



マイクロプロセッサの動向

寺 田 浩 詔*

1. はじめに

マイクロプロセッサとそれに関連する大規模集積回路 (LSI) の国内市場規模は 1973 年の約 30 億円から年毎に倍増を重ね、1975 年には 120 億円の水準に達したと推定されている。しかもこの間に、年率約 30% と見られる LSI 価格の低下があることを考えあわせれば、いかに出荷量が急増しているかがうかがえる。この爆発的な需要増大は、情報処理固有の分野のみならず、精密機械・化学工業などの工業分野、家庭用の製品を含む広汎な分野に応用されはじめたことによるものである。マイクロプロセッサはいまや全ゆる産業分野に影響を与える存在であると言っても過言ではない。

本稿は、このような状況をふまえて、マイクロプロセッサの現状と特徴を易しく解説しようとするものである。

2. LSI 技術の進歩とマイクロプロセッサ

マイクロプロセッサの爆発的な需要増大の要因としては、LSI の高密度化に伴う信頼性の向上、電力消費の減少、小形化、さらには価格低下によって需要が刺激され、これによって本来大量生産に支えられる LSI 製造工程の改善が一層促進されるという相乗的な効果を生みだされたことにある。本節では、マイクロプロセッサとそれに関連する機能部品の LSI 化の現状を簡単に述べる。

2. 1 マイクロプロセッサ

— 論理処理機能の LSI 化 —

マイクロプロセッサは、マイクロ CPU (Central Processing Unit ; 中央処理装置の略) あるいは 1 チップ CPU などとも呼ばれるように、いわゆるコンピュータの中核である CPU 機能を 5 ~ 7 mm 角、厚さが約 0.2 mm 程度の半導体小片 (チップ) 上に集積化したものを指

し、一般には 1 チップ内に CPU 機能がすべて集約されていることが多い。

CPU の主要な機能は次の 2 つである。その第 1 は 2 進表記法によるデジタルデータに対する算術演算および論理操作を論理、演算機能 (Arithmetic & Logic Unit ; ALU と略す) であり、第 2 は ALU にその諸機能の実行を逐次指示するための制御機能である。前者の論理的な複雑さは、同時に並列処理するビット数 (並列処理幅) および実行可能な基本算術・論理演算 (プリミティブ) の種類でほとんど決まり、後者のそれは、プリミティブの逐次実行制御過程の複雑さ、すなわち処理命令 (機械語命令) の能力に大きく依存する。

論理機能の複雑さは、その実現に要する基本 (2 入力) 論理ゲート数で一般に表現される。ごく大ざっぱに言って、もっとも簡単な 4 ビット並列処理の CPU でもすくなくとも 7 ~ 800 ゲート、やや複雑な機能をもつ 16 ビット並列処理のものでは 4,000 ゲート程度を必要とする。

現在のマイクロプロセッサの論理素子は、一般のトランジスタ (バイポーラ形) とまったく異った動作原理をもち、平面形に展開し易い MOS (Metal-Oxide-Semiconductor/Silicon) 構造の電界効果トランジスタが主流である。基本的な 2 入力論理ゲートがほぼ 3 トランジスタに相当するとみれば、マイクロプロセッサの実現には一般に 2,000 個ないし 10,000 個以上の MOS 形トランジスタを 30 ~ 40 mm² のチップ上に集積化する必要がある。

ごく小さいチップ上に多数のトランジスタを配置し、それらを相互にアルミニウム蒸着膜による配線で結んで所要の機能を実現するためには最小幅が 5 ~ 6 μ (ミクロン) 程度の微細な幾何的パターンを処理しなければならない。現在では現寸のパターンをもった数枚の露光マスクを用い、光化学的な蝕刻 (エッチング) の技

*寺田浩詔 Hiroaki TERADA 大阪大学工学部、電子工学科、教授、工学博士、電子工学

術によって、約3インチ径のシリコン単結晶薄板（ウェファ）上に多数のチップを一時に加工する方法が主としてとられている。したがって LSI の製造工程には、材料のみならず高度の光学、光化学および精密研磨の応用による超精密加工技術が必要とされ、マイクロプロセッサはまさに近代的な技術の総合の産物である。

