

スーパーコンピュータの現状と展望

堀越 彌・長島重夫

1. はじめに

近年、膨大な科学技術計算を必要とする原子力、核融合、気象予測、資源探査等の多くの分野で高速コンピュータへの要求が高まってきている。一方では、半導体技術の進展によって高速コンピュータの実現がより容易になってきており、このような背景から、きわめて高速に多量の計算を実行するスーパーコンピュータが、脚光を浴びている。

一般にスーパーコンピュータの名称は、その時代の最上位の汎用コンピュータよりも格段に高速の処理を可能とするコンピュータに冠せられるものである。現在、汎用コンピュータの最上位機種は10~20MIPS (Million Instructions Per Second; 10^6 命令/秒)の性能を有している。これに対し、現在の定義では、スーパーコンピュータとは、50MFLOPS (Million Floating Operations Per Second; 10^6 演算/秒)以上の演算能力を有するコンピュータをさすようである。一般に2~2.5命令が1演算に相当するので、MFLOPSの2~2.5倍がMIPSになる。したがって、スーパーコンピュータは汎用コンピュータに比べて5~10倍以上高速であるといえる。スーパーコンピュータの性能指標としてはMFLOPSを使用するのが一般的であるが、これは1秒間に何命令処理できるかよりも何演算実行できるかを重視するた

めである。

現在、世界最高速のスーパーコンピュータは600MFLOPS、すなわち毎秒6億回の加算や乗算が可能である。しかし、これでも利用分野側の高い要求、たとえば1回に 10^{14} 演算を必要とする場合、その計算に約2日を要する。このような要求に応えるべく、 10^{10} 演算/秒が可能なスーパーコンピュータの開発が、通産省の大型プロジェクトで進められている。

一方、スーパーコンピュータの利用分野は単に科学技術計算にとどまらず、社会科学をはじめ、コンピュータ・アニメーションといった分野にまで広がりつつある。以下では、スーパーコンピュータの高速処理方式を中心に、その現状と今後の展望について述べる[1]-[12]。

2. 高速演算方式とスーパーコンピュータに要求される技術

一般に科学技術計算では次のような“繰返し演算”が計算全体の多くの部分を占める。

$$A_i = B_i * C_i + D_i \quad (i=1, N)$$

このような繰返し演算を汎用コンピュータでは、図1(a)のように処理する。すなわち、1つの*i*の処理について、6命令を必要とし、*i*が1から*N*まですべてを処理するには6*N*命令という多数の命令を要することになる。ここで $A_i, B_i, C_i, D_i, (i=1, N)$ のデータ(全体をまとめてベクトル A, B, \dots と呼ぶことにする)は主記憶上に規則正

ほりこし ひさし、ながしま しげお 日立製作所

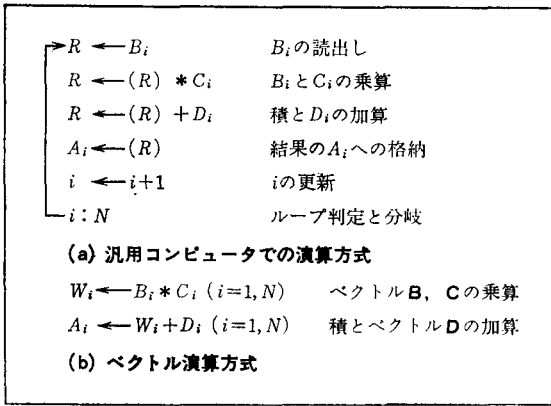


図1 $A_i = B_i * C_i + D_i (i=1, N)$ の演算方式

しく配列されて格納されるのが一般的である。この主記憶上のデータ配列の規則性、すべてのデータに対して同一演算をほどこすという画一性、および、ある i と他の i の間は独立に処理できるという演算並列性を利用して全体の計算をベクトル A, B, C, D 間の計算として一括処理し、高速性を実現しようというのが、ベクトル演算方式である。ベクトル演算では図1(b)のように2つのベクトル命令に簡約化され、汎用コンピュータの $6N$ 命令に比べ高速化が可能になる。しかし、ベクトル演算できない部分もあり、このような処理はスカラ演算と呼ばれる。

