

総論



最近のメモリ技術†

国分 明男††

メモリはいつの時代でも、より高速、より大容量、より高信頼、より使いやすく、より低価格のものが要求され、メモリ技術はそれに応えるように進歩を続けてきた。今日では、メモリ技術はシステムアーキテクチャにも大きなインパクトを与えるような段階にまで達している。さらに、半導体、磁気、光の各分野のメモリデバイス技術に対するコンピュータ以外の多様な応用技術の組み合わせが進行している。この解説では、そのような状況におけるメモリ技術の背景、現状、システム技術へのインパクトを展望する。また、メモリ技術における課題についても述べ、今後の発展方向を考察する。

以下では、ハードウェアとしてのメモリを“メモリ”と呼び、方式的概念としてのメモリを“記憶”と呼ぶことにする。

1. メモリ技術の背景

最近のメモリ技術の背景として、以下で述べる三つの傾向、すなわち、メモリ消費が巨大化した結果、メモリ技術の進歩が経済原則によって影響されるようになりつつあること、コンピュータのみならずそれ以外へのメモリ応用が、増大し多様化していること、交換可能な情報蓄積媒体の普及によって、情報保護と標準化の必要性が増大していることがあげられる。

1.1 メモリの大量消費

多くのシステムにおいて、昔の感覚でいえば、湯水のようにメモリを使用しているといえる最近の状況がある。メモリの大量消費は、ビット当たりの価格の大幅な低下によって実現されている。メモリの低価格化は、半導体デバイスや磁気デバイスの高密度化と生産の大規模化によってもたらされている。メモリの高密度化は、直接的には、研究開発者の口頃の努力、研究開発内容の高度化、研究開発体制の強化の結果として

得られたものであるが、それに伴って研究開発投資の大規模化を必要とするようになっている。また、生産の大規模化は、設備投資の巨大化を招いている。

米国インテル社の R. Noyce 氏は、今後 100 年を展望して、半導体 LSI 技術の発展を阻害する要因として、基本的な物理法則からくる物理的限界、技術を発展させるためにどれだけ費用を投入することができるかという経済的限界、研究開発すべき LSI チップの有用性に関する限界をあげている¹⁾。

技術を発展させるためにどれだけ費用を投入することができるかということは、今後どれだけ消費が伸びるかということと大きく関係する。すなわち、過去に実現されてきたメモリ消費の大きな伸びは、いつかは止まるであろうし、その時点では、メモリの大容量化の結果として、生産個数を減らす考え方にはなかなかないで、研究開発投資を減らして研究開発のスピードを落とすことになりかねない。このように、メモリ技術の進歩が経済原則によって影響されるようになりつつある。

1.2 メモリ応用の多様化

メモリの主要な応用分野として、もちろんコンピュータがある。そこでは、高速の半導体 SRAM (Static RAM) はキャッシュ記憶、大容量の半導体 DRAM (Dynamic RAM) は主記憶、磁気ディスクはファイル記憶として広く使用されている。コンピュータへの応用では伝統的に、高速で大容量で低価格のメモリが求め続けられ、メモリ技術はそれに応じてきた。

その結果として、今日では、パーソナルメディアとしてとらえられるようになっているパソコン、ワープロなどの事務用機器や民生用機器におけるフォント記憶、辞書記憶、通信システムや通信機器におけるデジタル交換の通話路接続記憶、パケット交換方式のメッセージ蓄積用記憶、工業用機器や医用機器における図形画像記憶、音声記憶などへの応用を、価格的にも性能的にも可能にしている。

そのようなコンピュータ以外への応用は、メモリデ

† Trends of Current Memory Technologies by Akio KOKUBU (Electrotechnical Laboratory).

