

並列コンピュータの進歩

Development of Parallel Computing System

堀 越 彌*

Hisashi HORIKOSHI

1. 並列コンピュータの歴史的背景

昨今、並列コンピュータは新聞・雑誌紙上で非常に騒がれているが、その歴史は決して新しいものではない。今から70年以上前、1920年、イギリスの気象学者で当時のエスクダルミワ観測所所長のリチャードソン氏が次のような構想¹⁾を提案した。このアイデアは並列コンピュータの教科書にもよく引用されるものである。図1に示すような、天気予報工場を想定している。円形劇場に6万4000人を集め、中央に指揮者が立って一斉に計算を実行する。対象空間を2000の格子点に分け、各格子点の計算を32人で分担する。この方式で3時間後の気象の計算が3時間かかってできるというものであった。したがって予測というより世の中の現象にやっと追いつく、というものである。この構想が出された当時、「まだこれは夢物語である」と書かれている。現在我々が70年後を予測するとどのような夢物語ができるだろうか。

計算機として現実味を帯びてきたのは1963年、ウェスティングハウス社の技術者のスロートニック氏が出した

「ソロモン」²⁾という計算機の構想である。これは1024の計算機を使って数値計算しようとするもので、当時この実用化をめぐり社内で議論されたが、実用化にいたらず、次のILLIAC IV²⁾の研究開発を待つことになる。その後、彼の構想に注目したイリノイ大学が彼をスカウトし、1965年、国防総省 ARPA (Advanced Research Program Agency) から当時としては破格の800万ドルという援助を得てILLIAC IV という並列計算機の開発に着手した。製造担当はバローズ社で、1969年(昭和44年)夏完成し、イリノイ大学において利用が開始される。私が70年頃訪れたときには、まだ十分に活用されていなかった。当時、軍事研究に対する学生の反対運動があり、この機械をイリノイ大学からサンフランシスコのバイエリアにあるエイムズ研究所に移すことになる。ここでも機械が十分活用されるという状況に至らず、歴史の舞台から消えていくことになった。

最終的に運用されたILLIAC IV は64台の構成であった。全体で 50MFLOPS (Mega Floating Operations Per Second: 1秒間に 10^6 (メガ) 回の浮動小数点演算を実行)、毎秒5000万回の計算を実行するというものである。当時の

円形劇場で計算を演奏

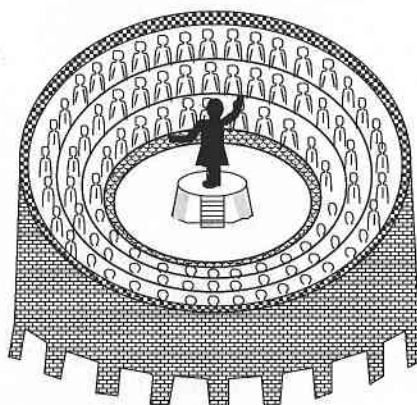


図1 リチャードソンの構想 (1920年)

- “天気予報工場” を想像
- 数値積分による天気予測モデルの基礎を開発
- 64,000人を円形劇場に集め、紙と鉛筆で計算
- 中央に指揮者が立ち、指揮者のランプを合図に一斉に計算
- 全体で2,000の格子点があり、各格子点の計算を32人で担当
- 1ステップの計算が3時間

* (株)日立製作所コンピュータ事業本部製品企画本部長
(東京大学生産技術研究所 第1部客員教授)

先端技術シリコン IC を使ったが、大きな装置になり広い大講堂にやっと収まる機械となった。当時のこの構想が広く実用に供するに至らなかった理由として、当初 1000MFLOPS を目標としたが、ハードウェアに費用がかかり、最終的には 64 台、50MFLOPS の性能しか実現できず、1973 年に出荷された CDC 社の「スター」という機械がすでに 50MFLOPS を実現しており、相当大きなものを作ったにもかかわらず、10 年近い年月の間に商用機と似た性能になってしまった。もう一つは、この複雑な計算機を LSI を使って実現しようとしたが、当時、コスト的な問題があり、まだ LSI 技術が現実的に使われる状況ではなかったため、結果として IC を使うことになった。そのため部品数が非常に増え、安定性に欠けるものとなってしまった。一時、MTBF (Mean Time Between Failures: 平均故障間隔) が 5 時間で、ダウンしない時間帯を見つけて計算するのが難しい、という状況もあった。他にもいくつかのファクターが考えられるが、この 2 つが大きな原因と考えられる。