ベクトル演算の処理方式はパイプライン演算と並列演算の2つに分けられる。いずれも高速演算方式の基本となるものである。まず、パイプライン演算の一例を図2に示す。ここでは1つの演算器が n 個のステージに分割され、データが次々と各ステージを移動しながら処理される。ある時点で見れば n 個のデータを同時に処理していることになる。1ステージでの実行時間は、たとえば代表的スーパーコンピュータ CRAY-1では12.5nsで、1つの演算器は毎秒8000万回、すなわち80 MFLOPSの能力をもつことになる[7]。演算器にデータを供給するための主記憶からのデータの読出し、および演算結果の主記憶への格納もこの演算速度に見合うようにせねばならない。一方並列演算では、図3に示すように N 個の演算器を並

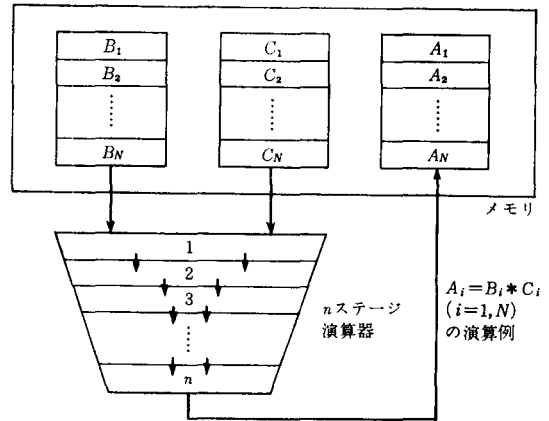


図2 パイプライン演算方式による $A_i = B_i * C_i (i=1, N)$ の演算例

列に設けて同時に演算する方式である。現在のところ、商用化されているスーパーコンピュータはすべてパイプライン演算方式を採用している。

ところで先に述べた繰返し演算は比較的単純なものであった。しかし実際に科学技術演算で使用される繰返し演算はこのような四則演算のみならず、条件文(IF文)を含むもの、インデクス i がさらにベクトルであるような間接インデクス(たとえば $A_{ji} (i=1, N)$)を含むものなど複雑な演算があり、繰返し演算のすべてをベクトル演算化するのはむずかしい。ここで、あるプログラムをスカラ演算で実行した時の実行時間を T 、この中でベクトル演算が可能な部分の実行時間を T_V とすると、 T_V/T をベクトル処理比率と呼ぶ。ベクトル演算部分はスカラ演算に対し P_V 倍高速に処理できたとすると、このプログラムの処理はベクトル

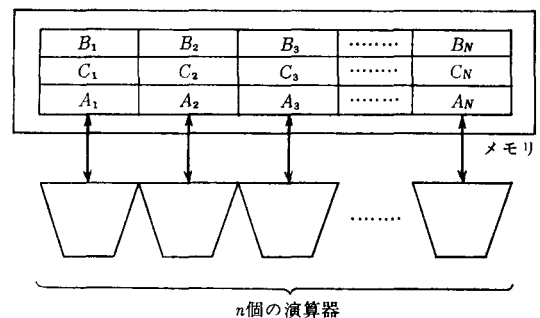


図3 並列演算方式による $A_i = B_i * C_i (i=1, N)$ の演算例

化により,

$$P = \frac{T}{(T - T_V) + T_V / P_V} = \frac{1}{(1 - \alpha) + \alpha / P_V}$$

と, P 倍性能向上したこととなる. ここで α は T_V / T で定義したベクトル処理比率である. これからわかるように α が 1 に近くないと, すなわちベクトル処理比率が十分高くないと総合的な処理性能 P は向上しないことがわかる.

以上の考察から高速処理を実現するには, 次の技術が重要である.