最初のマイクロプロセッサ（INTEL 社、4004、1971年）は4ビット並列処理のものであったが、技術の急速な進歩によって、現在では8ビット並列処理のものが中心となっている。さらに、従来ミニコンピュータの標準とされていた、16ビット並列処理の CPU もいくつか出現し、16ビットマイクロプロセッサは、ほぼ下位のミニコンピュータに匹敵する命令体系を持ち、その処理速度も一般のミニコンピュータの約 $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{4}$ 程度の水準に達している。

マイクロプロセッサの大きな特徴は、4、8、12および16ビットなど各種の並列処理幅のものが目的に応じて選択できることにある。マイクロプロセッサのひとつの発展の方向は、広い処理幅と複雑な処理能力を持つ CPU の開発にあることはもちろんであるが、従来の小～中規模集積回路（SSI～MSI）による構成法では、MSI 化された ALU 部に対して基本的な制御機能部が相対的に大きくなるために、実用的にはほとんど顧みられなかった4、8ビット程度の並列処理幅の CPU をごく小形に実現し、これに強力な処理能力を与えたことに非常に重要な意味がある。したがって、並列処理幅のより大きいものが、より小さい処理幅のものの応用分野を侵すという関係にはなく、それぞれ固有の適用範囲をもっている。たとえば4ビット形式のものは、主として人間を入力源とする10進数処理の分野に多用され、8ビット形式のものは、JIS 符号などの8ビット符号を扱う端末入出力機器の制御に集中的に使用されるなど、それぞれの特徴を生かした用途に活用されている。

2. 2 LSI 記憶装置—データ記憶 (RAM) とプログラム記憶 (PROM/ROM)—

マイクロ CPU が実行可能な個々の命令（機械語命令）は、前述のように、CPU の制御装置

の能力によって主として支配される。これらの命令が指示する基本処理はごく簡単なものに過ぎないので、一般には多数の機械語命令の系列すなわちプログラムとして、データに対する処理が記述され、記憶装置に収められる。同じく処理の対象となるデータも CPU の要求に応じて記憶装置から供給される。データとそれを実行するプログラムとを同時に内部記憶装置すなわち、CPU の処理速度に見合った高速の読み書きが可能な記憶装置に収容することが現代のコンピュータの基本方式—プログラム記憶方式—となっている。したがって記憶装置の性能と価格はプログラム記憶方式の機械にとって重要な意味をもっている。

処理の進行に伴って変化するデータはその記憶内容が高速に変更できる記憶装置（正確な用法ではないが一般には、Random Access Memory ; RAM と呼ばれる）に収容されねばならない。しかし、プログラムあるいはそれに付随する特定のデータは、もし変更の必要がなければ、固定的な読み出し専用記憶装置（Read Only Memory ; ROM）に収容されていてもよく、後述するようにマイクロプロセッサを中心とするシステムではむしろこの方法が一般的である。

これら、RAM および ROM はまた、LSI 技術の性格によく適合し、現在もっとも急速に進歩している領域である。たとえば、RAM としては、1ビット $\times 2^n$ 素子構成の LSI チップ（パッケージ）を必要なビット数だけ並列して記憶装置を構成する方法が一般にとられ、記憶素子としては、フリップフロップ回路によるスタティック形式のものと、ごく小さな容量上の電荷重の大小によって2値を弁別するダイナミック形式のものとが用いられている。これらの記憶素子（セル）は、回路構成上の要請から正方マトリクス状に配列されるから、 n は一般に偶数をとる。初期には $n=8$ （16 $\times$ 16マトリクス=256素子）程度であったものが、現在ではスタティック形で10（32 $\times$ 32=1,024ビットこれを単位として1Kビットと表現することが多い）ないし12（4Kビット）に、またダイナミック形では12～14（4K～16K）にそれぞれ

達し、約3年で4倍と推定される比率で大容量化が進行している。たとえば基本的なスタティック形では6MOS トランジスタ/セル、もっとも簡単なダイナミック形でも2MOS トランジスタ/セルを要するから、RAM チップ上のトランジスタ数はかなり大きい。チップ上の配線が規則的でかつ簡単なために、チップ面積は同一トランジスタ数のCPU チップに比較して $\frac{1}{2}$ 程度に小さくなる。また製造されるチップ数もCPU チップより少なくとも2~3桁大きい。ために、同一チップの大量生産による価格低減効果の大きいLSI 技術の特徴がよく生かされ、CPU チップにくらべて、トランジスタ当たりの価格が現状でも1桁以上安価になっている。