それから 20 数年経過した現在、時代がまた動きだしている。当時と変わってきている点は、集積回路、VLSI あるいは ULSI という表現が使われるが、数百万トランジスタをわずか 1 cm 角、あるいは 15 mm 角のシリコンに乗せたチップが極めて安価に大量に供給できる状況になっていることである。1 台のプロセッサの性能も 100MFLOPS を越え、昔の ILLIAC IV 全体で実現しようとした性能に近いものが数万円で使えるようになってきている。したがって、並列コンピュータを構成するプロセッサ台数も 1000 台あるいは 1 万台が可能になりつつある。このような技術的な土台の充実に加え、信頼性向上の技術、ソフトウェア的な道具の整備も進んでいる。

過去 40 年間の計算機処理性能の推移を図 2 に示す。性能はざっと 10 年で 100 倍、20 年で 1 万倍ずつ進歩してい

る。不思議に最初の 20 年、スカラープロセッサという計算機的方式で約 1 万倍、次に 1970 年頃から現在のスーパーコンピュータの主流になっているベクトルプロセッサの方式で 1 万倍の進歩を達成してきた。今、1990 年代に入って並列プロセッサの時代に入っているが、この方式でまた 1 万倍位の性能向上を実現できるのではないかと期待される。この推移の意味するところは、2000 年で 1TFLOPS (TFLOPS: 1 秒間に 10^{12} (テラ) 回の浮動小数点演算を実行)、2010 年で 100TFLOPS の性能を実現できるということである。100TFLOPS とは毎秒 10^{14} 回、100 兆回の計算ができることに相当する。10 m の距離の光の伝達時間が数十ナノ秒とすると、その間にざっと 10^6 回の計算ができる。すなわち、10 m 先へ光が届くまでの間に 100 万回の計算ができてしまう。このような超高速の計算パワーの実現には当然並列的な機能が必要ということになる。

同様に記憶装置の容量の推移を図 3 に示す。記憶容量は数値計算実行時に、処理性能に劣らず重要になる。記憶容量の伸びは 10 年で 100 倍、あるいは 20 年で 1 万倍という処理性能の進歩より若干低くなっている。この理由は、従来のスカラー方式、ベクトル方式では高速メモリが必要になり、容量を増やすことが困難であったことによる。今後、並列コンピュータが主役になると、低コストメモリを使うことが可能になるので、従来より急な勾配を期待できる。すると、2000 年には計算機全体のメモリは 1 テラバイトあるいは 10 テラバイト、2010 年で 1 ペタバイト位のメモリを実装できる可能性もでてくる。1 千兆バイト、1 千兆文字ということになる。ペタという単位は聞き慣れない単位であるが、半導体技術が近い将来 1 cm 角上に数十ギガビットのメモリーを乗せることが可能になるとすると、このチップを 10 万個集めれば 1 ペタバイトになる。数値計算の可能性を飛躍的に広げることができるものと考えられる。