- (1) ベクトル処理比率の向上
- (2) ベクトル演算性能の向上
- (3) スカラ演算性能の向上

この他, 主記憶, 入出力装置なども性能に大きな影響を与えるが, スーパーコンピュータではこれらの点について最大限の努力を払った設計がなされている.

3. スーパーコンピュータの現状

3.1 スーパーコンピュータの推移

現在までに出荷または発表された代表的コンピュータの最大性能と出荷年度の関係を図 4 に示す [6]. スーパーコンピュータも汎用コンピュータと同様, いくつかの世代に分けられる. 第 1 世代としては, 1972-73年に稼動した Texas Instruments 社の ASC (Advanced Scientific Computer), Control Data 社 (CDC) の STAR-100, Burroughs 社の ILLIAC IV がある. いずれも 50~80MFLOPS の性能を有している. 第 2 世代は Cray Research 社の CRAY-1 から始まる. CRAY-1 は 1976 年から出荷され, これまで 50 倍以上が世界中で稼動している. 日本にも 2 台設置されている. 第 1 世代の各マシンが高々数台しか設置されなかったことを考えると, はじめて商業的に成功したコンピュータといえる. 第 2 世代にはこの他に CDC の CYBER-205 がある. 以上のコンピュータはいずれも米国で開発されたもの

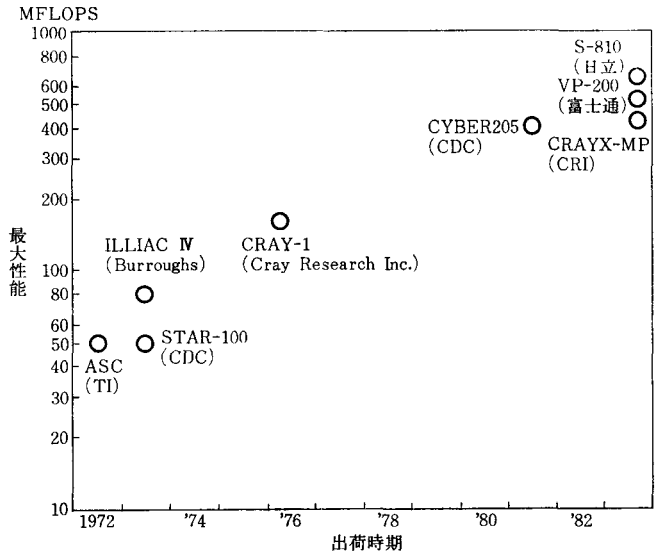


図 4 スーパーコンピュータの性能の推移

であるが, 1982年夏に富士通, 日立がはじめて国産のスーパーコンピュータを発表した. 同年春に発表された CRAY X-MP と合わせて 第 3 世代を形成しつつある.

