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 (東京大学大学院理学系研究科)

1 研究組織

サブリーダー	牧野淳一郎	東京大学大学院理学系研究科助教授 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。GRAPE-6 のピーク性能は既に述べたように 100 Tflops 以上を予定しており、これは計画の最終年度をもって実現できるみこみである。その時点で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。これに対して本プロジェクトの総予算は 5 億円である。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。1990年代の間に、1つのマイクロプロセッサに使われているトランジスタの数は20倍以上に増えた。しかしながら、実装されている浮動小数点演算器の数は1から多くて2でこの10年間ほとんど変わっていない。つまり、相対的には演算器の占める割合は10年前の1/10以下になったわけである。このように演算器が増えない理由は、並列化が難しいこととメモリ転送速度が追いつかないことの2つであり、メモリ転送速度のほうが解決が困難である。

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、増えたトランジスタを有効に使えるのである。このために、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、速度に大きな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、

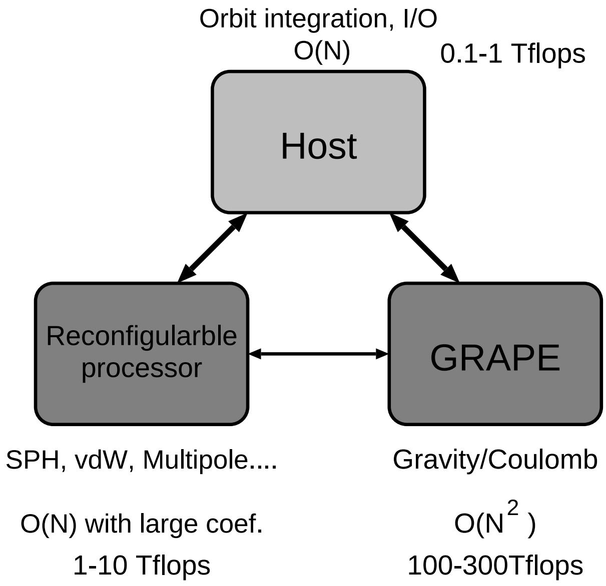


図 1: システム全体の構成

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

まず、重力・クーロン相互作用に専用化した、ピーク性能 100 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 1)。さらに、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。

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 本格納する。当初の計画では 150 MHz 程度のシステムクロックを見込んでいたが、1999 年時点で得られた LSI は 100 MHz が安定動作の上限であり、また予想よりも製造コストがかかることが判明したので、1999 年末時点では 200Tflops の実現が可能かどうかは難しくなっている。

しかしながら、100Tflops でも同時期の汎用計算機に比べて 10 倍程度の性能を実現できることには変わりない。現状の 100 MHz 動作では、プロセッサチップ単体のピーク性能は 36 Gflops、消費電力は 10W 以下に収まった。

システム全体の構成等については昨年度の報告に詳しく述べたので、ここでは省略する。

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。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。

4 平成 11 年度の研究成果の概要

今年度も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完成
- 重力 / クーロン力用計算機全体詳細設計の終了・試作開始
- GRAPE-5 システムを使った計算で IEEE ゴードン・ベル賞受賞
- 疑似粒子多重極法の改良
- FPGA 用モジュールジェネレータの開発

以下、それぞれについて簡単に述べる。

4.1 重力プロセッサチップ

まず、重力プロセッサチップについて述べる。以下、これを G6 チップと呼ぶ。今年度の最大の成果は、チップが予定通り完成し、設計ミス、バグ等がなく実用計算に使えることが確認できたことである。図 2 に完成したチップダイの写真、図 3 にプロセッサモジュールとその評価用ボードの写真を示す。この 2 チップのシステムでピーク性能が 72 Gflops 相当 (1 秒間に 2 粒子間相互作用を 12 億回計算) となり、10 ないし 20 PE 程度の中規模なベクトル並列計算機、あるいは 100 ないし 200 PE 程度の大規模な MPP や PC クラスタと同等のピーク性能になる。

昨年度の報告で述べたように、論理設計・シミュレーションは 1998 年前半で終了した。この後、最終的に動作確認がとれたのは 1999 年 10 月である。このように時間がかかったのは、チップの製造 (物理レイアウト設計を含む) を担当した東芝の作業に若干の問題があり、物理設計の変更が必要になったためである。この問題点のために、予想していた動作周波数で動かすのは多少難