MOSROM の構造は、前述の2トランジスタ/セルのダイナミック RAM 形式より簡単なために、製造上の歩留りがよく、いったん記憶内容すなわち製造時の配線マスク1枚の構造を定めれば、ビット当たり単価の極めて低い固定記憶装置となる。ただし、マスクを設計するための初期費用が比較的大きいために、同一チップを大量に製造しない場合は相対的に高価となる欠点がある。

前述のROM (マスクROM) の適用できない範囲の生産量のROM として、あるいはマスクROM を製造するのに先立ってその内容を検証する過程で使用するために、EPROM (Electrically Programmable ROM) またはEEROM (Electrically Erasable ROM) などが用いられる。現在では両者ともに浮遊ゲートアンバランス注入形 (FAMOS) と呼ばれる1トランジスタ/セル構造を基本とするものが主流となっている。ここでは動作原理に詳しくふれないが、前者は電氣的にごく低速の書込みを行なったのち、通常のRAM と同じ程度の読出し (アクセス) 時間で、読出し専用形式で使用するものである。書込まれた内容は十数分程度の紫外線の照射によって一斉に消去される。後者は、書込み過程は同様であるが、電氣的な消去が比較的短時間に行なえる点に特徴がある。

現状では、ROM (PROM) チップとして2

Kビット (8ビット $\times$ 256) および8Kビット (8ビット $\times$ 1,024) のものが標準となっている。

2.3 周辺制御回路 LSI

すでに述べたマイクロCPU と半導体記憶装置とによって、いわゆるコンピュータメインフレームがLSI 化される。メインフレームという呼称はコンピュータの内部処理機能を包括的に表現するものであり、これとシステムの諸条件 (外部条件) との整合を実現するための機能部 (インタフェース) がどのようなシステムにも必要とされる。メインフレームの能力はCPU の機能と記憶装置の容量とによってほとんど決定されるが、インタフェースはその性格上、マイクロプロセッサを中心とするシステムでも、適用すべきシステムの要求に応じて小~中規模集積回路によって必要なインタフェース機能をみだす論理回路 (ランダム論理あるいは配線論理とも言う) を個別に設計する方法が従来は採用されてきた。この方法では、折角メインフレームがLSI 化されているにも拘らず、周辺回路が煩雑となる欠点があった。

最近では、種々のインタフェース機能のうち共通化の可能な部分のLSI 化が進み、いわゆる周辺制御用チップとして提供されはじめた。これらのLSI チップには、主としてLSI 化メインフレームと周辺 (外部機能) との物理的整合条件をみたすためのMSI 類 (バスドライバ、アドレス/コントロールラッチ、優先権選択回路など) および外部機能との論理的なインタフェース機能を含む汎用入出力制御用チップ類が含まれる。後者は一般に、プログラマブルインタフェースチップとも呼ばれるように、ごく簡単なプログラム制御機能を持ち、メインフレームから受取った指令 (コマンド) に従って、機能に可変性が附与されているものが多い。たとえば、同期/非同期並列入出力インタフェース用LSI、直列入出力制御用LSI あるいは直接メモリ転送 (DMA) 制御用LSI などが現在の代表的なものである。

これらの外に、特定の入出力機器たとえば、簡単な磁気ディスク (フレキシブルディスク) 装置、磁気テープ装置などの比較的複雑な制御

を要する周辺機器に対する専用制御機能なども LSI 化が進み、さらにその種類と機能の増大が予想されている。

3. マイクロプロセッサの利用様態

すでに述べたように、マイクロプロセッサを中心とするシステムの構成要素はほとんど LSI 化され、極めて小形に処理システムをまとめ上げることが可能になっている。またその価格も、最低のシステム構成では、少数生産でもチップ価格が1万円以下のものがすでに入手できる状況にある。したがって、マイクロプロセッサの特徴を十分に生かすためには、従来の汎用コンピュータの応用の概念とはまったく異なった発想が要求されることが多い。本節ではこの問題に簡単にふれる。

3. 1 マイクロコントローラ

マイクロプロセッサを中心とするメインフレームは、通常の汎用コンピュータと同様にプログラム、すなわちソフトウェアによってその機能が決定される。すなわち、まったく同一のメインフレームの構成（ハードウェア構成）でも、与えられたプログラムの内容によって、全く異なった処理を実行することが可能であるという意味で、システムに高い柔軟性が附与される点に大きな特徴がある。

