や流体計算では、従来は、構造格子による差分法、あるいは非構造格子による有限要素法が主な解析手段であった。しかしながら、これらの分野においても、近年粒子的アプローチを使った計算法 (メッシュレス法、エレメント ・フリー法など様々な名称がある) が注目されている。これは、複雑な境界条件 (移動、変形するものを含む) の実現が容易であること、並列化もそれほど複雑ではないことによるもののようである。

そのような利点があるものの、格子を使った方法に比べて粒子法では本質的に計算量が多くなる。この計算量の増大に対して、FPGA を使った粒子系向け多用途計算機は極めて有効な解決策になると期待できる。

FPGA を計算に使う試みは [BA96] を代表として非常に多数あるが、現在までのところ、非常に限られた応用、例えば DNA のシーケンスマッチングなどを除いてはさほどの成果を上げていない。これは、基本的にはこれまでは FPGA の集積度が小さかったことにもよる。もちろん、FPGA の集積度が上がると同時に通常のマイクロプロセッサの集積度も上がるが、すでに述べたようにマイクロプロセッサの性能は集積度に比例しては上がらない。このために、当面は FPGA が相対的に有利になっていくのである。

現在の FPGA でも、まだ通常の浮動小数点演算を行なうのは困難である。しかし、多くのアプリケーションで、すべての演算に高い精度が必要なわけではない。実際、 GRAPE の場合には、演算パイプラインの中で必要に応じて演算精度を変化させることで回路規模を大幅に小さくすることができている [IMES90], [MIE90]。 従って、同様な最適化を行なうことが可能なアプリケーションにおいては FPGA が汎用計算機に比べて有利になってきていると考えられる。このことを実証することが、本研究の第二の目標である。

3 研究計画の概要

研究の前半において、重力 ・クーロン相互作用に専用化した、ピーク性能 200 テラフロップス程度の専用プロセッサを開発するとともに、粒子系に専用化したアーキテクチャを

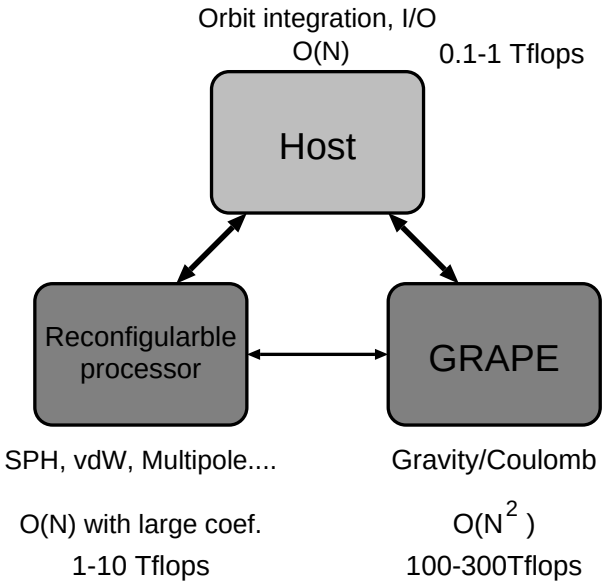

図 3: システム全体の構成

持つが相互作用を計算するパイプラインを再構成可能論理 (FPGA、Field Programmable Gate Array) で実現した多用途粒子系プロセッサを開発する。このプロセッサの性能は、応用にもよるがテラフロップス程度となろう (図 3)。後半においては、これらと汎用の並列計算機を組み合わせたヘテロジニアス ・マルチコンピュータを実現し、天体シミュレーション、分子動力学計算、粒子的アプローチでの流体計算などに応用する。問題に専用化したプロセッサは特定の問題については汎用計算機に比べて 2-3 桁高い絶対性能を実現できる。FPGA を使ったプロセッサは、集積度において専用プロセッサに劣るが、そのかわり多様な問題に適用可能である。我々のアプローチは、FPGA を高度に専用化したプロセッサと組合せることで、双方の長所をいかす、つまり、FPGA の ある程度の汎用性と専用プロセッサの高速性を同時に実現しようというものであり、現在のところ世界でも他に例を見ないものである。

以下、重力 ・クーロン相互作用専用プロセッサと、多用途粒子系プロセッサについてその概略をまとめる。

3.1 重力 ・クーロン相互作用専用プロセッサ

計算速度の目標は 200 Tflops とする。このために、 50 Gflops 程度の演算速度をもつプロセッサチップを 4096 個並列に動作させる。プロセッサチップは、粒子間相互作用を計算するパイプラインを 6 本格納し、 150 MHz 程度 のシステムクロックで動作する。各パイプラインはサイクル毎に 60 演算を行なう。従ってプロセッサチップ単体のピーク性能は 54 Gflops、消費電力は 10W 程度となる見込みである。

