

3T-4

QCDPAXのアーキテクチャ

白川友紀^{*1} 吉江友照^{*1} 小柳義夫^{*1} 岩崎洋一^{*1} 星野 力^{*1} 川合敏雄^{*2}

(^{*1}筑波大学 ^{*2}慶応義塾大学)

量子色力学(QCD:Quantum Chromodynamics)のシミュレーションは、巨大な計算量を必要とするため、世界各国で専用の並列計算機を作製してこれを行う研究が進められている[1]。筑波大学においてもQCD計算用の並列計算機QCDPAXを開発中で[2]、現在PU(ProcessingUnit)4台のプロトタイプ機QCDPAX-4が稼働しており、288台のシステムが本年度完成予定である。この高並列計算機QCDPAXのアーキテクチャについて報告する。

1. 研究目的

格子ゲージモデルのシミュレーションを行うための並列計算機を製作し、ハドロン(陽子、パイ中間子、イータ中間子、オメガ中間子など)、グルーボールの質量を計算する。また、ハドロン相からクォーク・プラズマ相への相転移の研究を行う。

2. 格子ゲージモデル

周期境界条件を持つ4次元超立方格子の格子点にクォークを、辺にグルーオンを置いた形になっている。この系の中の2つの次元を2次元のPUアレイに対応づけ、残りの2次元はPU内の配列として扱うように割り当てる。また、各PUに属する格子点から正の4方向に延びている辺を、そのPUに割り当てる。

2×2×2×2の系を2×2のPUアレイに割り当てる様子を図1に示す。

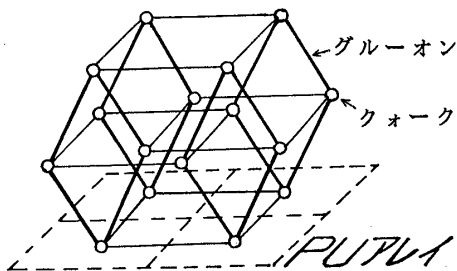


図1. 格子ゲージモデルとプロセッサアレイへの割当

3. QCD計算

QCD計算の手順を図2に示す。クォーク場については解析的に積分を行い、

$$\exp(-\beta \sum_p S_p(U)) \det(D(U)) \quad (1)$$

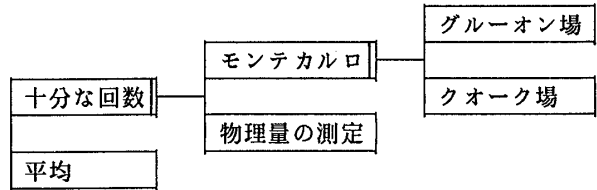


図2. QCD計算PAD

に比例した確率でグルーオン場を生じさせ、その確率集合の上で物理量を計算する。ただし、 β は定数、 S_p は

$$S_p = 1 - \text{Re} \text{tr}[U_{12}U_{23}U_{34}U_{41}]/3 \quad (2)$$

によって与えられる。 U_{12} は点1と点2をつなぐ辺のグルーオン場で、3×3の特殊ユニタリ行列であり、近接相互作用である。

(1)式に比例した確率分布を生じさせる方法はモンテカルロ法等統計力学において用いられた方法である。重要な計算は、連立一次方程式、 $Dx=b$ を解くことである。 D は、(12×格子点数)×(12×格子点数)の疎行列である。 b は、正規乱数である。 D は大規模であるが、非0ブロックは隣接する格子点の対応関係をあらわすので、データの参照は、隣接するPU間のみとなる。

解法には、不完全LU分解の前処理付きの最小残差法を用いる。

前処理 $(LU)^{-1}b=L^{-1}U^{-1}b$ は前進代入と後退代入で本質的には逐次処理となるが、4次元空間であるので、一つの要素が求められるとそれに隣接する4つの要素に関する計算が開始できる。隣接格子点は、同じPUか隣接PUに割り当てられているので、隣接通信によりPUアレイを2次元パイプライン(シストリックアレイ)の様に使って並列処理することができる。3次元超平面上の要素を同時に計算することになる。この様子を図3に示す。

最小残差法の主要な計算は、行列とベクトルの乗算であるが行列の非0要素は隣接格子点との間にあるので、この計算も隣接PUとのデータ転送で済む。

4. 物理量の測定

シミュレーション結果から、いろいろな物理量の計算を行う。一つは、辺の接続によって作られる閉

Architecture of QCDPAX

Tomonori SHIRAKAWA^{*1}, Tomoteru YOSHIE^{*1}, Yoshio OYANAGI^{*1}, Youichi IWASAKI^{*1}, Tsutomu HOSHINO^{*1}, and Toshio KAWAI^{*2}