マイクロプロセッサの出現以前には、かなり複雑な処理機能であっても、ミニコンピュータが適用可能な水準に達しない場合はそのシステムのために個別に設計された専用の論理システム（ランダム論理）を構成する以外に、適当な実現法がない場合がほとんどであった。一般には、プログラム制御方式の処理はごく単純な機械語命令の系列の逐次実行によるために、低速であり、かつ処理のモードは直列的であると言える。この欠点は、ミニコンピュータの CPU に比較しても、かなり処理速度の低いマイクロプロセッサにとってはことに重大な問題である。これに対して、ランダム論理方式では、処理の並列性が高く、処理速度は前者にくらべ $10^2 \sim 10^3$ 倍にも達することが大きな特徴である。しかし反面では、ランダム論理による装置は機能の変更、追加などの柔軟性に乏しい点に大きな弱点がある。

つまり、速度が重視される機能にはランダム論理が、機能の柔軟性を要求される場合には、速度に関する要求が満足される限り、プログラム制御方式がそれぞれ有利となる。実際のシステムでは、これらの要求が混在する場合が一般的であるから、両方式の長所を相補的に組合せて機能分担を図る方法が必要となる。したがって、マイクロプロセッサを中心とする制御あるいは計測システムを設計する場合には、システムの要求に応じて、ソフトウェア的な手法とハードウェア的な手法を総合的に利用し、両者の適正な機能配分を検討しなければならない。

マイクロプロセッサが非常に急激な普及を見せた背景として、ランダム論理では機能的にもまた経済的にも実現不能であった制御あるいは計測に関連する潜在的な需要があり、またそれらの処理速度についての要求がマイクロプロセッサの処理能力に充分見合うものであったことが挙げられる。たとえば、初期のマイクロプロセッサの適用範囲であった特殊機能をもつ卓上計算機、あるいは入出力機器制御などはその典型と見られる。前者では入出力の速度が人間の機能によって低く抑えられ、後者では機械的な部分の動作速度が、人間よりはいくらか高速であっても、電子的な処理速度に比較すれば極めて低速であるが、処理機能はある程度複雑でありかつ柔軟性が要求される性質をもっている。

このような応用では、マイクロプロセッサはむしろ一般の汎用コンピュータの機能としてではなく、ランダム論理形の制御機能の代替ないしは機能拡張のために用いられる制御器（コントローラ）の機能を果たすことが多い。以下、この種の利用形態をマイクロコントローラ形の応用と呼ぶ。たとえば、金銭登録機、自動販売機、高周波オープンの制御機能などその例は枚挙にいとまない。

ここに挙げた例のように、数千～数万台程度の中程度の量の同一機能をもち、かつ製造後の本質的な機能変更のないシステムの制御には、さきに述べたマスク ROM がプログラム記憶装置として用いられる。これらの機器を、使用者側から見れば、マイクロプロセッサが用いられているか、あるいはランダム論理であるかは