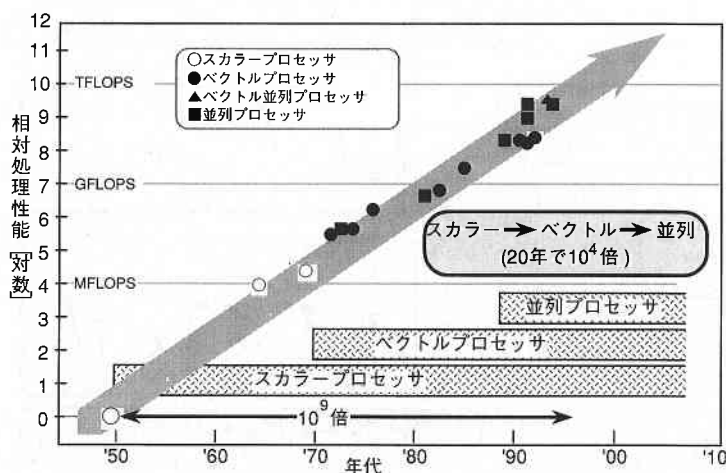


図 2 科学技術計算用高速コンピュータの処理性能推移

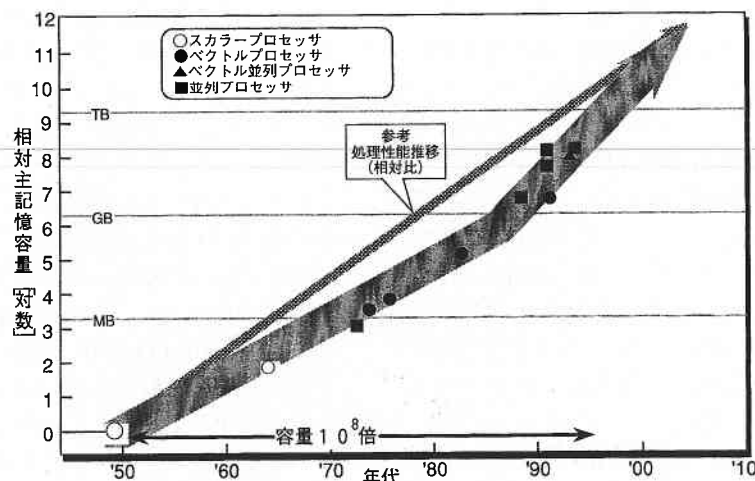


図3 科学技術計算用高速コンピュータの主記憶容量推移

2. 並列コンピュータの高速化方式と性能

次に、計算機内部の構造について述べる。スカラー方式あるいはパイプライン方式、ベクトル方式、さらに最近の並列あるいはパラレル方式という3つの方式がよく議論される。その違いが図4（日経サイエンス掲載）³⁾に説明されている。従来の方式では、1人で100年かけて行った作業を、ベクトル方式では運ぶ人、2段目を掘る人、上を崩す人、というようにステージごとに分かれて10人で10年で行う。それに対してパラレル方式は、これを分担する場所を決めて並行して作業しようという概念である。秀吉の墨股の一夜城ではないが、みんなで競争すればあつという間にできる、という考え方である。

図5はベクトルプロセッサの構成を示している。現在広く使われているスーパーコンピュータの内部構造に相当する。文字通り機械内部がいくつかのステージに分かれており、ステージごとに異なった処理を積み重ねて1つの命令

を実行する。したがって、このステージ（パイプラインのピッチという）をいかに細かく切るか、が性能を左右することになる。しかし、過度に細分化すると引き継ぎ時の付加的処理が目立ってしまうので、何百にも分割することは一般的ではない。多くても10程度のステージで現在のベクトルプロセッサは構成されている。

一方、並列プロセッサの場合には図6に示すように、各プロセッサに仕事を分割して処理を実行する。理想的に分割できれば、各プロセッサは独立に処理が進められるので極めて高い性能を実現できる。しかし、現実にはプロセッサ間通信、すなわち種々のデータ、あるいは途中結果の連絡等を行うための通信が必要となる。プロセッサ間通信をいかに行うかが方式上の大きな分かれ道になる。

ここで、ベクトルプロセッサの現状と、並列プロセッサとの関係を図7に示す。横軸はプロセッサの台数、縦軸は最大性能を示している。現在、使われているベクトルプロセッサは10から100GFLOPS（GFLOPS：1秒間に 10^9 （ギ

