

QCDPAX から CP-PACS へ

小柳義夫

東京大学理学系研究科情報科学専攻(当時)
工学院大学情報学部(現在)

1. 並列計算機の誕生

現在の計算科学研究センターの前身である計算物理学研究センター(1992~2004)ができるきっかけになったのが、QCDPAX という QCD(量子色力学)専用の並列計算機である。CP-PACS を記念して、その前史を語りたい。

1970 年代後半といえば、世界初の商業的に成功したベクトル計算機 Cray-1(1976)が登場し、世界初の本格的並列計算機 ILLIAC-IV(1975)が稼働し始めたころである。日本ではそのころ、富士通の FACOM230-75APU(1977)、日立の M200H-IAP(1979)などの、メインフレームへの付加ベクトル演算器が登場した。星野力と川合敏雄両氏は、1977 年頃、当時登場し始めた CMOS の汎用 CPU チップを用いれば、安価に科学技術計算用の並列計算機が構成できることを主張した。2 人の考えた対象は原子炉などの偏微分方程式で記述される連続系であり、必要なノード間通信は隣接通信が大部分であることから、2 次元メッシュネットワーク(両端を閉じるので実際は 2 次元トーラス)が最適であり、隣接ノード間に共有メモリを置くことにより簡単に実現できることを示した。

このアイデアにより、PACS-9(1978)、PACS-32(1980)、PAX-128(1983)、PAX-64J(1984)などが星野研究室で製作された。筆者が初めて見たのは、PACS-32 であった。PAX-128 で 2 次元 Poisson 方程式を解くと、当時の学術情報センターのメインフレームとほぼ同じ性能を出すことができ、商品と実験機の違いはあるが価格性能比は 2 桁優位であった。汎用チップを用いた並列コンピュータとしては、有名な Caltech Cosmic Cube(1981~3)よりも早く、先駆的なコンピュータであった。筆者はこの計算機が QCD のシミュレーションにも利用できることを直感し、共同研究を始めた。1983 年には東

大の大型計算センターにベクトルコンピュータ HITAC S810 (ピーク 800MFlops) が設置され、これを利用して研究が大幅に進展したが、それでも QCD の研究は計算性能がネックであり、少なくともさらに1桁から2桁高性能なコンピュータが必要と思われた。

2. QCDPAX プロジェクトの発足

価格性能比がいくらいいと言っても、実用的な並列コンピュータを建設するには億の単位の予算が必要である。当時の科研費は高々数千万であり、これでは作れない。なにか方策がないかと星野氏を中心に必死に文部省(当時)などを回って可能性を探った。

そのころ科研費に、従来よりは大型の予算が与えられる特別推進研究という新しい種目ができた。しかも故西島和彦先生の推薦で書類審査をシードできるという幸運に恵まれた。しかし道はそれほど簡単ではなかった。1984 年から出し続けたが、86 年まで 3 回連続で不採択となった。ヒアリングで出された質問は、「いったい君たちは新しい計算機を作りたいのか、それとも物理の研究をしたいのか」ということであった。しかしこの質問は一種の落とし穴(ジレンマ)である。もし「物理の研究をしたい」と言えば、そんならコンピュータを自作することなど考えずに買ってあげればいい、ということになるし、もし「計算機を作りたい」といえば、計算機屋のおもちゃに金は出せない、ということになる。86 年のヒアリングでは、筆者が「両者が分かちがたく結びついているところにこの提案の独自性があります。」と述べたところ、審査委員の N 先生がどういわけか激怒され、「君たちを査問しているわけではない」などと怒鳴り出し、当惑したことを覚えている。筑波大学の計算科学の基本路線は当時も今も Application, Algorithm, Architecture の codesign であり、筆者の発言は単なる言い逃れではない。ちなみに、2009 年 11 月 13 日の事業仕分けで日本の次世代スーパーコンピュータ計画が死にかけたが、その背景にもこのジレンマがあるのではないかと思われる。

87 年には、物理に重点を置き、代表者を星野氏から岩崎氏に変えて、4 度目の正直で提案し、めでたく採択となった。与えられた予算、時間、人的資源を考慮して、過去の PAX の研究成果を基に、目的とする QCD モデ

