

# スーパーコンピュータの歩み

小柳義夫  
工学院大学

## History of Supercomputing

by  
Yoshio Oyanagi

### ABSTRACT

February 14, 2006 was the sixtieth anniversary of the opening of the first electronic computer ENIAC. Its computing power was 300 flops, *i.e.* it could calculate 300 floating operations per second. It was an unimaginable high speed and people said that only a couple of such machines would be sufficient for the world. After sixty years the top of the line supercomputer is  $10^{12}$  times faster than the ENIAC. Japanese government is planning to construct a supercomputer which is 30 times more powerful than the current one. The history of supercomputers is described in terms of "generations," each of which consists of five years. Developing strategies of U.S. and Japan are compared.

### 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科学技術用の高速計算機のことである。どの程度の性能のものを言うかは時代によって大きく異なっている。現在のパソコンは初代のスーパーコンピュータより遙かに高速である。

コンピュータを高速化するには半導体のデバイス技術の寄与が大きいが、アーキテクチャ技術としては、ベクトル処理と並列処理が大きな寄与を与えた。初期には両者は独立の技術と考えられたが、次第に両者の技術は融合し並列ベクトル計算機が主流となった。現在では、汎用プロセッサの発達により、ベクトル処理技術は必ずしも主流ではないが、マルチコア技術と結合して別の形で再来しつつある。

スーパーコンピュータはほぼ5年を単位に新しい機種が登場しているので、便宜上5年を1世代として時代を区分することにする。いわゆるメインフレームの世代とは全く別のものであることに注意。概説的な文献を2)-9)に挙げた。日本のベクトル計算機に関する文献は9)を参照のこと。Fernbach<sup>4)</sup>は、初期のスーパーコンピュータについて、ILLIAC IV を第1世代、Star-100を第2世代、Cray-1を第3世代とする世代分けによって論じている。スーパーコンピュータに世代を導入したのはこのFernbachの書が初めてである。

### 2 黎明期 (1970年代頃)

#### 2.1 アメリカの動き

科学技術用の高速計算機を作ろうという動きは1950年代末からあったが、決定的な転機はアメリカ原子力委員会

が1964年各社に根源的に新しいアーキテクチャの計算機の製作を要請したことにある。このころIBM社のSenzigらはベクトル処理を提案し<sup>1)</sup>、石油探査のためIBM 2983 Array Processor (1965)がIBM360のI/Oチャンネルに接続する付加プロセッサとして開発された<sup>10)</sup>。乗算と加算の組合せを4つのステージに分けて実行している。おそらく最初のベクトル計算機ではないと思われる。

1970年代に入ると、ベクトル計算機 ASC (1972, Texas Instruments社、30 MFlops、7機 製作)とStar-100(1973, CDC社、50 MFlops、4機製作)、および並列計算機ILLIAC IV (1973, Burroughs社、並列度64、50 MFlops、1機製作)とBSP (1974設計開始、1980開発中止、Burroughs社、並列度16、50 MFlops)などの計算機が作られた。計算機の性能は64ビット浮動小数演算最大ピーク性能(推定)で示す。年号は原則として完成または出荷年。

ベクトル計算機の歴史は天才的技術者Seymour Crayの名なしには語るができない。Crayは、CDC (Control Data Corporation) 社において、CDC6600 (1964, 1 MFlops) および CDC7600 (1969, 5 MFlops) の設計者であったが、1972年、CDC8600 計画が社内で拒否されると同社を退社し、CRI社 (Cray Research Inc.) を設立した。CRI社は1976年160 MFlopsの性能をもつ Cray-1を出荷し、ロスアラモス研究所などに納入した。ベクトルレジスタを持つ初めてのベクトル計算機であった。わずか4ゲートのICを高密度に実装するという画期的技術でこのような性能を実現したことは驚異に値する。ソフトとしては自動ベクトル化方式を採用したが、コンパイラの性能は十分でなく、

使いこなすには技能が必要であったと言われる。当時、「このように高速な計算機は、世界に数台もあればよい。」などと言われていたが、たちどころに世界中に普及した。日本にも2台納入された。