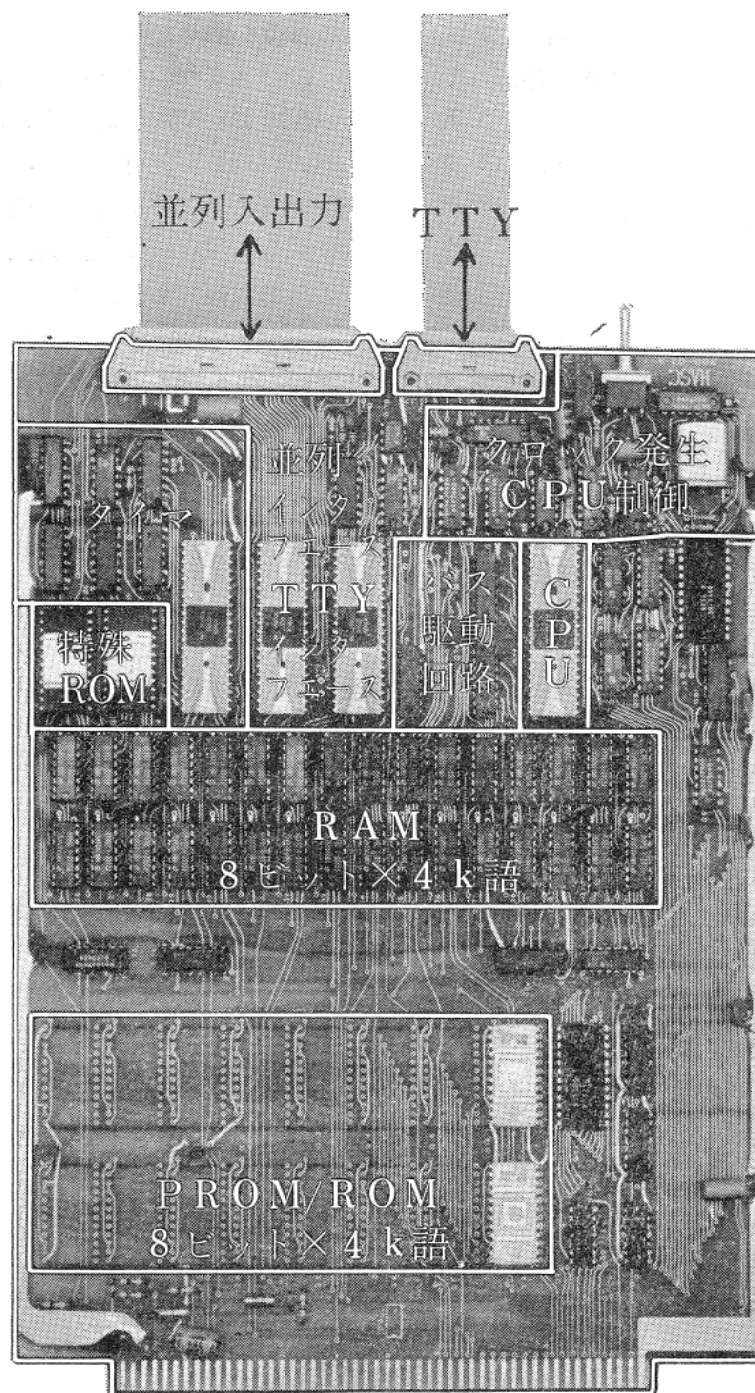


図1 マイクロプロセッサボードの1例（8ビット並列）

ほとんど意識されず、制御機能に目的の機器の中に‘埋め込まれて’使用されている。数量の上からは、この種の利用形態が今日のマイクロプロセッサ応用の大半を占めている。今日、専門家の間で、マイクロプロセッサとマイクロコンピュータと言う用語を意識的に区別して用いるのは、このような応用形態が従来の汎用コンピュータの応用形態の相異を強調する意識が込められている場合が多い。

3.2 マイクロプロセッサボード

マイクロプロセッサはまた、数十～数百台程度のごく少量しか製作されない装置の制御にも有効に用いられる。このような場合には、汎用マイクロプロセッサボード（あるいはカード）と呼ばれる一枚のプリント配線基板（図1参照）を基本構成要素とすることが多い。

マイクロプロセッサボードは、CPUチップおよびその基本的な附属回路（クロック信号発

生回路、外部ステータスラッチ／制御回路など)を中心とし、オンボードメモリと呼ばれるRAMおよびPROM(またはROM)を配置し、さらに適当な入出力装置、たとえばテレタイプライタ(TTY)などとの接続用インタフェースを開装しうる構造をとるのが一般である。

またオンボードメモリのみでは記憶容量が不足する場合、あるいは他の入出力装置との接続用インタフェースを必要とする場合に、これらを共通の接続線(バックボードバス線)でプロセッサボードに結合し、拡張性を附与しうる構成をとっている。

プロセッサボードに附与される機能は様々であるが、基本的なメインフレーム機構と簡単な入出力機構がすでに準備されているために、目的とするシステムの制御用プログラムをPROM/ROMに与えるだけで、非常に簡単に制御システムを構成することが可能であるため、少数の生産あるいはさきに述べたマイクロコントローラの初期試作などにしばしば用いられる。

この種のボードは、マイクロプロセッサチップの製造者からも発売されているが、多機種・少量生産を目的とする使用者にあっては、その応用範囲に適した構成のボードを自ら製作する場合もある。

図1の例は、4K×8ビットまたは4Kバイト(一般に8ビットを単位とし、バイトと呼ぶ)のRAMおよび4KバイトまでのPROM/ROM用のソケットおよびTTYインタフェースなどが実装された汎用形の市販品であり、このボード1枚でも独立した中規模の制御システムが実現できる能力をもっている。

