

## スーパーコンピュータ案内

反町洋一・玉井哲雄

### はじめに——スーパーコンピュータの歴史——

数年前まではスーパーコンピュータといえば、米国クレイ社の製品である CRAY-1 が世界最高速とされ、われわれスーパーコンピュータの利用者が、導入のための機種選びをするに当っては（筆者の属する三菱総合研究所もそうであったが）クレイ社以外の製品には有力な候補が見当たらないという状況が長い間続いていた。最近では CRAY-1 への挑戦を目指した国産スーパーコンピュータが発表され、大学、研究機関への導入設置がみられる段階になってきた。

多くの科学技術の分野での技術革新の道のりを振り返ってみると、常に新しい方式、製品を創り出してゆく独創的な技術革新と、創り出された製品の製造技術や周辺技術の改良、改善を目指した応用的な技術革新との絶妙な組合せがそのモーメントとなっている。このような視点からみてもわが国大手メーカーによるスーパーコンピュータの開発、発表はこの分野での応用的技術革新として高い評価が与えられてもよいであろう。

近年のスーパーコンピュータの歴史に触れるときには、S. クレイ (Cray) の業績を省略することはできない。米国クレイ社の創設者である S. クレイは当初ユニパック社で大型コンピュータの設計に従事していたが、早い時期にコントロールデータ社に移り、若い技術陣を率いて1964年、当時としては画期的な水準であった CDC 6600、さらにその後継機である CDC 7600 を発表した。1972年コントロールデータ社の開発方針が科学技術計算専用路線から汎用路線に変更されたことから、彼は若い技術陣とともに彼らの永年の夢であるスーパーコンピュータ開発を目指してクレイ社を設立した。1976年第1号機を発表、現在世界各国の研究機関および企業などに約100台設置の実績を上げ、クレイ社をスーパーコンピュータの世界でのトップ企業に築き上げた。

スーパーコンピュータ開発の歴史を振り返ってみると、当初、方式としてはパイプライン方式と、ILLIAC で代表される並列方式のものが開発されてきたが、現状では、実用化されているスーパーコンピュータのほとんどが S. クレイの考案したパイプライン方式を採用しており、この分野における氏の果たした役割りの大きさは計りしれないものがある。最近のスーパーコンピュータ開発のあゆみを10年単位でくくってまとめたものが表1である。

これを見ると過去における熾烈なスーパーコンピュータの開発競争により、10年ごとに

表1 スーパーコンピュータの推移

発表年代	機種	メーカー	演算速度
~1965	CDC 6600	CDC	1~10 MFLOPS
1966~1975	CDC 7600 STAR ILLIAC IV	CDC CDC パロース社	10~100 MFLOPS
1976~1985	CRAY-1 VP-200 H-810 SX-2	クレイ社 富士通 日立 日本電気	100~1000 MFLOPS
1986~	?	?	1000~10 <sup>4</sup> MFLOPS

10<sup>0</sup> MFLOPS, 10<sup>1</sup> MFLOPS, 10<sup>2</sup> MFLOPS 世代のスーパーコンピュータを世に出してきており、近年は 10<sup>3</sup> MFLOPS~10<sup>4</sup> MFLOPS の性能を目指した次世代スーパーコンピュータの開発が待たれる段階に入っている。

### 1. スーパーコンピュータとは

スーパーコンピュータとは、本来、各時代での最高性能を持ったコンピュータを指す言葉である。その意味では、スピードの限界に挑戦して F1 レースに臨むスーパーカーと同じようなものだといってもよい。世間も、ギネスブック的な興味でスーパーコンピュータに注目している、という面がないわけではない。

しかし、F1 レース用の車は普通の道路を走れるわけではなく、走れたとしても制限速度の規制のもとでは、その性能も宝の持ち腐れである。つまり、スーパーカーの実用的価値はあまりなく、自動車メーカーがもっぱら宣伝効果と技術開発への波及効果を狙って開発しているものとみてよからう。一方、スーパーコンピュータの場合には、もっと実際的なニーズの裏付けがある。

商用のコンピュータが開発されて間もない当初、全世界の計算需要は、その当時のコンピュータが6台もあれば満たされるので、コンピュータ・ビジネスの将来は暗いとする予測が、著名なコンピュータ科学者ハワード・エイケン (Howard Aiken) によってなされた。その後の歴史は、コンピュータの世代が変わるごとにその性能が桁違いに向上してきたにもかかわらず、需要のほうはそれを上回るスピードで、より速くより容量の大きなコンピュータを求め続けてきたことを示している。ちなみに、エイケンの予測時に想定されていたコンピュータの能力は、現在のパソコンにすら及ばない。