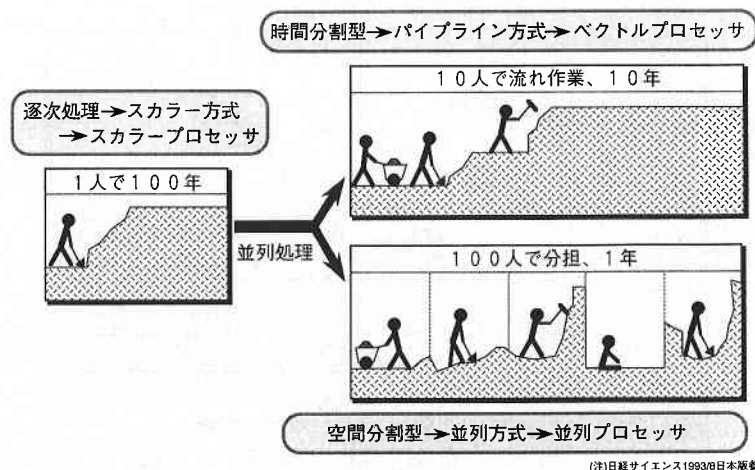


図4 並列処理の概念と高速コンピュータとの関連

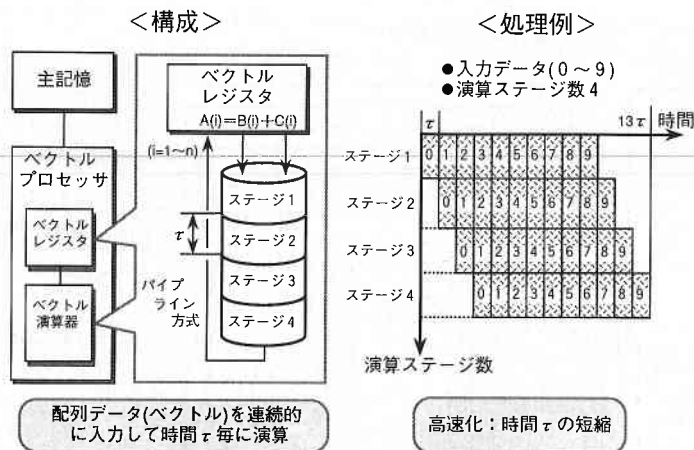


図5 ベクトルプロセッサの構成と処理例

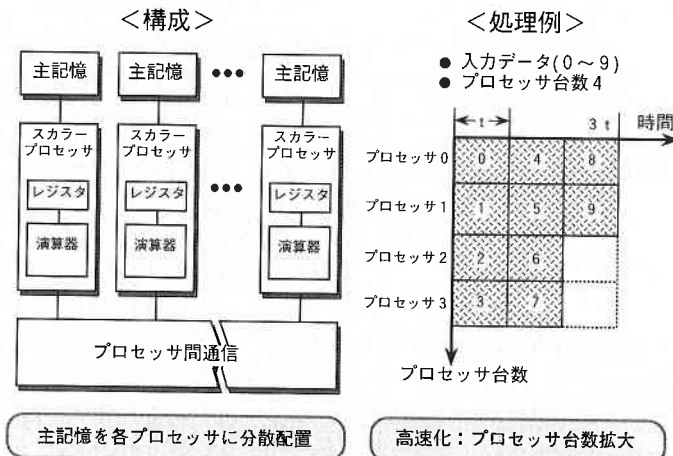


図6 並列プロセッサの構成と処理例

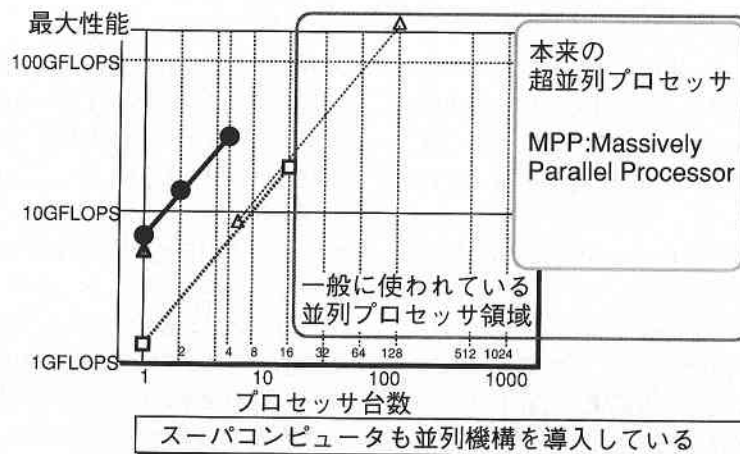


図7 スーパーコンピュータ: ベクトルマシンの性能

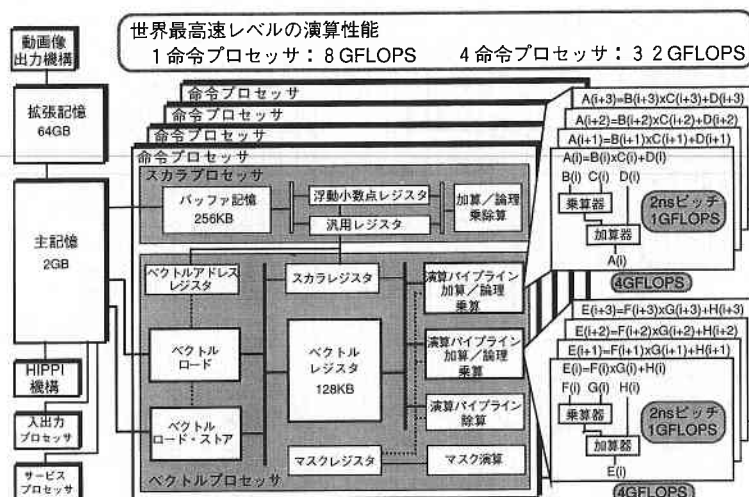
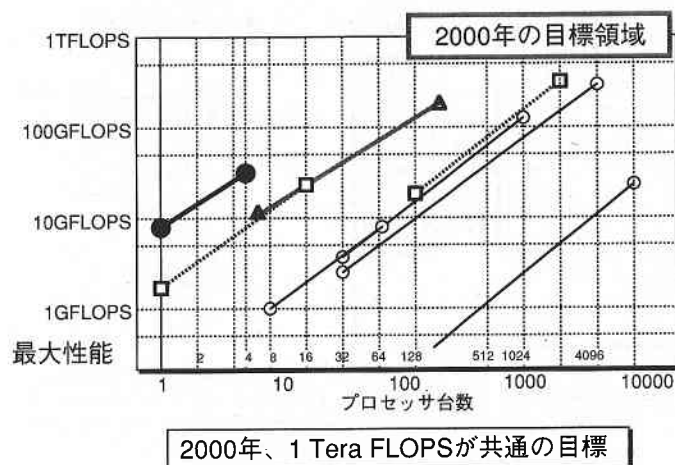


図8 ベクトルプロセッサの構成例 (S-3800)