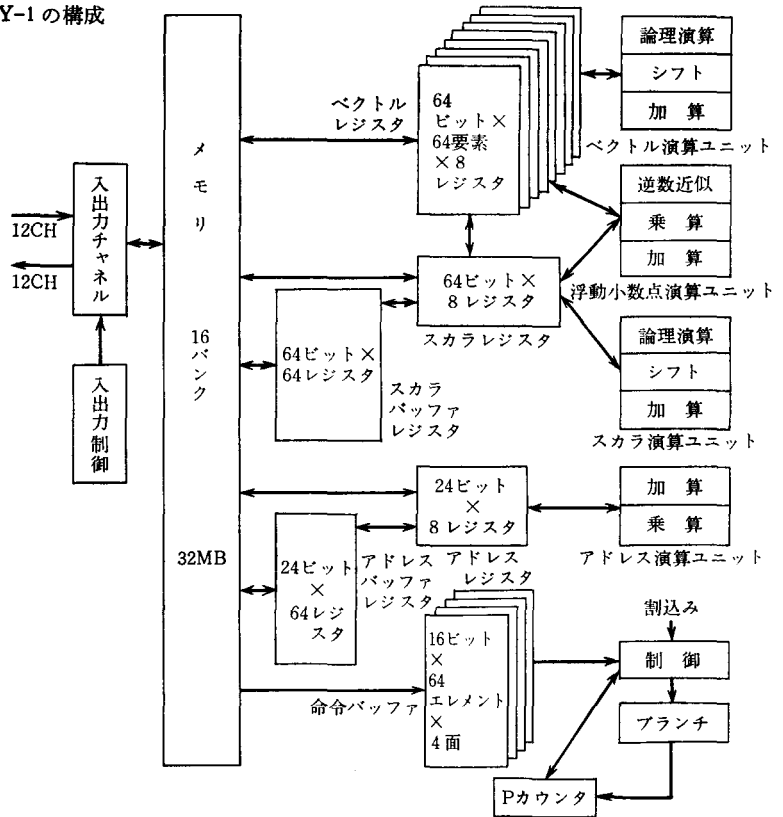
3.2 スーパーコンピュータの紹介

3.2.1 CRAY-1 [7]

CRAY-1 は CDC を退職した Dr. Seymour Cray が開発したマシンで, 図 5 の内部構造に示すように, CDC 在職中に開発した 6600/7600 のアーキテクチャを発展させ, ベクトル演算を可能としたものである. CRAY-1 の特色は次の点にあるといえよう.

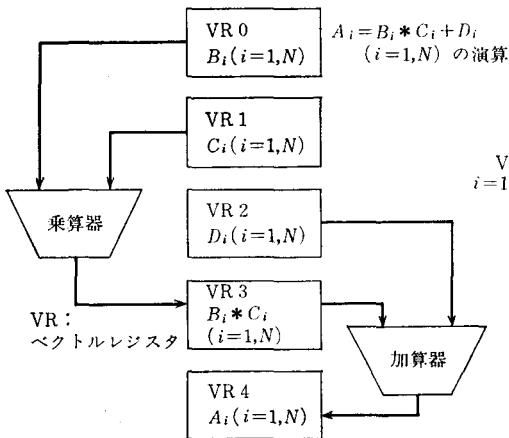
- (1) マシンサイクル 12.5ns の実現: CRAY-1 出荷と同時期の汎用コンピュータのマシンサイクルが 30~80ns であることを考えると, 12.5ns の値は驚異的であった. これによってベクトル演算, スカラ演算ともに高速処理を実現している.
- (2) ベクトルレジスタの導入: 従来は主記憶上のベクトルデータを直接参照していたが, CRAY-1 では演算の中間結果を保持できるベクトルレジスタを導入し, 高速化を実現した.
- (3) チェイニングの実現: チェイニングとは図

図 5 CRAY-1の構成

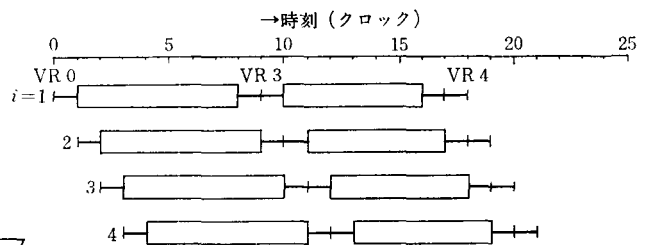


6に示すように、ある演算器の演算結果をベクトルレジスタに格納すると同時に他の演算器へも供給し、より高度の並列処理を可能とするものである。これによって、乗算結果にさらに加算するような演算の場合でも1クロ

ックピッチのパイプライン演算が実現できる。CRAY-1では1つの演算器で80MFLOPSの性能を有するので、2つの演算器の同時動作により160MFLOPSの性能が発揮できる。