3.3 ソフトウェアの開発手法

繰り返すまでもなく、マイクロプロセッサの意義は、プログラム記憶による制御方式の柔軟性をごく簡単な制御装置にまで適用可能にしたことにある。これは同時に一般の汎用コンピュータの場合と同じように、ソフトウェアの開発が制御システム開発の重要な課題となったことを意味している。

マイクロプロセッサ向けのソフトウェア開発には汎用コンピュータの場合とは異なる、二つ

の特徴がある。そのひとつは、すでにふれたようにソフトウェア仕様の決定がシステム開発の過程において、設計と複雑に結びつき、効用の高いシステム設計のためには、ソフトウェアとハードウェアの機能の均衡が非常に重要なことにある。現在では記憶装置の価格低下が3年に約 $\frac{1}{2}$ と大幅であるため、処理速度の許すかぎりソフトウェア側に機能を分担させる方針が一般に採用されている。したがって、非常に簡単なハードウェアインタフェースを通して制御対象を取り扱うことになる。これは、プログラマが制御対象のハードウェア的な機能を充分に知っていなければならないことを意味しており、処理装置の論理的性格のみを考慮すればよい一般のプログラミングと大いに性格を異にしている。

第2の特徴は、一般にプログラムを実行するマイクロプロセッサシステム(たとえばマイクロコントローラ)は、それ自身ではプログラムの開発過程に必要な援助機能を持たないことが多いことにある。プログラム開発には、原始プログラムのテキストの修正機能、言語処理プログラム、プログラムの実行経過の監視手法などの援助を必要とするが、これらの比較的高度な機能をたとえば、高周波オープン制御を目的とするマイクロコントローラそれ自体に求めることができないのは当然である。したがって、プログラムの開発は、その対象とするプロセッサ以外の処理システムによって行われる場合が多い。

プログラム開発援助は、その実行の様式によって二種類に分けられる。そのひとつは、対象とするプロセッサと同種のプロセッサを用い、入出力機能などを増強した汎用マイクロコンピュータ形式のシステムによって行なう方法である。この方法は一般に、セルフスタンディングシステムと呼ばれる。しかし、この方法によれば、CPU機能は同一であるために、目的とするプログラムを直接実行できる利点があるが、入出力ハードウェア構成がかならずしも目的とする機械と一致しないために、一般にPROMに書込んだうえで、最終的に完全なプログラムデバッグは対象とするシステム上で行わねばならない問題が残る。

第2の方法は、より上位のミニコンピュータあるいはそれ以上の、処理能力が高くまた豊富な入出力機能をもった処理システムを利用する方法で、一般にクロス処理システムと呼ばれる。この方法は、上位機種 of 豊富な機能によって手厚いプログラム援助が受けられる反面、目的とするプログラムを直接実行できないために、一般にシミュレータと呼ばれるソフトウェアで、擬似的に目的プログラムを実行させて、その実行経過を監視する方法をとる。この方法は、対象とする機械のハードウェア的条件を正確に反映させることが、極めて困難であり、結局対象とする機械上で PROM を用いて最終的なデバッグを行われねばならない点に問題がある。

いずれの方法をとる場合でも、ソフトウェア開発を短時間に効率よく行うためには、対象とするシステムのハードおよびソフトウェア機能を熟知した設計者を必要とし、単なるプログラマ以上の能力が要求されることになる。このように、マイクロプロセッサのソフトウェア開発は、一種のハードウェア設計の変形と見られる性格をもつ点に大きな特徴がある。

4. むすび

マイクロプロセッサおよびその周辺の諸機能の LSI 化の発展の速度は、今日予想される技術の改良の範囲でも、1980年代までは現在の傾向を維持することが予想されている。たとえば、1980年代の初めには、64Kビットの RAM または ROM をもつ 8 ビット CPU を 1 チップ上に集積可能であろうという予測を疑う人は少ない。これは、さきに示したボード上の全機能をはるかに超える機能が 1 チップ上に集積されるであろうことを意味している。しかもその価格は、現在の 8 ビット CPU のそれを下回り、米国のある予測によれば、数ドル程度に低下するとみられている。

このような超高密度集積化の進展は、柔軟な‘知能’をもった制御機能がシステム内に分散的に‘埋め込まれた’システムの実現をうながし、大形の情報処理システムを含め、各種のシステムの考え方に重大な影響をおよぼすことになる。本稿がマイクロプロセッサの持つ可能性とそのシステムに対するインパクトにいくらかでも関心を呼び起こすことができれば幸甚である。