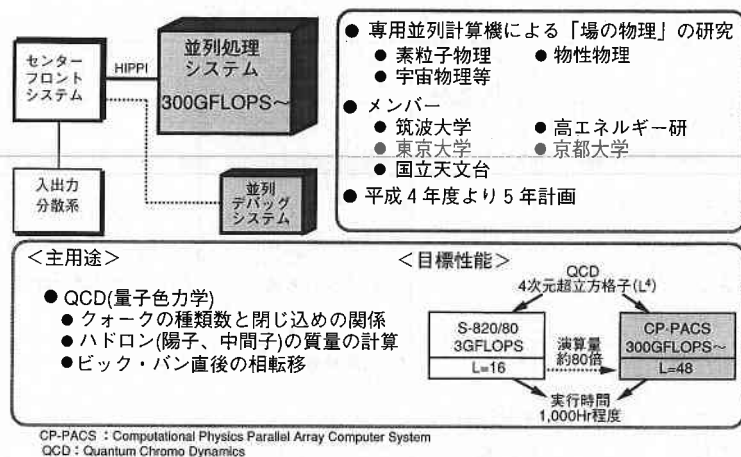


図10 並列プロセッサの構成例 (筑波大学 CP-PACS 計画)

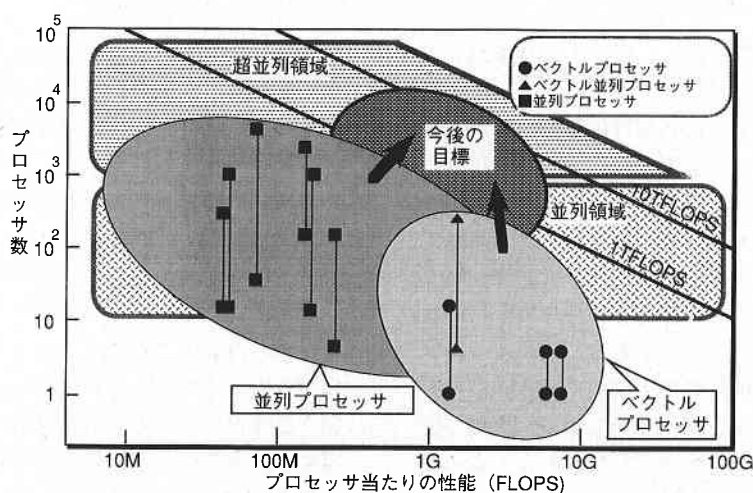


図11 今後の性能動向

(図10). この計画では、300GFLOPSの実現を目標としており、QCD(量子色力学)の計算を行い、ビッグバン直後の相転移の計算を試みようとしている。四次元の超格子の刻みを従来の16から48に詳細化し、ひとつの計算に1000時間を使う予定である。並列プロセッサ応用の一例として、1TFLOPSへ向けての道を拓くものであるといえる。

米国では、「グランドチャレンジ」⁴⁾という言葉が盛んに使われている。米国の科学技術政策局等が主導した目標だが、2000年以前に1TFLOPSを実現し、気象計算、環境計算、あるいは遺伝子解析等の技術のフロンティアを進めようとしている。1TFLOPSが実現した場合の効果として、現在は二次元問題として扱われている数値計算が、三次元問題に適用でき、しかも時間単位で計算可能になるといわれている。もちろん、計算対象にも依存するが、三次元計算可能な領域が増えることは確実であり、ここに1TFLOPSへの期待感があるといえる。

計算機方式の点から今後の性能動向を見ると図11のよう

になる。横軸がプロセッサ性能、縦軸がプロセッサ台数を示している。現在のプロセッサ性能は100MFLOPS～1GFLOPS前後、台数は多くても10³程度である。近い将来、数100MFLOPS～数GFLOPSのプロセッサ1000～数1000台程度の構成で1TFLOPSを実現することになる。10000台以上の超並列プロセッサ構成により10TFLOPSあるいは100TFLOPSの領域に今後10～20年かけて挑戦していくことになる。

3. 並列コンピュータの利用技術と課題

話の上では計算機を並べればいくらかでも高い性能を実現できることになるが、エンジニアリング的には多くの課題がある。第1の課題は、システムの処理対象は何か、いったい何の計算に並列プロセッサを適用するのかという問題である。特定用途に限定すれば比較的容易に並列プロセッサ方式を特定できるが、商売上は売れる台数が限られ、高価になるという問題がある。一方、広く一般的用途を対象

表1 科学技術計算用途基幹システムとしてのプロセッサ比較

	メイン フレーム	スーパーコンピュータ ベクトルプロセッサ	並列プロセッサ
科学技術計算能力	△	◎	○
最大性能(Peak)	△	○ 32GFLOPS(3800)	◎
性能安定性	◎	○	△ 限定用途
スカラー性能	○ 40MIPS	◎ 60MIPS	△
プログラム容易性	◎	○ ベクタ化考慮	△ アルゴリズム構築
移行性	◎	○	△
運用性	◎	○ 汎用機能包含	△ 別システム
システム・ジョブ管理 ファイル管理 信頼性・強靱性			
用途	一般用途	科学技術計算用途 の基幹システム	補助用途 開発用途