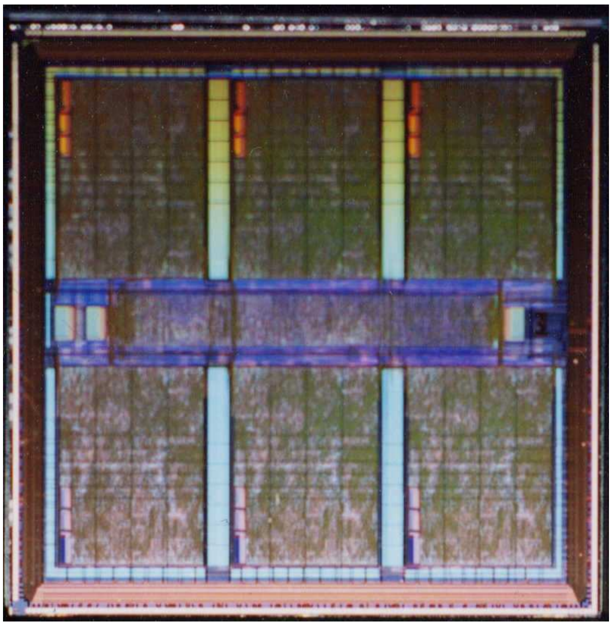


図 2: 完成した重力プロセッサチップ

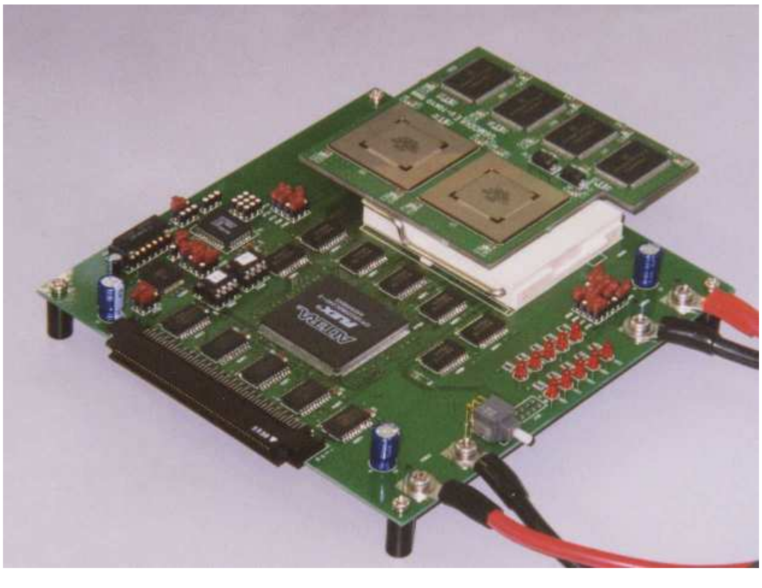


図 3: プロセッサモジュールと評価用ボード

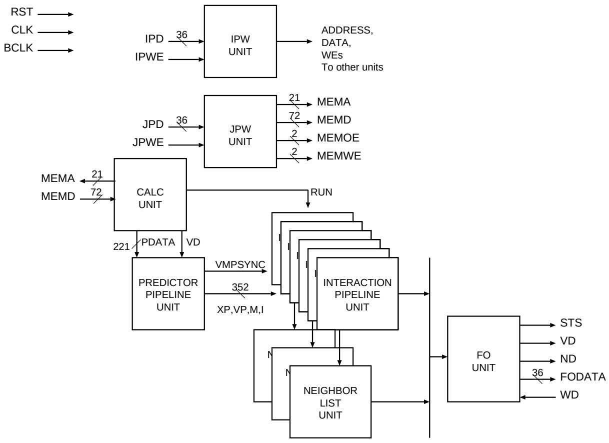


図 4: G6 チップの内部構成

しくなった。

現状の LSI は、それでも要求の最低仕様の 100 MHz 動作は満たしており、チップ単体での性能が 36 Gflops（相当）と現在の最高速のマイクロプロセッサのピーク性能の 24 倍の性能をもつ。さらに、消費電力は予想よりも少ない 10W で収まっており、これは現在の高速マイクロプロセッサには 50W を超えるものも多いのに比べて 1 桁程度小さくなっている。チップ単体での価格は高速なマイクロプロセッサの数分の 1 であり、ピーク性能で比べてほぼ 2 桁高い価格性能比を実現できた。なお、この比率はシステム全体としてみればさらに高いものになる。