(a) チェイニング動作



(b) チェイニング動作のタイムチャート

図 6 CRAY-1のチェイニング動作

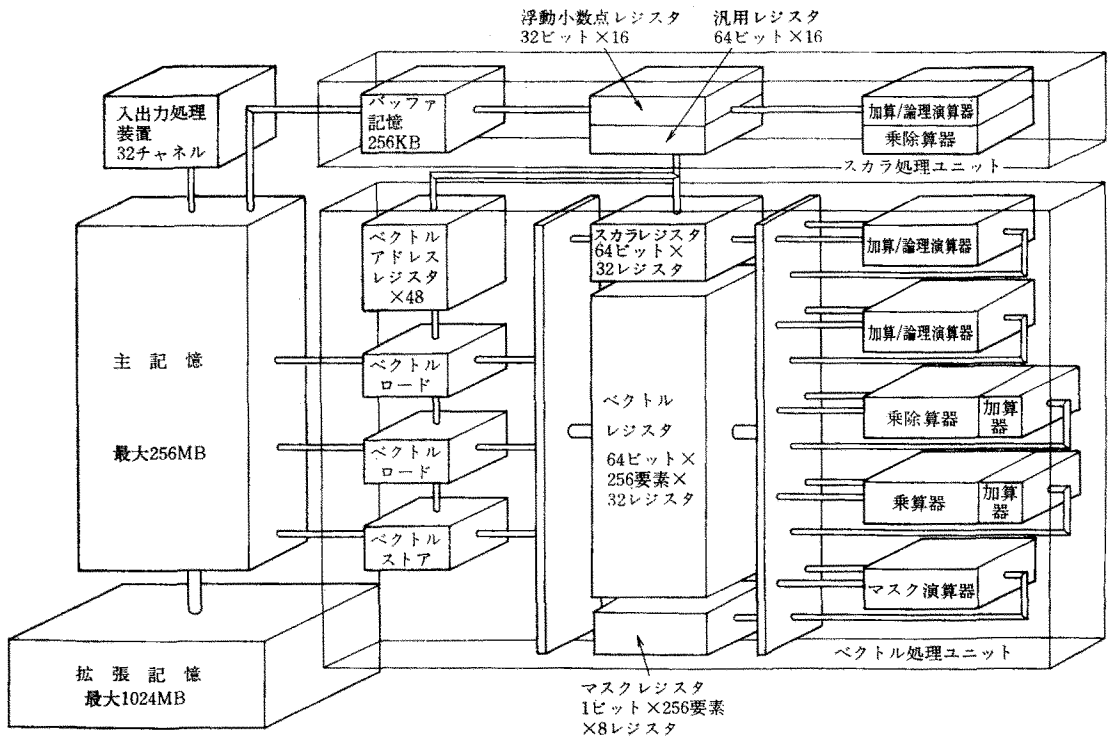


図 7 S-810 の構成

(4) 高速大容量主記憶：4 Kビットバイポーラ RAM の採用によりサイクルタイム 50ns の 32MB 主記憶を実現している。

3.2.2 S-810 [12]

S-810 は1982年 8月に日立製作所より発表された最新のスーパーコンピュータで、パイプライン演算方式の上にさらに新しい技術を取り入れ、現時点で世界最高速の性能を実現している。図7に S-810 の内部構造を示す。特徴的新技术は次の点である。

(1) 並列パイプライン演算方式の採用：パイプライン処理が可能な演算器を複数個設け、複数命令の並列実行を可能とし、最大630MFL OPS の性能を実現している。

(2) 豊富なベクトル命令セットの実現：四則演算用のベクトル命令の他に、内積、総和等のマクロ命令、条件付ベクトル演算用命令、間接インデクス用ベクトル命令等、ベクトル処理比率を向上させるためのベクトル命令83命令を有している。

(3) 高速大容量主記憶と高速主記憶参照の実現：高密度メモリモジュールの開発により、最大256MBの主記憶を実現している。また、主記憶とベクトルレジスタ間のデータ転送回路を複数個設け、ベクトルデータ参照のスループットを向上させている。