基板 1 枚に 16 プロセッサをのせてプロセッシングボードとし、プロセッシングボード

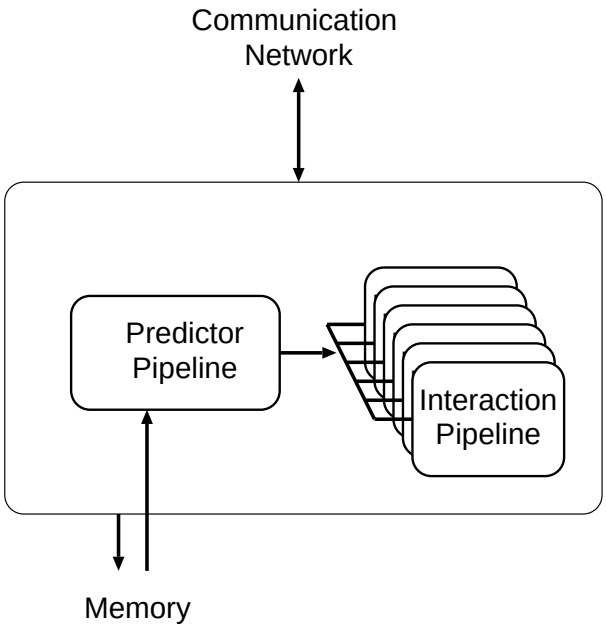

図 4: 重力 ・クーロン力相互作用専用プロセッサチップ

16 枚とコミュニケーションボード 1 枚で 1 クラスタ、16 クラスタでシステム全体を構成する。これらの 16 のクラスタは、インターフェースを集中制御するコントロールユニットを介してホスト計算機に接続される。なお、実装に際しては 2 クラスタを 1 ラックにまとめる。ラック当たりの発熱量は 5KW となり、強制空冷でそれほど問題はない。また、トータルの発熱量は 40 KW 程度となる。

ホスト計算機とコントロールユニットの通信速度は最低 2 GB/s 程度が必要になる。なるべく多様な応用を可能にするためには、それ以上の通信速度があることが望ましいので、必要に応じて拡張可能な構成とする。

プロセッサチップはスタンダードセルによるセミカスタム LSI として開発する。設計ルールは現在利用可能な 0.25μm を用い、180 万ゲート程度を集積する。プロセッサチップは、ほぼ GRAPE-4 のプロセッシングボードを単一の LSI に集積するものであり、メモリとホストへの通信ネットワークへのインターフェースを持つ。メモリとの転送バンド幅は 1 GB/s、ネットワークへのバンド幅は 200MB/s (双方向) 程度となる予定である。図 4 にプロセッサチップの構成を示す。

プロセッサボード内およびボード間のネットワークのトポロジーと物理的な実装方式についての詳細はここでは省略するが、ボード間通信にはパラレル ・シリアル変換を使った LVDS (Low Voltage Differential Signal) による高速転送を使う方向で検討を進めている。LVDS を採用したのは、距離に制限はあるものの Gigabit Ethernet や IEEE-1394 等に比べても安価で高速な通信が可能であるからである。

3.2　多用途粒子系プロセッサ

こちらは、計算速度などに明確な目標を設定することは難しい。これは、実効性能が応用の種類、特に必要な計算精度によって大きく変わるからである、

1999 年初頭の時点で、最大の FPGA チップは公称ゲート数で 20 万程度である。20 万ゲートという数は GRAPE-4 のプロセッサチップの 2 倍であり、例えば単精度 (32 bit) の浮動小数点演算器ならば 20 個程度集積できるはずである。

実際には、特に乗算器などに使った場合にはそれほどの規模のものが集積できるわけではなく、現状では実効ゲート数で 5 万程度である。言い換えれば、単精度の演算器で 5 個程度であり、倍精度の演算はぎりぎり可能という程度になる。

しかしながら、必要とする計算精度が例えば 12 ビットであれば、20 個以上の演算器が集積でき、かなり複雑な計算を行なうパイプラインを実現可能である。

本プロジェクトで開発する多用途粒子系プロセッサでは、以下を目標にする。

- 単体チップとしては、2000 年頃に利用可能になると思われる公称ゲート数で 50 万程度のものを用い、75MHz 程度のクロックで動作させる。
- システム全体としては、このチップを 1024 個並列に動作させる