典型的なアプリケーションを走らせた時の実効性能では、価格性能比の差はさらに大きくなる。これは、GRAPE の場合には単一のアプリケーションに全体を最適化しており、現在の多くのマイクロプロセッサのようにメモリバンド幅の制約や演算器利用の非効率のために性能が落ちるといったことがないためである。ただし、使用するアルゴリズムによっては、ハードウェア効率が通常の計算機程度まで落ちることもある。これについては 4.3 節で述べる。

G6 チップの構成を図 4 に示す。従来の GRAPE チップと比べたこのチップの大きな特色は、多数（6 本）のパイプラインを集積したことと、メモリインターフェース、ホストインターフェースを含むほとんどすべての制御回路を内蔵したことである。すなわち、1 チップにメモリをつけ、簡単な I/O チャネルの先に直接接続することで実際に動作するシステムが完成する。また、入力と出力が分離されていることも特色であり、このために入出力の並行動作が可能になり、高い通信スループットが実現できる。メモリには重力を及ぼす粒子のデータ（位置、質量等）が格納され、各パイプラインの書き込みレジスタには重力を受ける側の粒子データが格納される。計算中はメモリからシーケンシャルに粒子データが読み出され、レジスタ内粒子との相互作用が順番に計算され、求まった重力がアキュムレータにしまわれる。

モジュールの構成を図 5 にしめす。これは基本的には 2 つの G6 チップにそれぞれメモリをつけただけである。入力は 2 チップで共通であり、出力は並行して読み出して合計するために 2 本でている。評価システムは、このモジュールを GRAPE-4 および GRAPE-5 で使った PCI インターフェースを通してホストに接続するためのボードである。

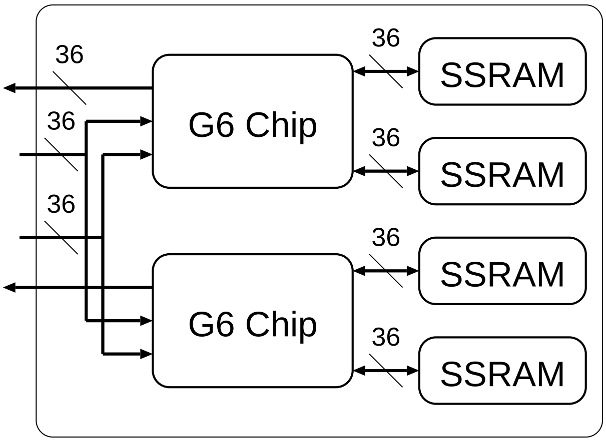


図 5: プロセッサモジュールの構成

4.2 重力/クーロン力用計算機全体詳細設計

計算機全体の概念設計は昨年度でほぼ終了していたが、回路の詳細設計は冷却システムを含む匡体や基板の物理設計と並行して行なう必要があり、特に冷却システムの決定には実 LSI チップの動作速度、消費電力の正確な評価が不可欠であるため、システム全体の詳細設計は当初の計画通り今年度の作業となった。

全体システムは最大 16 台のクラスタからなり、1 クラスタにプロセッサチップを 16 個 (プロセッサモジュールを 8 個) 載せた基板 (GRAPE-6 プロセッサボード、G6PB) を 16 枚収納する。基板サイズは 8U × 400 mm であり、GRAPE-4 の基板に比べ一回り小さくなった。

G6PB の外部へのインターフェースは、論理的には G6 チップのものと同じであり、入力 2 本と出力 1 本を持つ。入力はそれぞれ全チップにブロードキャストされ、出力は上でのべたようにリダクションされて 1 本になる。

物理的には、G6PB の外部インターフェースは G6 チップのものとは大きくちがい、LVDS をを使ったセミシリアル転送になっている。これに対し、G6 チップのインターフェースは単に 36 ビット (32 ビット +バイトパリティ) の同期転送であるに過ぎない。

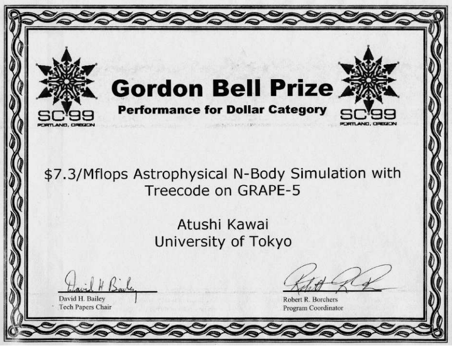
先に述べたように、全体システムは G6PB の上にコントロールボード (G6CB) がつき、それがホストにつながることによって構成される。G6PB の機能は基本的にはホストからの入力データのブロードキャストと G6PB からのデータのリダクションであり、4:1 のツリー構造をとる。すなわち、16 PB からなる 1 クラスタでは、CB が最上位 1 枚、中間層 4 枚の 5 枚必要ということになる。