## 2.2 日本の動き

日本ではどうだったかという、Cray-1が出荷された翌年富士通はFACOM 230-75 APU(1977, 22 MFlops、2機製作)を航空技術研究所に納入した。Star-100などと同じくベクトルレジスタを持たない主記憶直結のベクトル計算機であった。間接参照のベクトル演算をサポートしていた点は注目される。ベクトル記述としてはAP-FORTRANという拡張言語方式を用いている。商業的には成功とは言えないが、日本の最初のベクトル計算機であった。

他方日立は、IAP (Integrated Array Processor)というメインフレームに対する付加プロセッサとしてベクトル演算器を製造した。HITAC M-180 IAP (1978), M-200H IAP (1979, 48MFlops) および M-280H IAP (1982, 67 MFlops) である。これらはベクトルレジスタを持たず、仮想空間上のデータに対してベクトル演算を行うもので、親のメインフレームに対する性能向上はほどほど(数倍程度)であったが、高度な自動ベクトル化コンパイラを装備し、TSSでも使えるなど使い勝手がよく、多数販売された。筆者が最初に利用したベクトル計算機はM-200H IAPであった。間接参照はもちろんのこと、総和、内積、1次漸化式など当時のCray-1がまだ完全にはサポートしていなかった機能を有していたことが特徴である。M-280HIAP は、世界で初めて条件付きdo loopを自動ベクトル化できた。しかしキャッシュに頼ったベクトル演算には限界がありメインフレーム自体の高速化とともにM-680H IAPを最後に姿を消した。日本電気はACOS-1000 IAP (1982, 28 Mflops)を製作し、三菱電機もMELCOM COSMO のIAPを製造した。

## 3 第一世代のベクトル計算機 (1980年代前半)

### 3.1 アメリカの動き

本格的なベクトル計算機が登場したのは1980年に入ってからである。アメリカではCDC社が Cyber 203 (1980, 200 MFlops) と Cyber 205(1981, 400 MFLops)を、CRI社がSteve

Chenの設計により、Cray XMP-2(1982, 630 Mflops)およびXMP-4(1984, 1260MFlops)を出荷した。Cyber 203/205、XMP-2/4はそれぞれ2/4並列の並列ベクトル計算機である。Cyberはこの世代で唯一の主記憶直結のベクトル計算機である。性能は最大構成の理論ピーク性能。

### 3.2 日本の動き

他方日本では、日立がHITAC S-810/20 (1983, 630MFlops)、富士通がFACOM VP-200(1983,570MF)、日本電気がNEC SX-2 (1985, 1300MF) を出荷した。これらはいずれもベクトルレジスタを持つ本格的なベクトル計算機であるが、詳しく見るとアーキテクチャには種々の違いが見られる。S-810は、複数のベクトル演算器が、データ駆動計算機のように非同期に動作しチェイニングを行う。逆にVP-200は複数のパイプラインが論理的には1本のパイプラインに見えるように動作する。またSX-2は、独立なスカラ演算器を持っている。SX-2は実用プログラムから抽出したカーネル(いわゆるLivermore loop)で、世界ではじめて1 Gflopsを達成した。

### 3.3 日米の違い

アメリカのベクトル計算機に対して、当時の日本のベクトル計算機は以下の特徴を持つ。

- a) メインフレームとの互換性：メインフレーム・メーカーがメインフレームの発展としてベクトル計算機を設計したので、制御部は互換性を持つ。
- b) 単一プロセッサ：単一プロセッサに多くのパイプライン(6~8)を装備するアーキテクチャ。アメリカのベクトル計算機は、パイプラインは少ない(1~2)が、並列機(並列度2~4)である。
- c) 大容量メモリ：たとえばXMPは最大32MBなのに対し、日本機は最大256MB。メモリへのバンド幅を大きくするためのインターリーブ技術も重要。
- d) 大ベクトルレジスタ：例えばXMPはCPU当り2KBなのに対し、S810/20やVP-200は64KB、SX-2は80KB。
- e) 間接アドレスベクトル演算が可能：XMPでは途中からサポート。