にした汎用システムを目標にすると、数多くの並列プロセッサの限界に遭遇する。

第2の課題は、ソフトウェアの移植性確保の問題である。現在では、すべてのプログラムをゼロから作る場合はほとんどなく、既存のソフトウェア資産、流通ソフトウェア資産を活用するのが一般的である。また、プログラムだけでなくある機械で開発したアルゴリズムが他の計算機に移りうるかという問題もある。このような移植性をいかに確保するかが非常に大きな課題となっている。

3番目に、プログラムの開発環境の問題がある。いろいろなアルゴリズムとコーディングが開発しやすい環境が提供されないと、機械があっても十分に活用されなくなってしまう。

4番目に、プロセッサ性能と多重度の選択の問題がある。1台の性能を上げれば上げる程、ある意味ではシステム全体として安定した性能が出るが、コストがかかる。一方、安価なプロセッサを多く並べた構成では、システム全体の性能が処理する対象に大きく依存することになり、安定度が確保できない。

5番目に、プロセッサ間通信の効率化の問題がある。どんな処理でもプロセッサ間の情報交換がある程度必要になる。これを効率良く実現しないとそこが性能上の隘路になってしまう。あまり高度なプロセッサ間通信を実現しようとするコスト増大につながる。

最後に全体のシステムの効率的な運用方法の問題がある。一人の利用者が占有する場合は比較的安易であるが、一般には並列コンピュータシステムは高価なリソースである。複数の利用者がリソースを円滑に共有する場合の超高速性と利用性の調和が大きな課題となっている。

調査報告⁵⁾によると、米国では並列コンピュータの利用がある程度進んでいるが、課題もかかえている。まず、対象の複雑性ゆえのソフトウェアの未熟さ、プログラミング

の困難さ、第3者応用プログラムがない等の悩みは今指摘した点である。また利用目的の曖昧性。なんのために使うかということの不明確さも指摘されている。また、ベンダーの存続性への不安などもあげられている。挑戦的な米国の場合、ベンチャーの提供した高価な製品がその後の倒産により保守上の問題、発展性の問題を抱える例もある。

表1は、このような環境の中で、いわゆる従来のメインフレーム、スーパーコンピュータ、並列コンピュータの特性を示したものである。次の5年程度を想定した場合、並列プロセッサの最大性能、ピーク性能をいかに生かすかということに尽きると考えられる。性能安定性、プログラム容易性、あるいは運用性等の項目について、並列プロセッサは多くの改善すべき余地を残している。計算結果に関心のあるエンドユーザの場合、ある程度目標をしばって開発用途に利用していくのが一つの現実的な解と考えられる。したがって、次の5年間の科学技術計算用途コンピュータをマクロに捉えたと、メインフレームが縮小し、スーパーコンピュータが中心的役割を担い、並列プロセッサが飛躍的に伸びると考えられる。

4. 並列コンピュータの応用と並列化の課題

現在、並列コンピュータの応用領域は急速に拡大している。科学技術計算、数値シミュレーションはもとより、グラフィックス、CADの世界、ニューラルネット、自然言語処理、認知行動等に代表される知識処理の世界、そしてデータベース処理等に拡大している。最近では、並列データベースプロセッサとよばれる商用機が一般化しつつある。また、トランザクション処理、銀行・金融機関等の取引の並列化等の用途にも広がりを見せている。ここではこの種の計算を並列化する場合の問題について述べる。図12は構造解析上の問題点をまとめたものである。構造解析の世界においては、一般的には従来からあるマトリックスをその