現在、これらの基板は論理設計、回路の詳細設計が終了し、プリント基板を製造中である。

4.3 GRAPE-5 と ゴードン・ベル賞

GRAPE-5 チップは 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新しい試みをとり入れた。

チップ単体での演算速度は 4.8 Gflops 相当と GRAPE-3/4 のプロセッサチップの 10 倍を実現



Gordon Bell Prize
Performance for Dollar Category

SC'99
PORTLAND, OREGON

$7.3/Mflops Astrophysical N-Body Simulation with
Treecode on GRAPE-5

Atushi Kawai
University of Tokyo

David H Bailey
David H. Bailey
Tech Papers Chair

Robert R. Borchers
Program Coordinator

図6: 1999年ゴードン・ベル賞

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。

GRAPE-5は、このGRAPE-5チップ8個を1ボードに搭載して40 Gflopsの速度を出すものである。このGRAPE-5を2台並列に動作させ、その上でBarnes-Hutツリーアルゴリズムを使った宇宙論的N体計算で1999年のゴードン・ベル賞を受賞した(図6)。今回の受賞はコスト・パフォーマンス部門であり、実効性能において$7/Mflopsという値を出したことが評価されたものである。実効性能は2台並列のシステムで6 Gflopsであった。

この6Gflopsという数字は、ピーク性能が80Gflopsであるのに対して10%程度と決して高いものではない(なお、Barnes-Hutツリーに対しては、MPPやベクトル並列型計算機の場合でも実効性能はピーク性能の10%を超えることは稀である)。このような、汎用計算機なみに低い効率になったのは、Barnes-Hutアルゴリズムでは計算量が直接計算に対して減っているために、相対的にホストで行なわれる計算やコミュニケーションの比率が大きいためである。しかし、逆にいえばそのような場合でもGRAPEのほうが汎用計算機に比べて高い価格性能比を実現できるということを実証したという意味で、今回の受賞の意義は非常に大きい。

4.4 疑似粒子多重極法の改良

疑似粒子多重極法は牧野が昨年提案した新しい計算方法である。基本的な考え方は従来からある高速多重極法と全く同じであるが、通常の方法では多重極展開の係数を使うのに対し疑似粒子多重極法ではその名の通り粒子を使って多重極展開を表現し直す。

この方法のメリットは、アルゴリズムが簡単になることと多重極展開の評価にGRAPEが使えることである。が、必要な計算量がかなり増えるという問題があった。例えば、4重極モーメントを表現するのに12個の粒子が必要になる。これに対し、通常の方法では4重極モーメントの計算は1粒子からの重力の計算の2倍程度の計算量であるので、計算量が6倍に増えてしまっていることになる。もちろん、GRAPEを使う場合には先に述べた汎用計算機との大きな性能差のために、この程度の損失があってもGRAPEと疑似粒子多重極法の組み合わせが他の方法よりも優れてはいる。

昨年我々が提案した方法で計算量が大きくなるのは、疑似粒子の配置、質量を決定する公式を導くのに球面調和関数の直交性を用いたからである。このために、疑似粒子の配置上での数値積

分自体が球面調和関数の直交性を満足する必要があり、そのために粒子の数が増えていた。

例えば2重極モーメントの場合は、重力の場合のように力に符号がなければ粒子一つで表現できる（重心におけばよい）というのは自明である。今回、われわれはこれと同様な方法を4重極モーメントの場合まで拡張することに成功した。詳しい定式化はここでは触れないが、基本的には4重極モーメントテンソルを対角化するような平面上に3個の同一質量の粒子を配置することで4重極モーメントまでを表現できることを示し、これを計算コードに実現した。この結果、計算全体で3倍程度高速化された。同様な考え方を8重極以上に拡張可能かどうかは現在検討中である。