上記のc)とd)の特徴は、日本のメーカーが半導体の大メーカーであり、自社で高度なチップを製造できたことで実現した。その反面、主記憶が高速であるが容量の小さいXMPなどと比較してベクトル演算の立ち上がりが遅くな

り、短いベクトルでは性能が出ないという弱点を持っていた。しかし、ベクトルレジスタも大きかったので、ループ当りの命令数の多い複雑なループ（アンローリングしたループなど）ではチェイニングが活躍した。半導体技術の面からは、のころは、各社ともメインフレーム製造のために開発した半導体技術を使ってベクトル計算機を製造していた。後にはその順序が逆転する。

なおこの他、CRI社はSeymour Crayの設計によりCray-2 (1985, 1952 MFlops)を、また、富士通はVP-400 (1985, 1140 MFlops)を出荷した。Convex社は、廉価版のベクトル計算機C1 (1985)を出荷し、IBM社はメインフレーム3090への付加型ベクトル演算機VF (Vector Facility、1985、108 MFlops)を製造し始めた。特筆すべきことは、この頃からアメリカで多くのベンチャーが並列計算機の製造を始めたことである。日本ではほとんど皆無であった。

## 4 第二世代 (1980年代後半)

### 4.1 アメリカでの動き

1983年にCDC社はベクトル計算機部門をETA社として独立させ、ETA社は液体窒素冷却のベクトル計算機ETA-10 (1987, 10 GFlops, 並列度8)を開発した。画期的な技術であったがほとんど安定には動作しなかったようで1989年にETA社は閉鎖された。CRI社はXMPの後継にあたるCray YMP (1988, 4 GFlops, 並列度8)を製造した。なお、1989年、Seymour CrayはCRI社を離れ、少数の技術者とともにCCC (Cray Computer Corporation)社を設立し、Cray-3, 4の開発に臨んだ。新聞では、"Seymour leaves Cray."と騒がれた。

### 4.2 日本での動き

日本では、日立がHITAC S-820 (1987, 3 GFlops)を、富士通がFACOM VP2600 (1989, 5GFlops, 並列度2)を、日本電気がNEC SX-3 (1990, 22 GFlops, 並列度4)を出荷した。これらはそれぞれ前の世代のアーキテクチャを継承しつつ、半導体テクノロジーの発展により高速化したものである。なお、S-820はメインフレームM-680Hのベクトル版であるが、VP-2600やSX-3のために開発されたテクノロジーはメインフレームであるM-1800 (1990)やACOS-3800 (1990)に逆に移転されている。なお、富士通と日本電気はアメリカと同様に共有メモリ並列ベクトル機に進出したが、並列度は比較的に小規模にとどまっている。

日本のスーパーコンピュータの性能向上に驚いた米国政府は、1989年、スーパー301条(Omnibus Trade and Competitiveness Act of 1988)の対日適用を決定し、スーパーコンピュータ等三品目を調査対象品目に指定した。米国の公的機関は日本製を一台も購入していないにもかかわらず、日本の政府機関に米国製の購入を迫った。

## 5 第三世代 (1990年代前半)

### 5.1 アメリカでの動き

CRI社は、Cray YMP C90 (1991, 16 GFlops, 並列度16)を出荷した。CRI社は同時に、Alpha chipを使った超並列機T3D (1993)や、FPS (Floating Point Systems)社の遺産を引き継ぐSparcベースのサーバ機CS6400 (1993)をも出荷した。CCC社は1993年、GaAs技術に基づく4プロセッサのCray-3をNCARに納入し作動させた。また1994年Cray-4を発表したが、いずれも商品としては完成せず、1995年破産した。なおSeymour Crayは1996年9月自動車事故に遭い、翌月初めこの世を去った。

この時代の大きな出来事は、並列計算機を製造していた多くのベンチャー企業が倒産するなかで、汎用プロセッサを用いた並列計算機がベクトル計算機を追い越しはじめたことである。CRI社はAlphaチップを用いた超並列機T3D (1993)を開発し、同年IBMも並列計算機SP-1を出荷しこの分野を席卷し始めた。その裏には1991年高性能コンピュータ通信法成立を受けて始まった米国のHPCC計画(1991~96)がある。このころからPC用などの汎用プロセッサの性能が急激に向上し(いわゆる「キラー・マイクロの来襲」)、これを用いたクラスタが急速に発展した。