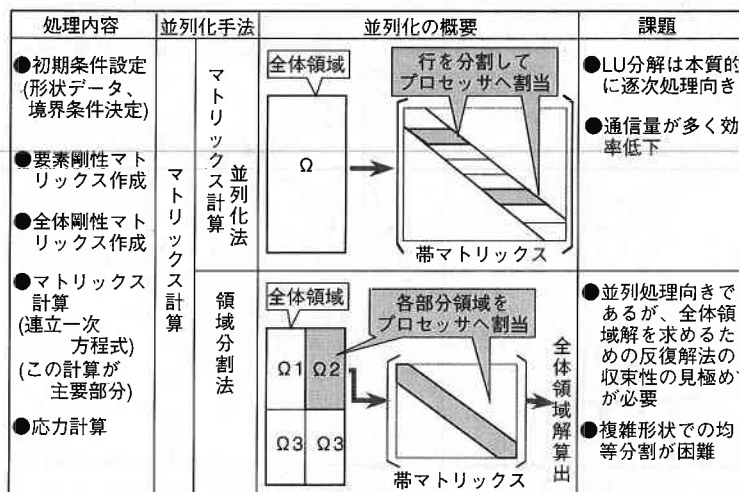


図12 構造解析での並列処理の概要と課題—有限要素法—

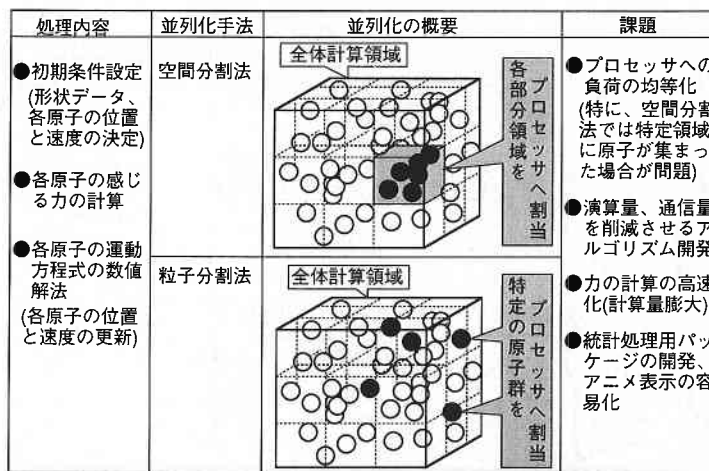


図13 計算化学での並列処理の概要と課題—分子動力学—

まま解くのが一つの方法である。しかし、いわゆる LU 分解法は本来逐次処理向きで、並列プロセッサに適用するとプロセッサ間通信量が増大し効率が低下する。一方、領域分割法、マトリックス全体をいくつかの領域に分けて計算するという方法を採用すると、基本的には並列処理向きであるが、全体領域の解を求めるためにいわゆる反復解法の集束性を確保する必要がある。ここで各種のプロセッサ間通信の問題が発生する。このトレードオフがこの分野の並列コンピューティングに課せられた課題となっている。

図13は分子動力学上の問題点を示してある。分子動力学の分野においては、分子をそれぞれのプロセッサへ空間的に分割する方法が一般的にとられる。その場合、分子が一樣に分布している場合はいいが、あるところに集中して分布しているときはプロセッサ間にいかに負荷を均等に分割するかが問題になる。また、シミュレーションの過程であるプロセッサへ分子が集中してしまうことも起こりうるの

で、その場合の対処が問題になる。一方、粒子を分割し粒子単位にシミュレーションするという方法もある。この場合、粒子間の相互作用がプロセッサ間通信となるので通信量をいかに削減するか、あるいは力の計算をいかに高速化するか、という課題が重要になる。

図14は若干工学的な問題をずれるが、グラフィックスの世界の並列コンピューティングの課題を示したものである。昨今、映画あるいはテレビ等できれいなグラフィックスが各種放映されている。この場合、視線、目に入る光線を逆にトレースしてシミュレーションすることになる。対象を並列化するためにオブジェクトをプロセッサ間に分割することになる。その場合のプロセッサ間通信の削減が問題になる。また、共通的に必要なデータをいかに効率的に格納するかという問題も解決する必要がある。