4.5 FPGA用モジュールジェネレータの開発

FPGAを使う再構成可能計算機を利用する上でもっとも問題になるのが、ソフトウェアをどのようにして用意するかということである。FPGAハードウェアの自由度は極めて大きく、またその上での論理回路の実現に用いられているVHDL等のハードウェア記述言語は基本的にはゲートレベル、あるいは変数としてビットベクトルレベルで記述するものであり、物理シミュレーションのプログラムを開発する研究者が簡単に習得、利用できるものではない。

もちろん、例えばFortranやCで書かれたプログラムが直接ハードウェアに表現されればそれでよいという考え方もあり得るが、通常の浮動小数点演算を使ったのではハードウェアの無駄が大き過ぎ、現実的ではない。なお、この、無駄の大きさは将来的実現できる回路規模が大きくなっても残る問題であることに注意してほしい。GRAPEのような専用計算機の場合には、小さな回路規模で必要機能を実現できれば、並列化によってスループットを上げることができるからである。

現状のVHDLによる記述と、CやFortranのようなプログラミング言語での表現の中間的なものとして、基本的な演算要素、すなわち固定小数点、浮動小数点の加減算、乗算器やデータ型変換器を用意するということが考えられる。ユーザーはこれらのものを組み合わせて必要な機能を実現するわけである。これは基本的にはモジュールコンパイラであるが、実用になるためにはデータ変換や浮動小数点演算の実現方式についてさまざまな検討、評価が必要になる。今年度は特に比較的精度が低い（語長が短い）場合に適当と考えられる演算方式について実装の検討を行なった。

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] A. Kawai, J. Makino, *A New Method to Implement High Accuracy Barnes-Hut Treecode: Pseudo-Particle Multipole Method*, Workshop on 'The GRAPE Users Community' Tokyo, Japan, January, 1999

[2] Junichiro Makino, *Stellar Dynamics and special-purpose computer: GRAPE project*, The Chaotic Universe, Roma, Italy, February 1999

[3] A. Kawai, J. Makino, *A Simple Formulation of the Fast Multipole Method: Pseudo-Particle Multipole Method*, the Ninth SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing, Texas, USA, March, 1999

[4] K. Takahashi, S. F. Portegies Zwart, *The Dynamical Evolution of Globular Clusters in the Galaxy*, The Galactic Halo: From Globular Clusters to Field Stars, Belgium, July, 1999

[5] Y. Funato and J. Makino, *Is the Hubble expansion accelerating, or are we looking through a chaotic universe ?* Gravitational Lensing : Recent Progress and Future Goals, Boston, USA, July, 1999.

[6] Junichro Makino and Eiichiro Kokubo, *SPH simulation of giant impact*, International Symposium on Planetary Impact Events and their Consequences on Earth, Yamaguchi, Japan, September, 1999

[7] Junichoro Makino, *GRAPE Project: A decade of special-purpose computers for many-body simulations*, The 5th International Conference on Computational Physics, Kanazawa, Japan, October, 1999.

[8] A. Kawai, T. Fukushige, J. Makino, *\$7.0/Mflops Astrophysical N-Body Simulation with Treecode on GRAPE-5*, SC99, Portland, USA, November, 1999

[9] University of Tokyo, *GRAPE-5 and GRAPE-6: Special-purpose Computers for the Astrophysical N-body Problem*, SC99, Research Exhibit, Portland, USA, November, 1999

6.2 国内学会等における発表

[1] 小久保英一郎, 井田茂, 牧野淳一郎, 月の起源–巨大衝突により形成された周地球円盤からの月集積–, 日本天文学会 (京都), 1999 年 3 月

[2] 泉水朋寛，船渡陽子，牧野淳一郎，銀河団内の銀河の進化，日本天文学会 1999 年春季学会，1999 年 3 月．

[3] 高橋 広治, Portegies Zwart, S. F., 銀河に生まれた球状星団の運命, 日本天文学会 1999 年春季年会, 1999 年 3 月

[4] 中野太郎, 牧野淳一郎, 楕円銀河の密度カスプの位相空間構造, 日本天文学会 1999 年春季年会, 1999 年 3 月

[5] 福重俊幸, D. C. Heggie, The Time Scale of Escape from Star Clusters, 日本天文学会 1999 年春季年会, 1999 年 3 月

[6] 船渡陽子, 牧野淳一郎, 銀河団における銀河の質量と速度分散の関係の進化について日本天文学会 1999 年春季年会, 1999 年 3 月

[7] 牧野淳一郎, 古賀勝基, 川井敦, 福重俊幸, 泰地真弘人, 自己重力多体系専用計算機 GRAPE-6 のプロトタイプシステム, 日本天文学会 1999 年春季学会，1999 年 3 月