主要部の演算精度に単精度を要求した場合で、チップ単体の性能は 1Gflops、システム全体の性能は 1Tflops 程度となる。これはもっとも悪い場合で、例えば実効的な精度が 12 ビット程度で良ければ 4Tflops、さらに 8 ビット程度なら 10Tflops 以上の速度が期待できる。

システム構成としては、重力 / クーロン力用計算機と同様に各プロセッサチップがメモリユニットを持つ構成とし、プロセッサボードやホストとの接続インターフェースのハード ・ソフトについては重力 / クーロン力用計算機と完全に同一のものを利用することで開発の手間を押える。

4　平成 10 年度の研究成果の概要

今年度は計画開始時の予定をほぼ達成することができた。具体的な成果は以下のとおりである。

- 重力プロセッサチップ開発の進行
- 重力 / クーロン力用計算機全体およびテストシステムの概念設計の終了
- GRAPE-5 システムの完成
- FPGA を使った計算システムの評価
- 新しい高速計算法 Pseudo-Particle Multipole Method の開発

以下、それぞれについて簡単に述べる。

項目	目標仕様	備考
動作周波数	125 MHz	
相互作用パイプライン本数	6	
動作電圧	2.5 V	
消費電力	20W 以下	
粒子メモリ	内蔵せず	同期 SRAM 使用
粒子メモリインターフェース幅	64 bit	
粒子メモリインターフェース速度	125MHz	
データ入出力ポート幅	32bit × 3	入力 2、出力 1
データ入出力ポート速度	25 MHz	
位置、時刻データ形式	64bit	固定小数点
速度、内部表現データ形式	36 bit	浮動小数点、仮数 24 ビット

表 1: 重力プロセッサチップ仕様

まず、重力プロセッサチップの開発の現状について述べる。基本的な仕様は、平成 9 年度に表 1 のように決定し、ハードウェア記述言語 (VHDL) による論理設計がほぼ平成 9 年度のうちに終了した。平成 10 年度には、論理設計が終った回路のシミュレーションによるテストと、実際の LSI を作成するためのレイアウト等の作業を行なった。これらは特にプロセス微細化が進んだ近年では長時間を要する作業となっているが、ほぼ予定通り進行しており、平成 10 年度中にサンプルチップが入手できる見込みである。

チップの開発の進行に合わせ、システム全体の詳細設計も進めた。現在、システム全体は 2 段階に分けて開発を進めており、まずチップ評価用の小規模なシステムを作成し、それから超並列接続が可能な大規模システムを開発する。評価用システムについては回路設計がほぼ終了し、サンプルチップのスケジュールに合わせて試作基板が完成する予定である。大規模システムについても仕様はほぼ決定しているが、詳細仕様については評価用システムの完成とその評価結果を待って決定する予定である。

なお、GRAPE-6 におけるチップ内並列パイプライン方式のテストも兼ねて開発していた GRAPE-5 システム が完成したことも、今年度の成果に数えることができる。GRAPE-5 のプロセッサ LSI 自体は 1997 年度に既に終了したプロジェクトによって開発された。これは 1990 年に開発した低精度重力計算パイプラインチップである GRAPE-3 プロセッサチップの後継として開発したものであるが、GRAPE-6 プロセッサチップのための技術的なテストの意味も兼ねて以下のような新しい試みをとり入れた。

1. チップ内に複数のパイプラインを集積した。
2. チップ内のクロックとデータ転送のクロックの比を 6:1 と大きくした。
3. チップ設計を従来の回路図とモジュールコンパイラを使った方式ではなく、全面的にハードウェア記述言語を使って行なった。

チップ自体は 0.5 μm ルールによる 300K ゲートのゲートアレイと現在の水準からみれば比較的小規模なものであるが、チップ単体での演算速度は 5.4 Gflops 相当と GRAPE-3/4 のプロセッサチップの 10 倍を実現した。さらに、ハードウェア記述言語を使った設計の利点、問題点についても経験を積むことができた。この経験は GRAPE-6 チップの設計に非常に役立った。この GRAPE-5 チップを使った計算システムが完成し、その評価が進行中である。

FPGA を使った計算システムについては、平成 9 年度に開発した Altera 社の FPGA EPF10K100 を 2 個使う評価用システム PROGRAPE-1 (PROgrammable GRAPE) を使って、現状でどの程度の回路規模、動作速度が実現可能かという評価を行なった。評価のために、実際に重力計算のためのパイプラインを実装した。