図15は最近話題になっているバーチャルリアリティの世界の課題を示したものである。グラフィックスの延長上に

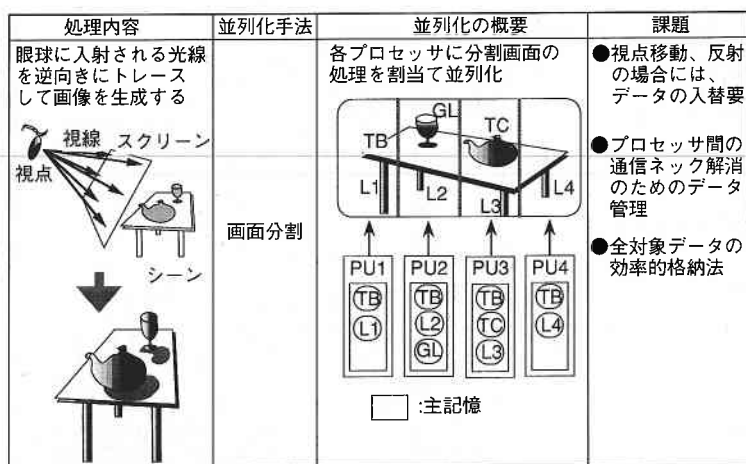


図14 グラフィックスでの並列処理の概要と課題
—レイトレーシング—

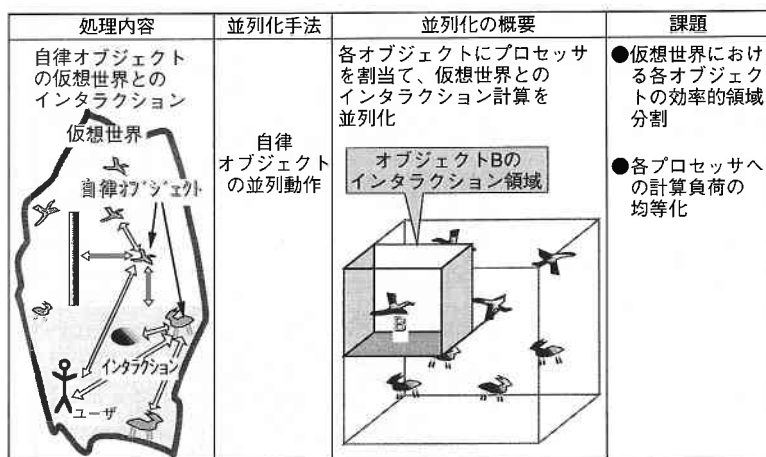


図15 グラフィックスでの並列処理の概要と課題
—バーチャルリアリティ—

あるものであるが、グラフィックスの静的無機の世界に対し、人が歩いている、鳥が飛んでいる等の自律的対象が増大し計算量が増える。したがって、こういう仮想世界の個々のオブジェクトをいかに率良く領域に分割していくか、鳥が飛んでほかの領域に移った場合の処理等が問題になる。また、鳥のインタラクションする領域をどの程度広くとるか、事実上鳥という動物がどの範囲の情報で動いているか等の興味ある課題もある。広くとればとるほど計算負荷も増える。こういう問題を解決していかなければならない。

5. 並列コンピュータのキラーアプリケーション

スーパーコンピュータから並列コンピュータに、時代はまさに動いている。いつでも新しい応用が立ち上がる時にはキラーアプリケーション、魅力的、極めつきの応用が登場し、世界を動かす事になる。この点についての私見を最後に述べてみたい。キラーアプリケーション候補の第一

は、先にも述べたようにスーパーコンピュータの発展としての並列プロセッサ、グランドチャレンジ、1TFLOPSへの挑戦がある。これ自身は明確な応用目的を持つものではないが、人類共通の夢として世界の発展を牽引するものとなりうる。

2番目が、並列システムの有効なグラフィックプロセッサ、あるいはバーチャルリアリティへの応用である。現在は、ゲームの世界での発展がめざましいが、意外に並列プロセッサのキラーアプリケーションになりうると考えている。

3番目にはクラスターパラレルコンピュータという概念が考えられる。最近注目されるようになってきている。その背景はワークステーションやパーソナルコンピュータの高速化が急激で、100MIPS、1000MIPSという性能のコンピュータも数年後には古くなり放置される状況がある。一方でネットワークも高速化してきており、100メガバイト/

秒の HIPPI (High Performance Parallel Interface), ATM (Asynchronous Transfer Mode) LAN 等が広く使われる時代を迎えつつある。急速な世代交代, 既存資産をいかに活用するか。また, クライアント・サーバ・コンピュータリング (CSS) による各種機器を組み合わせ活用する技術の進歩がクラスタパラレルコンピュータを容易にしつつある。

クラスタパラレルコンピュータの概念は次のようなものである。多くのワークステーションは夜中遊んでいるし, あるいは海外出張中の人のワークステーションは使われていない。その使われていないワークステーションやパソコンを開放し, ネットワーク上でそれらを接続しパラレルコンピュータを構成しようというものである。実際, パラレルバーチャルマシンなどの, こういう環境を制御するシステムソフトウェアの開発が進んでいる。あるワークステーションを所有していても, 使っていない場合にはそのワークステーションはだれか他人が使っている, そういう状況が進みつつあるわけである。

もちろん, これには大きな課題がある。システム・ソフトウェアとして全体の構成をいかに管理するか, 資源管理の問題, 研究室内のワークステーション, パソコンの遠隔

制御, 並列化コンパイラ, さらにシステム・セキュリティ等々。各種の問題にもかかわらず大学を中心に応用プログラムの開発も進んでいる。並列コンピュータの意外なキラーアプリケーションとして 5~10 年後の大学研究機関等ではかなり広がる可能性を秘めていると考えられる。いずれにしても, いわゆるグランドチャレンジ以外にも並列コンピュータの可能性はある。まさに 1990 年代から 2000 年代にかけて, 並列コンピュータは非常に重要な役割を担うものと思われる。
(1994 年 6 月 2 日講演分)

参 考 文 献

- 1) The office of Charles and Ray Eames: A COMPUTER PERSPECTIVE (計算機創造の軌跡), アスキー出版局 (1994).
- 2) 加藤満左夫: 並列処理計算機, オーム社 (1976).
- 3) 日本経済新聞社: 超並列のパラダイム, 日経サイエンス 第23巻第8号 (1993.8).
- 4) Office of Science and Technology Policy: Grand Challenges "High-Performance Computing and Communications", Office of Science and Technology Policy (1989).
- 5) International Data Corporation (IDC): U.S. MPP User Audit-Part I, IDC レポート #7913 (1993.8).