[8] 川井敦, 福重俊幸, 牧野淳一郎, GRAPE-5 システム上のツリーコードの実現, 日本天文学会 1999 年秋季年会, 1999 年 10 月

[9] 泉水朋寛，船渡陽子，牧野淳一郎，銀河団内における common halo の形成と銀河の進化，日本天文学会 1999 年秋季学会，1999 年 10 月

[10] 高橋 広治, Portegies Zwart, S. F., 銀河に生まれた球状星団の力学進化, 日本天文学会 1999 年秋季年会, 1999 年 10 月

[11] 船渡陽子, 牧野淳一郎, 多重重力レンズ効果による遠方の超新星の光度変化について日本天文学会 1999 年秋季年会,1999 年 10 月

[12] 牧野淳一郎, 古賀勝基, 川井敦, 福重俊幸, 泰地真弘人, 自己重力多体系専用計算機 GRAPE-6 のプロトタイプ, 日本天文学会 1999 年秋季学会，1999 年 10 月

[13] T. Nakano and J. Makino, On the Cusps around Central Black Holes in Elliptical Galaxies, 「銀河形成の物理」研究会, 1999 年 12 月

[14] T. Sensui, Y. Funato, and J. Makino, *Evolution of Clusters of Galaxies — Growth of Common Halos*，「銀河形成の物理」研究会，1999 年 12 月

[15] Y.Funato *The stripping rate of mass of galaxies in clusters* 銀河形成の物理, 筑波, 1999 年 12 月

6.3 雑誌論文等

[1] K. Takahashi, *Anisotropic Fokker-Planck Models of Star Clusters*, in Numerical Astrophysics, ed. S. Miyama, K. Tomisaka, T. Hanawa (Kluwer), p. 77 (1999)

[2] K. Takahashi, S. F. Portegies Zwart, *Dynamical Evolution of Tidally Truncated Star Clusters*, in Galaxy Dynamics (ASP Conf. Ser., Vol. 182), ed. D. Merritt, J. A. Sellwood, M. Valluri (ASP), p. 107 (1999)

[3] A. Kawai, J. Makino, *A Simple Formulation of the Fast Multipole Method: Pseudo-Particle Multipole Method*, Proceedings of the Ninth SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (SIAM, in CD-ROM, 1999)

[4] A. Kawai, T. Fukushige, J. Makino, *\$7.0/Mflops Astrophysical* N*-Body Simulation with Treecode on GRAPE-5*, Proceedings of SC99 (ACM, in CD-ROM, 1999)

[5] T. Nakano and J. Makino, *On the Origin of Density Cusps in Elliptical Galaxies*, ApJ, 510, 155-166 (1999)

[6] T. Nakano and J. Makino, *On the Cusp around Central Black Holes in Luminous Elliptical Galaxies*, ApJ, 525, L77-L80 (1999)

[7] T. Nakano and J. Makino, *The Structure and Origin of Density Cusps in the Central Regions of Elliptical Galaxies*, GALAXY DYNAMICS: A Rutgers Symposium, ed. D. Merritt, J. A. Sellwood and M. Valluri, ASP Conference Series, Vol.182 (1999)

[8] T. Fukushige, P. Hut, and J. Makino, *High-Performance Special-Purpose Computers in Science*, IEEE Computing in Science and Engineering, March/April, 10, (1999)

[9] T. Sensui, Y. Funato, and J. Makino, *Evolution of Clusters of Galaxes: Mass Stripping from Galaxies and Growth of Common Halos*, PASJ, 51, ???(1999)

[10] Yoko Funato and Junichiro Makino, *Change in Mass and Energy through Collisions of Two Identical Galaxies*, ApJ, 511, 625-638 (1999)

[11] Keiko Yoshinaga, Eiichiro Kokubo and Junichiro Makino, *Stability of Protoplanet Systems*, *Icarus*, 139, 325-335 (1999)

[12] Junichiro Makino *Yet another fast multipole method without multipoles — Pseudo-particle multipole method*, *Journal of Computational Physics*, 151, 910-920 (1999)

6.4 解説記事等

[1] 牧野淳一郎, GRAPE プロジェクト, Computer Today, 1999 年 5 月号

[2] 船渡陽子, 牧野淳一郎, ハミルトン系の数値解法, 数理科学, 1999 年 8 月号

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.

[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.

[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+.

[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.