スーパーコンピュータの利用分野の代表は、科学技術計算である。極言すれば、スーパーコンピュータとは、偏微分方程式を数値的に解くためのコンピュータといってもよい。実際、最初の電子式コンピュータ ENIAC が、1946年に弾道計算用に作られて以来、常に最高速の計算性能を求めてきたのは、この分野である。たとえば、航空機の機体設計のための流体計算、天気予報、プラズマ核融合のシミュレーションなどがその例である。

このような計算が手間のかかる理由は、いくつかある。まず取り扱う偏微分方程式がナビエ-ストークス (Navier-Stokes) 方程式に代表されるように非線形性の高い場合が多く、それを反復計算で解く場合に、収束までに要する繰返し計算回数が、一般に非常に多くなること。次に、微分方程式を解くには何らかの方法により空間を点に分割し、連立方程式に帰着させる必要が一般にあるが、とくに対象が3次元の場合、計算の精度を少しあげようとする、その分割点の数を飛躍的に増大させなければならないこと (たとえば、1次元を100分割したとすると、3次元では100万個の点となり、実質的に100万個の変数の連立方程式を繰返し解くことになってしまう)。さらに求めるのが定常解ではなく、時間の軸が加わると、時間軸は空間以上に細かく刻む必要のある場合が多く、計算量はますます増大する。

天気予報の精度をあげようとする、明日の予報結果が3日後に出るというような笑い話も、このような背景から生まれる。現在のスーパーコンピュータは、このような数値計算を主目標としているという意味で、単に非常に速い汎用コンピュータというより、むしろ一つの特殊なコンピュータのジャンルを形成しているといえることができる。

このことをよく示す一つの例は、スーパーコンピュータの性能を表わす尺度としてよく用いられる MFLOPS という単位である。MFLOPS とは、1秒間に100万回の浮動小数点演算 (Million Floating-point Operations Per Second) を行う速さを1とする。1976年に発表された CRAY-1 は160 MFLOPS、日立の S-810/20 が630 MFLOPS、富士通の VP-200 が500 MFLOPS、そして今年の6月4日に1号機がローレンス・リバモア国立研究所に設置された CRAY-2 が、1200 MFLOPS (あるいは1.2 GFLOPS、G はギガを表す) といわれる。これに対して、汎用コンピュータの処理速度は、MIPS (Million Instructions Per Second) という単位で測られることが多い。すなわち、汎用の場合はコンピュータの基本的な命令 (instruction) の何らかの意味での平均実行速度で測られるのに対し (命令の実行スピードは、その命令の種類により異なるので、それらの使用頻度も考慮し平均をとる)、スーパーコンピュータではその命令の中でも特殊な浮動小数点演算、すなわち実数の加減乗除演算のスピードを測る (一般に通常のコンピュータでは、浮動小数点演算は、整数演算などの他の演算に比べ実行速度が遅い)。

スーパーコンピュータの特異性を象徴するもう一つの事柄は、世界のコンピュータ市場で圧倒的なシェアを誇る IBM が、この分野にいまだに参入していないという事実である。IBM も過去には、今でいうスーパーコンピュータに相当する設計思想をもったコンピュータの開発を目指したことがあったが、それに失敗して以降は商品としてスーパーコンピュータに当るものを出していない。逆に言えば、コントロールデータ社 (CDC) やクレイ社は、IBM の製品系列にはない分野として科学技術用の超高速コンピュータに狙いを付け、それをスーパーコンピュータというジャンルに育ててきたとみることもできよう。

CDC やクレイのコンピュータが、汎用コンピュータとは異なる設計思想 (アーキテクチャ) で作られ、IBM のコンピュータとの間のソフトウェアの互換性 (一方で動くソフトウェアが、そのまま他方でも動くこと) も乏しいのに対して、国産の各メーカー (日立、富士通、日本電

気)のスーパーコンピュータは、浮動小数点演算の高速化技法についてはクレイなどのものを踏襲しているものの、アーキテクチャとしては各社それぞれの汎用コンピュータの延長で考えられており、それらとのソフトウェアの共通性も高い。とくに日立と富士通の場合は、その汎用コンピュータが IBM のそれとかなりのレベルまでの互換性を持つので、IBM で動くソフトウェアが、ほとんどそのままスーパーコンピュータでも動くということがいえる。その意味では、スーパーコンピュータと汎用コンピュータの違いが薄れたわけで、日本のメーカーのこの分野への参入は、クレイよりもむしろ IBM にとって脅威なのではないかという論評すら、米国の一部では行われている。

## 2. スーパーコンピュータの選び方

これを読む読者のうちで、どのスーパーコンピュータを導入しようかと悩む立場の人は、きわめて少ないはずである。なにしろ 20 億~40 億円ほどの買物である。CRAY 1 台の輸入が、最近の日米貿易摩擦がらみで取り沙汰されるほどであり、実際、公社時代の電電が CRAY を入れたのは多分に摩擦解消を目的としたものであったといわれ、また最近の日産自動車による導入も、貿易摩擦に関する配慮が加えられたとの噂がたった。