### 5.2 日本での動き

さて日本では、日立がS-3800 (1993, 32 GFlops, 並列度4)を、富士通が、分散メモリ並列ベクトル機VPP-500 (1993, 1.6 GFlop/proc., 最大並列度222)を、日本電気は32まで共有メモリ可能な並列ベクトル機SX-4 (1995, 2 GFlops/proc., 最大並列度512)を出荷した。100を超える並列度では、最大構成はカタログの上だけで、実際には出荷されていないことが多くなるので、プロセッサ毎またはノード毎の性能を示す。半導体テクノロジーとしては、S-3800はバイポーラ、VPP-500はCMOSとGaAsの混合、SX-4はCMOSである。この時代に日本のベクトル機は大きく変貌

した。日立は共有メモリ並列ベクトル機を製造する一方、富士通は航空技術研究所とともに開発したNWT（数値風洞）の技術をもちいて分散メモリ高並列ベクトル計算機を商品化した。日本電気は、32プロセッサまでは共有メモリであり、それを相互接続するアーキテクチャを実現した。またOSとしてunixを採用した。

## 6 第四世代(1990年代後半)

### 6.1 アメリカでの動き

CRI社はベクトル計算機としてはC90の後継機T90 (1995, 57.6GFlops, 並列度32) を出荷し、超並列としてはT3E (1996, 並列度2048) を出荷したが、1996年にSGI (Silicon Graphics Inc.)社に吸収され、そのCray部門となった。吸収後にCMOSのベクトル計算機CraySV1 (1998, 38 GFlops, 並列度8) を出荷した。また、いわばT3Eの後継機として、1996年MIPSプロセッサを用いたccNUMAの超並列機Origin 2000を出荷した。

アメリカでは、1995年から原水爆の貯蔵、爆発のシミュレーションを目的にASCI計画(現在はASC)が始まり、ロードマップに従って汎用プロセッサを用いた超並列計算機を次々に設置し始めた。Intel社はSandia国立研究所にPentium Proを用いた超並列機ASCI Redを納入し (1997年, 1.8 TFlops)、次節で述べる筑波大学のcp-pacsから首位の座を奪い返した。続いてIBM社はLivermore国立研究所にPowerPC 604eを用いたASCI Blue Pacific (1998, 3.8 TFlops, 並列度5808)を、SGI社はLos Alamos国立研究所にASCI Blue Mountain (1998, 3.0 TFlops, 並列度6144)を納入した。ASCI計画で開発された計算機の多くは商用化され、米国の科学技術インフラとなった。

### 6.2 日本での動き

他方日本では、富士通はVPP500をCMOS化したVPP300 (1995, 2.2 GFlops/proc. 並列度16) およびVPP700 (1996, 2.2 GFlops, 並列度256) を出荷した。さらにその上位機VPP5000(1999, 9.6 GFlops/proc. 並列度 512)を出荷した。日本電気は、SX-5 (1998, 8GFlops/proc. 並列度512) を出荷した。これらは伝統的なベクトル計算機である。日立はこれを離れ1996年筑波大学とcp-pacs (614 GFlops) を共同開発してTop500の首位を取るとともに、その技術を用いた超並列計算機SR2201を商品化した。続いて後継機

SR8000(1998, 8 GFlops/node, 最大 128nodes)、上位機SR8000F1 (2000, 12 GFlops/node) を出荷した。なお、SR8000のノードは8個のプロセッサ (制御用を入れると9個) のSMPである。

### 6.3 日本とアメリカの違い

この時代、アメリカがCrayを除き汎用プロセッサの超並列機の方角に開発を進めて行くのに対し、日本では日立は超並列に移行したものの、富士通と日本電気は並列ベクトルの路線を堅持した。CrayがSGI社の一部門としてベクトル路線を継続できるのか心配する声もあった。