(4) 大容量拡張記憶装置の接続：高集積半導体メモリを利用した拡張記憶装置を開発し、ディスクを使った場合の性能上の隘路を解決し高速化を可能としている。拡張記憶装置は最大1GB(1024MB)の容量を有し、主記憶との間で1000MB/秒の速度でデータ転送が可能である。

3.3 スーパーコンピュータのソフトウェア

[8]

スーパーコンピュータではベクトル演算方式を採用しているために、逐次処理を前提としている FORTRAN 言語等はそのままでは使用できない。一方、FORTRAN 言語は長期にわたる普及により膨大なプログラムの蓄積があり、また多く

のユーザーが使用している状況にある。このような状況の下で FORTRAN 言語でスーパーコンピュータを使用するための次のような種々のソフトウェア上の工夫がなされている。

- (1) システム関数/サブルーチン方式：システム側で用意したベクトル演算向け関数またはサブルーチンをユーザーに指定させる方式である。
- (2) 言語拡張方式：ベクトル演算向きの言語仕様を従来のプログラム言語に追加する方式である。
- (3) 自動ベクトル化方式：従来言語仕様で記述されているプログラム中からベクトル処理可能部分をコンパイラが検出してベクトル命令コードを生成する方式である。

各スーパーコンピュータでは、FORTRAN 言語をベースに上記のアプローチを適宜組合せたコンパイラが提供されている。なかでも第3の自動ベクトル化方式は最も高度なコンパイラ技術が必要とするが、従来と同一プログラムが使用できるというメリットがあり、大部分のスーパーコンピュータで採用されている。

4. スーパーコンピュータの展望

4.1 ハードウェア技術

スーパーコンピュータの性能を今後とも改善していくためには、多くのハードウェア上の問題を解決しなければならない。その1つに論理素子、記憶素子の高速化がある。現在主流となっているシリコン素子は、発熱/冷却の制限から、いずれスピードの改善が頭打ちとなると見られている。このため、通産省大型プロジェクトの超高性能科学技術計算システムでは、目標性能 10 GFLOPS (10⁶MFLOPS)を実現するための新素子の開発を進めている。新素子としてはジョセフソン接合素子、HEMT (高電子移動度トランジスタ)素子、ガリウム砒素素子が中心となっている[11]。いずれの素子も現在開発途上にあるが、いずれはシリ

コン素子を凌ぎ実用に供されていくであろう。

一方、記憶素子の高集積化については現在の 64K ビットの集積度から 256K, 1M, 4M ビットと 4 倍のピッチで高集積化がはかられていくと予想されており、記憶容量の制約は徐々に解決されていくと考えられる。

スーパーコンピュータのアーキテクチャ面から今後の進展を予想すると、パイプライン演算方式も限界があるとの指摘もある。CRAY-1 はマシンサイクル 12.5ns でパイプライン演算しているが、この性能を10倍にするためにマシンサイクルを1/10とすることは半導体技術からみて困難と思われるためである。これを解決するには多数の演算器を配列する並列演算方式が有力である[10]。その他、スーパーコンピュータの今後の課題としては、ベクトル処理できない部分の処理の高速化が残されている。この部分は従来の逐次処理を行なわざるを得ないわけであるが、逐次処理の性能はベクトル演算性能よりもはるかに遅く、両者の差は開く一方にある。

4.2 ソフトウェア技術

ソフトウェア技術の面では、今後とも FORTRAN 言語を主体にそのコンパイラ技術を発展させていく方向であるが、ベクトル演算を意識しないで作成したプログラムに対し、自動ベクトル化によってのみ処理の高速化をはかるのは困難であろう。今後は言語仕様の拡張によりユーザーにベクトル演算を意識させることが必要であり、FORTRAN 言語仕様にベクトル演算を導入する方向で現在、米国で FORTRAN 8X の検討が進められている。さらには、プログラムのアルゴリズム自体をベクトル演算向きに改善していくことが重要である。従来のアルゴリズムは、ややもすると演算回数を減少させる方式に主眼を置き、必ずしもベクトル演算を指向したものではなかった。プログラムの処理速度の短縮のためには演算回数の多少よりもベクトル演算の可否のほうが重要である。