したがって、車をフェラーリにするか、ボルシェにするかと頭を悩ます人が少ないのと同様に、むしろそれ以上に、スーパーコンピュータの機種選定を現実的な問題とする人は少ないだろう。

しかし、計算センターでの利用となると、話は別である。現在日本では、東大に日立の S-810/20 が、また京大と名大プラズマ研に富士通の VP-100 が設置され、多くの人が使える環境にある。また民間では、CRC(センチュリ・リサーチ・センタ)と三菱総合研究所に CRAY-1 が導入されており、一般ユーザーの計算サービスに供されている。とくに日本の大学でのスーパーコンピュータの利用環境は、米国よりも進んでおり、ネットワーク化されて多くの人々が利用可能な状況にある。米国でも、大学でのスーパーコンピュータ利用の促進を図らなければならないということで、NSF(National Science Foundation)が資金を出して大学関連の研究者用にスーパーコンピュータ・センターをいくつか設置するという計画が進められている。

利用できるセンターがいくつかあり、各々のスーパーコンピュータの機種に違いがあるとしても、重要な選択は、解きたい問題に対してどのスーパーコンピュータを使うかということより、むしろスーパーコンピュータを使うか汎用コンピュータを使うか、ということであろう。

スーパーコンピュータの看板がスピードだから、MFLOPS なる尺度を使ってこの選択の判断ができそうであるが、この MFLOPS がなかなかのくせ者である。まず通常各メーカーが発表している性能としての MFLOPS 値は、理論上のピーク性能を示すもので、よく言われるように瞬間最大風速的な値でしかない。これをもとに判断することには、100 メートルを 10 秒で走れるというデータから、その選手のマラソン・ランナーとしての力を評価するような危険が伴う。

次に問題なのが、プログラムによってスーパーコンピュータ利用による効果の出方が、かな

り異なる点である。これは現在のスーパーコンピュータが、科学技術計算プログラムの処理時間の大半は、ベクトルとベクトルの間の演算の繰返しに費されることを仮定し、そのようなベクトル処理に特別の機構を採用することで、汎用コンピュータよりも優れた性能をあげるといふ設計になっていることからくる。ベクトル処理とは、たとえばベクトル同士のたし算、すなわち、

$$c_i \leftarrow a_i + b_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

のようなものである。通常のコンピュータでは、このような計算は要素ごとの演算（これをベクトル処理に対してスカラー処理と呼んでいる）を  $n$  回繰返すことによって行われる。ほとんどのスーパーコンピュータで採用されているベクトル・プロセッサでは、この要素ごとの演算を、さらに簡単な、かつ同程度の時間を要する  $m$  個の処理ステップに分解し、ベクトルの要素をこれらのステップに次から次へと流すことにより、全体の処理時間を  $n/m$  程度にしようとする（この方法をパイプライン方式と呼ぶ。図1参照）。

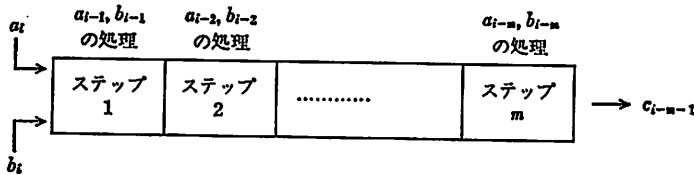


図1 パイプライン方式によるベクトル演算

このようなベクトル処理の占める割合が大きいプログラムは、スーパーコンピュータの性能を充分ひき出すことができるが、スカラー処理の比率が高ければ、普通のコンピュータを使うのと変わらないことになってしまう。そこで、全体の処理時間に対して、ベクトル処理が可能な部分の処理時間の割合（ベクトル化率と呼ばれる）がスーパーコンピュータへの適性を計る目安となるが、この値は解きたい問題だけでなく、プログラムの書き方、それをコンピュータで実行できる形にするコンパイラがもつベクトル化率向上のための機能、などによって変わってくるから、話はやっかいである。

それなら実際の典型的なプログラムを実行させて、その性能をテストしてみるのが一番だというわけで、いわゆるベンチマーク・テストがよく行われる。テスト・プログラムとしてよく使われるのが、リバモア・ループと呼ばれる一連の比較的単純なプログラムである。これは常に最新鋭のスーパーコンピュータを導入してきたローレンス・リバモア研究所が作成したプログラムで、これらのテストの結果では、スーパーコンピュータと呼ばれるマシンの平均性能は、30~100 MFLOPS 程度のものである。