ルのシミュレーションに最適な QCDPAX の基本設計を行った。更に、その基本設計に基づき、並列計算を分担する演算要素(PU)のアーキテクチャ、ホスト計算機とPUとのインターフェイス、ホスト計算機システム、ソフトウェア(コンパイラ psc, アセンブラ qfa)の設計を行った。アンリツ株式会社の協力を得て、87年には、4台のPUからなるQCDPAX-4を製作し、88年度には、約半分のサイズの288台からなるQCDPAX-288を製作し、最終の89年度には432台のフルサイズで完成させた。

CPUはM68020、FPUとしては当時最高速(単精度)のLSIロジック社のDSPであるL64133を用い、疑似ベクトル演算や基本関数のためのゲートアレーチップFPUCを自作した。L64133はスカラ演算チップであるが、データをCPUと独立にメモリからFPUに供給するパイプラインの疑似ベクトル機構をFPUCに組み込んだ。また、FPUが加減乗しかサポートしないので、除算のための逆数、平方根逆数、三角関数、対数・指数関数、それにM系列逆数のためのハードウェアをも組み込んだ。パイプライン機構の設計は白川氏、関数関係のアルゴリズムやアーキテクチャの設計は筆者が行った。FPUCの機械命令は一種の水平マイクロコードであり、独自のプログラムカウンタとデコーダを持つ。

3. QCDPAX の苦労

しかし物理学の研究の道具として使えるコンピュータ、すなわち1日24時間、週7日間走り続けるコンピュータを製作することは容易ではなかった。まず、FPUCの設計および基板の設計がある。いずれもアンリツの技術者と協力して行ったが、いろいろ不手際があった。予算の関係で作り直すことができなかったため、一発勝負で製作した。FPUCでは、疑似ベクトル機構のカウンタ回路に誤りがあり、この部分は使えなくなった。このため疑似ベクトル演算のステップ数が増えることになった。また、基本関数回路では、指数関数計算のために指数部と仮数部を合成する回路を忘れ、他の演算で補った。また、プリント基板の設計ミスは、ジャンパー線で配線し直した。並列計算機では、1つのミスを修正するためにすべての基板を補修することになり、その手間は膨大であった。また、当然のことであるが、1枚の基板

を動かしているうちは見つからなかったバグが、200枚動かすと200倍の頻度で見つかるのにも苦労した。

何より手こずったのは、CPUの25MHz、FPUの16.7MHzというクロックが当時としては高速でわれわれの手に負えなかったことである。しかも、この2種のクロックが基板上に共存し、さらに通信のために隣りのボードの配線も入り込んでいて、いくつものクロックが共存し、雑音やクロストークに弱い構造だったことがある。あるとき、疑似ベクトル演算とスカラ演算とで結果が異なるエラーが起こった。筆者が両者を分析し、違いがビット16にあることを心眼で見出した。配線図を調べたところ、ビット16の配線だけが遠回りをして雑音を拾っていることを見出した。これもジャンパー線で配線し直した。

ソフトウェアでも苦労があった。cライクな言語 psc のコンパイラは筑波大学とアンリツとで自作した。特に疑似ベクトル演算は vfor 文で指定することにした。しかし生成されたオブジェクトコードの性能は十分ではなかった。このため、一番重要な演算部分は FPUC のアセンブラ qfa で書く必要があった。これはロード、演算、ストアのパイプラインを自分でスケジュールする言語であり、手で書くにはアーキテクチャを熟知していなければならなかった。

これらハード・ソフトの問題点の解決のために、1989年度にハードは完成したが、本格的に稼働するにはさらに約1年を要した。完成後10年間も物理学の研究に用いられた。

4. 当時の日本や世界の情勢

1980年代後半、日本では HITAC S820 (1987)、FACOM VP2600 (1989)、NEC SX-3 (1990) などの第2世代のベクトルスーパーコンピュータが登場していた。アメリカでも ETA-10 (1987)、Cray YMP (1988) などのベクトル機が登場したが、同時に数多くの汎用的な並列計算機がさまざまな企業から登場した時期でもある。日本では、第5世代プロジェクトやスーパーコン大プロで並列計算機が試作されたが、位置づけとしては特定目的のための専用計算機であった。実用のための並列計算機としては、QCDPAX のほか