## 7 第五世代 (2000年代前半)

### 7.1 アメリカでの動き

アメリカではASCI計画が進行した。IBM社がLivermore国立研究所にPower 3に基づくASCIWhite (2000, 12.3 TFlops, 並列度8192) を、DEC社を吸収したCompaq社を吸収したHP(Hewlett-Packard)社が、Los Alamos国立研究所にAlphaチップに基づくASCI Q (2002, 20TFlops, 並列度8192) を納入した。SGIは2000年、Cray部門を名前ともどもBurton SmithのTera社に売却し、Tera社はCray Inc. となった。Cray Inc. はSV1の後継機として、X1 (2002, 12.8GFlops/proc., 並列度4096) を出荷した。

### 7.2 日本での動き

日本での最大のニュースは日本電気製の地球シミュレータ(2002, 40 TFlops, 並列度 5120)が稼働し、世界最高速の計算機となったことである。ちきゅうシミュレータは2004年まで2年半の間、世界の首位を保った。日本電気は、この技術を基にベクトル計算機SX-6 (2002, 8 GFlops/proc., 並列度1024) および SX-7 (2003, 8.83GFlops/proc., 並列度2048)、SX-8を出荷した。一方、これまで分散メモリ型ベクトル計算機VPPシリーズを製造してきた富士通はベクトル機を離れ、Sparc64 Vに基づく超並列計算機に移行した。最上位機種は、PRIMEPOWER HPC2500 (2002, 5.2 GFlops/proc., 並列度16384) である。日立はSRの路線を継続し、SR11000 (6.8 GFlops/proc. 並列度4096) を発表した。

## 8 まとめ

ベクトル処理は、メモリレイテンシを隠蔽し定型演算を高速に実行する優れた技術であり、多くの科学技術計算

に適している。一時は、スーパーコンピュータと言えばベクトル計算機を指した時代があった。しかし、専用のプロセッサと高バンド幅のメモリシステムを製造する必要があり、高価につく。他方、1990年代から登場した汎用プロセッサを用いた超並列処理は、プロセッサが大量生産品であるため安価であり、演算性能も驚くほど向上してきた。ネックと思われていたバンド幅も、ベクトル計算機に近付きつつある。

わが国はベクトルでは先端を走っていたが、その反面超並列処理への参入は遅かった。そのため、地球シミュレータは2年半に渡って首位を保ったが、その間上位にある日本の計算機の数も激減した。一点豪華主義では科学技術の健全な発展は望めない。他方米国はBlueGene/Lを含むASC計画の計算機のみならず、多数のスーパーコンピュータを国内に設置しており、日米の格差は急速に広がりがつつある。

わが国でも京速計算機計画が進められているということに期待するところが大きい。過去への反省をふまえて、一点豪華主義ではない階層的なインフラの整備と、ロードマップに基づく長期的な視野をもった立案を望みたい。

#### 参考文献

- 1) D. N. Senzig and R. V. Smith, "Computer Organization for Array Processing," AFIPS Proc. FJCC, vol. 27 (1965) pp. 117-128.
- 2) 村田健郎他著「スーパーコンピューター科学技術計算への適用」(1985年、丸善)
- 3) 富田眞治著「並列計算機構成論」(1986年、昭晃堂)
- 4) S. Fernbach著長島重夫訳「スーパーコンピュータ」(1988年、パーソナルメディア)
- 5) 長島重夫・田中義一著「スーパーコンピュータ」(1992年、オーム社)
- 6) John P. Riganati and Paul B. Schneck, "Supercomputing," IEEE Computer (October 1984) pp.97-113.
- 7) Carl S. Ledbetter, "A Historical Perspective of Scientific Computing in Japan and the United States," Supercomputing Review, November 1990, pp. 31-37 (December 1990) pp. 48-58.
- 8) Raul Mendez, "Japanese Supercomputers: An Overview,"

in High Performance Computing, Research and Practice in Japan, Raul Mendez ed., Wiley (1992) pp. 3-6.

- 9) Y. Oyanagi, "Development of Supercomputers in Japan: Hardware and Software," Parallel Computing 25 (1999) pp. 1547-1567.
- 10) J. F. Ruggiero and D. A. Coryell, "An Auxiliary Processing System for Calculations," IBM Systems Journal, Vol. 8, No. 2 (1969) pp.118-135.