いずれにせよ、スーパーコンピュータを使うことに関心がある場合は、まず簡単なものでよいから自分の持っている問題を解くプログラムで試してみて、その性能を実感することが望ましいであろう。

### 3. スーパーコンピュータの使い道

スーパーコンピュータの用途の例として、機体設計、天気予報、プラズマ計算といったものを前に挙げた。

米国では、軍事目的の利用が大きな割合を占めてきた。とくに原子力兵器開発との関連で、ロスアラモス国立研究所やローレンス研究所は、スーパーコンピュータの大ユーザーである。NASAでもスーパーコンピュータが広範に使われているが、これもある意味では軍事に近い。

平和目的の核利用に関しても、もちろん、スーパーコンピュータが使われる。とくに未来のエネルギーとしての核融合の研究については、数値シミュレーションが不可欠とされる。名古屋大学のプラズマ研究所にいち早く国産のスーパーコンピュータが導入されたのも、このような事情からである。

民間では、ボーイング社などの航空機メーカーが、盛んにスーパーコンピュータを使っている。乱流を含むような流体計算は、技術計算の分野でも最も手間のかかるものの一つであるが、風洞実験にかかるコストよりもスーパーコンピュータによるシミュレーションのほうが安い面もあり、条件の変更のしやすさなどの柔軟性も評価されている。

他に科学技術計算が重要な役割を果たす分野としては、構造物の設計・解析、気象、海洋物理、宇宙開発、分子科学などがある。また変わったところでは、アニメーションという応用がある。実際、アニメの動きをコンピュータで実現するには、膨大な計算量を必要とする。そのため、米国のアニメ会社では、自社でCRAY-1を導入しているところもある。筑波の科学万博では、三菱館で三菱総合研究所のCRAY-1を使ったアニメが放映された。また評判になった富士通館の立体アニメーションの製作では、スーパーコンピュータではなくM380という汎用の（つまりスカラー処理型の）最高速コンピュータを用いて一年を要したという。さらにコンピュータに画像を認識させるという画像認識の分野でも、莫大な計算を必要とし、そのために画像処理に特化したスーパーコンピュータが開発されているほどである。

数学における利用はどうか。たとえば、東大の大型計算機センターのスーパーコンピュータを利用して、 $\pi$ の値が1,600万桁まで計算されており、これは現在の世界記録だという。類似のテーマに、過去に知られている最大の素数より大きな素数を発見するというものがある。これらはまさに、ギネスブック的な挑戦である。もっと理論的に意味のあるものには、四色問題の解決にコンピュータが使われた例などがある（ただしそのコンピュータはスーパーコンピュータではなかった）、それらについては本シリーズの第3巻で紹介されている。

数値計算以外には、スーパーコンピュータは要らないのであろうか。たとえば物理や化学の研究には、微分や積分などの演算を数式のままでとり扱う数式処理が、数値処理に劣らず重要である。これにはまた膨大な計算量を必要とする場合が多いが、現在のスーパーコンピュータは、そのような計算にはあまり向いていない。数式処理を含めた記号的な処理、さらに推論のような高度な知的処理に向けたコンピュータを作ろうというのが現在日本で進められている第5世代コンピュータ・プロジェクトの目的である。米国では、そのような目的の大型コンピュータを、人工知能(AI)スーパーコンピュータなどと呼び始めている。

## おわりに

スーパーコンピュータの技術開発は先に述べたように、米国クレイ社が多くの競争相手に先がけて製品開発を行い、これまで寡占的に市場を支配してきた。このような状況で、わが国の大手メーカーのスーパーコンピュータの発表は、内外に大きな影響を与えている。

現在米国では CRAY-1 より 200 倍速いスーパーコンピュータの開発計画が進行中であるが、この計画は当初 100 倍という目標設定であったのが、わが国のスーパーコンピュータ発表のニュースが入るや否や、直ちに 200 倍に計画の変更を行ったものである。わが国においても通産省を中心とした産学協同により、10 GFLOPS (=  $10^4$  MFLOPS) の性能を目指したスーパーコンピュータの開発が進められている。

今後、日米による激しいスーパーコンピュータ開発競争がくり上げられてゆくことになるわけであるが、スーパーコンピュータの利用者の立場から観れば、この技術開発の競争は、これまでのようにハードウェアの高速性のみを競う競争ではなく、スーパーコンピュータと利用者とのマンマシンインタフェースの改善や、スーパーコンピュータを有効に使うためのソフトウェアの整備蓄積などを含めた、スーパーコンピュータシステムの総合力の間われるものとなってゆかなくてはならない。そしてこれは、スーパーコンピュータ普及のための大きな課題である。

(そりまち・よういち/三菱総合研究所)

(たまい・てつお/三菱総合研究所)