最後に、今年度に開発した新しい高速計算法である Pseudo-Particle Multipole Method (P^2M^2) について簡単に触れておく。遠距離相互作用を高速に計算する方法として、Barnes と Hut が提案したツリー法 [BH86] や Greengard と Rokhlin が提案した高速多重極展開法 (FMM)[GR87] がある。その詳細についてはここでは触れないが、どちらも、近傍の粒子からの寄与は直接計算し、遠方からの寄与はまとめて多重極展開の形で評価する。専用計算機を使えば近傍の分は高速化できるが、遠方からの寄与の計算の高速化は困難であった。

P^2M^2 では、多重極展開を仮想粒子を使って表現しなおすことにより、遠方からの寄与についても専用計算機を利用することを可能にした。これにより、従来は計算コストの観点からツリー法や FMM を使うことは非現実的であった高精度を要求する問題に対してもツリー法や FMM を使える可能性が出てきた。

5 今後の計画

以下に、来年度以降の計画について簡単に述べる。

平成 11 年度

重力 / クーロン力用計算機システム全体を組み上げる。この年から、天体物理学での実用計算を始める。実用計算を通して必要なソフトウェア開発と性能評価を進めていく。FPGA を使った計算システムは大規模並列化システムのプロトタイプ開発を行なう。

平成 12 年度

ホスト計算機、重力 / クーロン力用計算機システム双方の能力を強化し、より実用性の高いシステムに発展させる。FPGA を使った大規模並列化システムを構築する。また、天文学以外のアプリケーションへの応用を進める。具体的には、Ewald Method 等への適用を行なう。

平成 13 年度

重力 / クーロン力用計算機システム、FPGA を使った計算システムを増強し、筑波で開発される計算機と統合したヘテロジニアスシステムを構築する。

6 学会発表、論文等

6.1 国際学会等における発表

[1] K. Takahashi, *Anisotropic Fokker-Planck Models of Star Clusters*, Numerical Astrophysics 98, Tokyo, Japan, March, 1998

[2] K. Takahashi, S.F. Portegies Zwart, *Dynamical Evolution of Tidally Truncated Star Clusters*, Galaxy Dynamics、Rutgers University, USA, August, 1998

[3] T. Hamada, T. Fukushige, A. Kawai, and J. Makino, *PROGRAPE-1: A Programmable Special-Purpose Computer for Many-Body Simulations*, poster session No. B03, Numerical Astrophysics 1998, Tokyo, Japan, March 10-13, 1998.

[4] T. Hamada, T. Fukushige, A. Kawai, and J. Makino, *PROGRAPE-1: A Programmable Special-Purpose Computer for Many-Body Simulations*, poster session No. 1, 6-th IEEE FCCM'98 Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines, California, USA, April 15-17, 1998.

[5] T. Fukushige, and J. Makino, *N-body Simulation of Dark Matter Halo Formation using GRAPE*, Numerical Astrophysics 1998, Tokyo, Japan, March 10-13, 1998.

[6] J. Makino, *Special-Purpose Computer for GravitationalN-body System: GRAPE*, Numerical Astrophysics 1998, Tokyo, Japan, March 10-13, 1998.

[7] T. Nakano and J. Makino, *The Structure and Origin of Density Cusps in the Central Regions of Ellipticals*, Galaxy Dynamics, Rutgers University, USA, August 8-12, 1998

[8] E. Kokubo, S. Ida, and J. Makino, *High-Resolution N-Body Simulation of Lunar Accretion from an Impact-Generated Disk*, Origin of the Earth and Moon, Monterey, USA, December 2, 1998.

6.2 国内学会等における発表

[1] 牧野淳一郎、福重俊幸、船渡陽子、泰地真弘人、自己重力多体系専用計算機GRAPE-6の演算LSI、日本天文学会1998年春季年会、 1998年3月。

[2] 船渡陽子、楕円銀河におけるViolent relaxation後の分布関数について、日本天文学会1998年春季年会、 1998年3月。

[3] 福重俊幸、 牧野淳一郎、銀河の潮汐力を受けた球状星団の進化、日本天文学会1998年春季年会、 1998年3月。

[4] 濱田 剛、 福重俊幸、川井敦、 牧野淳一郎、PROGRAPE-1:プログラム可能な超高速多体シミュレーション専用計算機、日本天文学会1998年春季年会、 1998年3月。

[5] 高橋広治、 Lee, H.M., 銀河の潮汐力の影響を受けた球状星団の力学進化、日本天文学会 1998 年春季年会、1998 年 3 月。

[6] 高橋広治、 Portegies Zwart, S.F., The Disruption of Globular Star Clusters in the Galaxy, 日本天文学会 1998 年秋季年会、1998 年 10 月