^{*1}The University of Tsukuba, ^{*2}Keio University

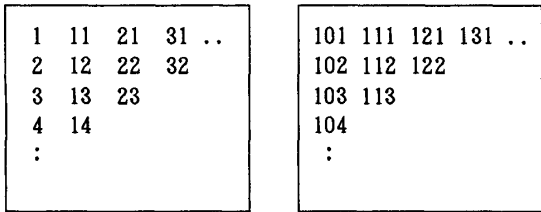
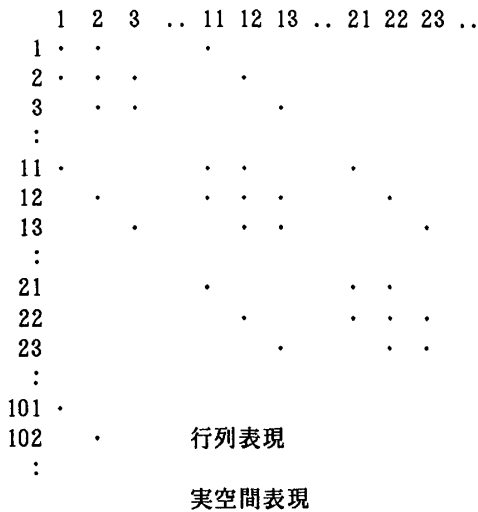


図3. 超平面法による2次元パイプライン処理

ループに沿って変数の積の計算である。この計算は隣接しないPUも関係するので、データを順送りする必要があるが、近接的な計算である。クォークの伝播関数の計算も必要であるが、これは、3で述べた計算と同じである。

5. QCDPAXのアーキテクチャ

QCD計算を行うための並列計算機として、計算の特徴から、従来のPAX同様[3]、2次元隣接結合、MIMD方式のアーキテクチャを採用することにした。加えて大規模な複素数行列の計算を高速に行うため、各PUにベクトル演算の機能を持たせた。また、隣接通信を高速化した。計算の特徴とアーキテクチャの関係を表1に示す。

以上のように、基本的なアーキテクチャを設定し、典型的なQCD計算を行うことを想定すると、ほぼ、データ転送、ベクトル処理の立ち上がり、正味の演算の時間が同じくらいになると予想される。

QCDPAXの開発状況を表2に示す。本年度中に288台のシステムを作製する予定である。また、来年度に480台に増設する予定である。

PU台数が288台のとき、1PUの実質的最高速度は、16.7MFLOPSであるので、ピーク速度は9.6GFLOPS、実効的に $288 \times 16.7 \times 1/3 = 1.6$ GFLOPSの速度が期待できる。また、480台では、ピーク速度 16GFLOPS、実効 2.7 GFLOPSが期待できる。これはQCDシミュレーションのニーズを満たすものである。

本研究は、科研費特別推進研究 62060001による。

参考文献

[1]J.Beetem et.al, IEEE Proc.ISCA(1985) p.255.
 : N.H.Christ, Lattice Gauge Theory(1986)p.55.
 [2]第36回本大会7C-2~7. [3]星野 力,PAXコンピュータ,
 オーム社. : T.Hoshino, COMPUTER, May(1986)p.68.

表1. QCD計算の特徴とQCDPAXのアーキテクチャの対応

QCD計算の特徴・要求	→	QCDPAXでの対応
モデルの特徴		
均一性・多自由度性	→	均一アレイ、高並列性
4次元格子	→	2次元格子(他の2次元はPU内配列)
作用の隣接性、近接性	→	隣接PU間結合
計算の特徴		
棄却法モンテカルロ法	→	MIMD
不完全LU分解	→	MIMD、2次元パイプライン(シストリックアレイ)処理
複素ベクトル演算	→	複素数演算高速化、ベクトル処理、高速データ転送

表2. 開発状況(予定)

年度	ハードウェア	ソフトウェア	QCD計算
58年度	PAX-128(MC6800 128台)試作		O(3)ゲージ(PACS-32)
59年度	PAX-64J(DCJ-11 32台)製作		O(3)ゲージ(PAX-128)
60年度			U(1)ゲージ(PAX-128)
61年度	PU1台、浮動小数点演算ボード試作		
62年度	浮動小数点演算制御用LSI試作	PU用コンパイラ試作	
	PU4台、ホスト計算機-PU間I/F試作		SU(3)ゲージ(PAX-64J)
63年度	4PUシステムのテスト	浮動小数点演算アセンブラ作成	
	ホスト計算機-PU間I/F製作	ベクトルコンパイラ作成	
	PU288台のシステム製作	プリプロセッサ作成	O(3)ゲージ(QCDPAX-4)
64年度	PU480台に増設		