東大の Grape-1 (1989)など数えるほどしかない。

QCDのために専用の計算機を物理学者が自分で建設するという動きは、この頃アメリカやヨーロッパにもあった。アメリカではコロンビア大学を中心に開発されている。QCDPAXを製作している頃3号機が製作中で、256台のノードから成り、ピーク速度は16GFlopsである。IBMのワトソン研究所では、GF11という大きなSIMDが製作されている。

イタリアではApeというプロジェクトがローマ大学を中心に進められており、1988年には16台のノードで1GFlopsで稼働している。その後Ape100という100GFlopsのマシンが完成した。エジンバラ大学にもTransputerを用いた計画があった。

これらは、QCDPAXと同程度か小規模な計画であり、コンパイラを作らなかったために応用のソフトを開発する生産性があがっていないものがある。QCDPAXが曲がりなりにもコンパイラに力を入れたことは先駆的であったと思われる。

5. CP-PACSへ

これらの業績を基礎として、岩崎氏は次の計画への動きに入った。計画が採択される見通しの立った1991年初頭に、内外のコンピュータベンダ14社に手紙を送り、この計画に参画する意思があるかを問い合わせた。この手紙にはこう書かれている。

わたくしどもは、QCDPAXの成功に勇気づけられ、その経験を活かしてさらに数十倍の計算速度をもつ並列計算機を製作する計画を進めております。別紙に、現在考えております目標の概略を示します。これは決して生易しい計画ではありませんが、半導体技術の発展により実現可能の領域に入ってきたと考えられます。幸い、文部省でもわたくしどもの計画を推進しようという機運が生まれつつあり、諸般の事情が許せば平成4年度より5年計画で予算化される可能性が高くなって参りました。予算化された場合は、筑波大学に「計算物理

学研究センター」(仮称)を設置し、そこで計算機の製作と物理学の研究を推進することになるものと思われます。

1992年には物理学の研究に適した超並列計算機 CP-PACS の開発プロジェクトが「学術の新たな展開のためのプログラム」の研究課題「専用並列計算機による場の物理の研究」(予算総額 22 億円)として認められ、同時に筑波大学計算物理学研究センターが設置された。センターでは共同開発の相手として日立製作所と契約を交わした。

筆者はこの前年筑波大学を離れたが、月 1 回開かれたセンターの研究員会議にはできるだけ出席して、開発の議論に参加した。

日立の最初の提案は、4 個の HP 社の CPU をバスで共有メモリと結合したノードを、ハーバークロスバーで相互接続した超並列マシンであった。QCD のテストプログラムで詳しく検討したところ、バスネックでノードの実効性能が全然出ないことがわかった。これを解決したのが中澤研究室から提案された、浮動小数レジスタのリネーミングによってパイプライン処理を行う、疑似ベクトル処理のアイデアであった。

1992 年から 5 年をかけて CP-PACS が開発・製作され、同機は 1996 年 11 月の完成時点には 614Gflops を達成し、世界のスーパーコンピュータ トップ 500 リストの第一位と占めたことはご存じのとおりである。

CP-PACS は完成後 8 年にわたって稼動し、素粒子の強い相互作用の基礎理論である QCD に基づく素粒子と基本粒子クォークの性質の解明、量子力学第一原理に基づく固体水素の相構造の解明、宇宙輻射と物質の相互作用を取り入れた宇宙の階層構造形成のシミュレーション等、基礎物理学諸分野において世界的な業績を挙げた。

他方、日立製作所は CP-PACS で開発した技術で商用機 SR2201 を製作し、東京大学大型計算機センターなどに納入した。CP-PACS だけでなく、富士通が開発した NWT の技術が商用機 VPP-500 として実り、NEC が開発した地球シミュレータの技術が商用機 SX-6 として実っている。このような世界一級のコンピュータが応用分野からのイニシアチブで開発されたことは、日本の開発モデルとして注目される。現在開発中の次世代スーパー

コンピュータも、その技術が商用機として広く国内・国外で活用されることを期待している。