[7] 川井敦、福重俊幸、牧野淳一郎、泰地真弘人、重力多体シミュレーション専用計算機 GRAPE-5 の開発、日本天文学会 1998 年秋季年会、 1998 年 10 月。

[8] 福重俊幸、 牧野淳一郎、重力多体シミュレーション専用計算機 GRAPE-6 の開発、日本天文学会 1998 年秋季年会、 1998 年 10 月。

[9] 牧野淳一郎、高速多重極展開法とツリーコードの新しい実現法、日本天文学会 1998 年秋季年会、 1998 年 10 月。

[10] 小久保英一郎、 井田茂、 牧野淳一郎、周地球円盤からの月集積、地球惑星科学関連学会、 1998 年 5 月。

[11] 小久保英一郎、 井田茂、 牧野淳一郎、周地球円盤からの月集積 II、日本惑星科学会秋季講演会、 1998 年 10 月。

[12] 牧野淳一郎、高速多重極展開法とツリー法—多体シミュレーションのための高速算法—$O(N)$ は $O(N \log N)$ より速いか ？ 第 48 回理論応用力学講演会、1999 年 1 月。

6.3 雑誌論文等

[1] K. Takahashi and S. F. Portegies Zwart, *The Disruption of Globular Star Clusters in the Galaxy: A Comparative Analysis between Fokker-Planck and N-body Models*, ApJ, 503, L49-L52 (1998)

[2] E. Athanassoula, A. Bosma, J.-C. Lambert, and J. Makino, *Performance and accuracy of a GRAPE-3 system for collisionless N-body simulations*, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 293, 369-380 (1998).

[3] E. Kokubo, K. Yoshinaga and J. Makino, *On a Time-Symmetric Hermite Integrator for Planetary N-Body Simulation*, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 297, 1067-1072 (1998).

[4] J. Makino, T. Fukushige, Y. Funato, and E. Kokubo, *On the Mass Distribution of Planetesimals in the Early Runaway Stage*, *New Astronomy*, 3(7), 411-417 (1998).

[5] Simon Portegies Zwart, Piet Hut, Junichiro Makino, Stephen McMillan, *On the dissolution of evolving star clusters*, *Astronomy and Astrophysics*, 337, 363-371 (1998).

6.4 解説記事等

[1] 牧野淳一郎、高速多重極展開法とツリー法—多体シミュレーションのための高速算

法、応用数理、 Vol 8, pp 277-287 (1998).

6.5 著書等

[1] Junichiro Makino and Makoto Taiji, *Scientific Simulations with Special-Purpose Computers — The GRAPE Systems*, John Wiley and Sons, Chichester (1998).

参考文献

[BA96] Buell D. and Arnold J.M.and Kleinfelder W. (1996) *Splash 2: FPGAs in a Custom Computing Machine*. IEEE Comp. Soc. Press, Los Alamitos, CA.

[BH86] Barnes J. and Hut P. (1986) A hiearchical o(nlogn) force calculation algorithm. *Nature* 324: 446–449.

[GR87] Greengard L. and Rokhlin V. (December 1987) A fast algorithm for particle simulations. *Journal of Computational Physics* 73: 325–348.

[IMES90] Ito T., Makino J., Ebisuzaki T., and Sugimoto D. (1990) A special-purpose n-body machine grape-1. *Computer Physics Communications* 60: 187–194.

[McC95] McCulpin J. D. (1995) Memory bandwidth and machine balance in current high performance computers. *Newsletter of IEEE Computer Architecture Technical Committee* 1: 19–25.

[MIE90] Makino J., Ito T., and Ebisuzaki T. (1990) Error analysis of the grape-1 special-purpose n-body machine. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 42: 717–736.

[MTES97] Makino J., Taiji M., Ebisuzaki T., and Sugimoto D. (1997) Grape-4: A massively parallel special-purpose computer for collisional n-body simulations. *The Astrophysical Journal* 480: 432+.

[PAC+97] Patterson D., Anderson T., Cardwell N., Fromm R., Keeton K., Kozyrakis C., Thomas R., and Yelik K. (1997) A case for intelligent ram. *IEEE Micro* 17(2): 34–43.

[TMF+96] Taiji M., Makino J., Fukushige T., Ebisuzaki T., and Sugimoto D. (1996) Grape-4: A teraflops machine for n-body simulations. In Hut P. and Makino J. (eds) *Dynamical Evolution of Star Clusters; Proceedings of IAU Symposium 174*, pages 141–150. Kluwer, Amsterdum.