5. おわりに

以上、スーパーコンピュータの現状と今後の展望について概観してみた。本文で述べたスーパーコンピュータは科学技術計算用ベクトル/アレイプロセッサに限定しているが、このほかにもマルチプロセッサ形式のスーパーコンピュータとして米国 Denelcor 社の HEP (Heterogeneous Element Processor) や Lawrence Livermore National Laboratory で開発中の S-1 がある。また米国 NASA の NASF (Numerical Aerodynamic Simulation Facility) プロジェクトで風洞実験シミュレーション用に計画中の NSS (Navier Stokes Solver, 目標性能1000MFLOPS

特集に当って

村越 稔弘

スーパーコンピュータ幕明けの CRAY-1 が開発されて6年、わが国でも今秋、富士通、日立から出荷される予定であり、スーパーコンピュータ時代に突入した。

現在、わが国では三菱総研、CRCで2台のCRAY-1が稼動しており、構造解析、原子力計算、流体力学、回路解析等多くの大規模解析に利用されている。スーパーコンピュータのベクトル処理の高速度のメリットは他の分野においても十分活用可能であり、今後応用分野は着実に増えていくことが予想される。

ORにおいても、ベクトル処理は多くの場面で現われることから、スーパーコンピュータが広く利用される日も遠くないと思われる。

本特集では、日立製作所の堀越、長島氏にスーパーコンピュータの入門的解説を、三菱総合研究所の熊野氏、センチュリ・リサーチセンター(CRC)の片山氏には利用の立場からスーパーコンピュータの応用事例を紹介していただいた。スーパーコンピュータの威力の一端でもご理解いただければ幸いである。(早稲田大学)

以上)もある。さらには、国内外の研究機関で各種の並列プロセッサやデータフローの概念を取入れたスーパーコンピュータの研究開発が進められており、スーパーコンピュータに対する期待はますます高まる一方である。現在進められている大型プロジェクトの成功がさらに科学技術計算の新しい分野を切り開くことは間違いない。将来、市場に数多くのスーパーコンピュータが提供され、これが科学技術の進歩、ひいては社会全体の発展に寄与することを願うものは筆者1人だけではないと信ずる。

参考文献

- [1] Fernbach, Sidney: 米国でのスーパーコンピュータの利用分野—現状と将来。日経コンピュータ, 1981, 12, 28, 116-125
- [2] 堀越彌: 電算機の発達と計算実験の将来。塑性と加工, 22, 250(1981), 1055-1056
- [3] 元岡達: スーパーコンピュータの現状と展望。情報処理, 22, 12(1981), 1103-1110
- [4] 村田健郎: 電子計算機と有限要素法。日本応用磁気学会誌, 5, 5(1981), 266-274
- [5] 中沢喜三郎, 小高俊彦: 最近の超高速コンピュータの動向。日本物理学会誌, 34, 7(1979), 581-589
- [6] 小高俊彦, 河辺峻: 超高速演算の動向。情報処理, 21, 9(1980), 927-937
- [7] Russel, R. M.: The CRAY-1 Computer System. Communication of ACM, 21, 1(1978), 63-72
- [8] 梅谷征雄, 高貫隆司, 安村通晃: 技術計算プログラムの自動ベクトル化技術。情報処理, 23, 1(1982), 29-40
- [9] 山田博: 超大型科学用コンピュータ(スーパーコンピュータ)。日本航空宇宙学会誌, 28, 318(1980)
- [10] 科学技術計算用コンピュータにおける高速化手法。日経エレクトロニクス, 1981, 8, 3, 122-136
- [11] 特集, 将来のスーパーコンピュータに挑む超 LS I。日本の科学と技術, 22, 207(1981)
- [12] HITAC S-810 アレイプロセッサ。日立製作所(1982)