†† 電子技術総合研究所

バース技術の多様化と共に、ますます増大する傾向にある。その結果、既存のメモリを使用できるように応用側がシステム段階で適合設計するのではなく、最初から応用に合わせたメモリを用意し、システム設計を容易にすると共に性能も上げようとする方向も出てきている。このようなメモリは、応用指向メモリ (Application Specific Memory; ASM) と呼ばれ、コンピュータやその他の多くの応用向きに開発が期待されている²⁾。

前節で述べた経済的限界を克服して、将来もメモリ技術を進展させ続けるためには、大量消費に対する善悪の判断は別のところに仰ぐとして、消費が伸び続ける必要があり、そのためには新応用を創出していかなければならない状況にある。したがって、連想メモリや機能メモリのような新しいメモリが、人工知能応用システムのような分野の発展に寄与することができれば、新しい需要を生み出すので、メモリ技術の発展にとっても喜ばしいことである。

1.3 情報保護と標準化の必要性

交換可能な情報蓄積媒体が普及し、プログラムやデータの蓄積、交換、流通が大規模になることによって、新たな解決すべき技術課題が生まれている。たとえば、膨大な開発費を投入して良質のソフトウェアを作成しても、海賊版のコピーが横行すると、ソフトウェア産業の存立が困難になるので、著作権がなんらかの方法で保護されなければならない。情報保護対策を、従来のようにソフトウェア的に行うのでは完全さに欠けるところがあるので、メモリハードウェアの観点からも解決を図ることが考えられるべきである。

情報蓄積媒体の互換性が重要であることは、誰しも理解するところである。したがって、媒体の物理レベル及びそれに近いフォーマットレベルでは国際的に標準化が図られているが、OSによって規定されるレベルでは当然のことながら互換性がとられておらず、技術進歩の過程で次々と誕生する各種媒体と各種ドライブにおける互換性の不十分さとも合わせて、プログラムやデータの蓄積、交換、流通の観点から、今後問題を残す状況になっている。技術進歩を止めることなく標準化を行うことができるような、技術開発に先行した標準化作業の推進や標準化のためのガイドラインの提唱がメモリ技術においても望まれるところである。

光ディスクでは、互換性を積極的に利用して、情報保護、情報保存などの要請に対応するようなことも考

えられている。たとえば、同一装置で使用できる再生専用 (Read Only, RO と略す) 形、追記 (Write Once, WO と略す) 形、記録再生 (Read Write, RW と略す) 形の各ディスクに対して、供給データは RO 媒体に、保存データは WO 媒体に、過渡的データは RW 媒体に記憶させるという使い方である。これらによって、ファイルアクセス方式のようなことも、内容が変化していく可能性が出てきている。

2. メモリ技術の現状

メモリのユーザであるシステム設計者からは、メモリは高速で大容量で低価格であることが望まれ続けている。それに応じて、メモリデバイスの目指すところは、高速化であり、大容量化に結びつく高密度化ということである。このような観点からのメモリ技術の進歩は、数多くの改良や工夫の積み重ねによってなされてきており、過去の実績では革命的というよりはむしろ、漸進的進歩であった。しかしながら、半導体メモリの過去 10 年をふり返ってみても、高速化の観点からも高密度化の観点からも 40 倍以上の進歩を達成しており、システムの高速度化、大容量化に果たしてきた貢献は非常に大きなものがある。

メモリデバイスとしては、半導体 LSI 技術をベースとするもの、磁気記録技術をベースとするもの、光技術をベースとするものに大別できる。表-1 は、各技術分野における代表的なメモリの特性を、マクロな観点から比較したものである³⁾。ここで、アクセス時間は、アドレスを指定してからデータの入出力が行われるまでの時間、転送レートは、メモリと外部の間でデータを入出力する速度であり、揮発性は、電源が遮断されると記憶内容が消失する特性を表わす。これらのメモリをさらに、速度、容量、機能、形態、アクセス方式などで分類すると、現在では千差万別といって良いほどいろいろなメモリが存在しており、提供されるものを必ずしもシステム設計者が、すべて使いこなしているとは考えられない状況になっている。

表-1 各種メモリデバイスの特性比較

	半導体RAM	磁気ディスク	追記光ディスク
アクセス時間	非常に高速	中速	やや低速
転送レート	非常に高速	中速	やや低速
メモリ容量	小	大	非常に大
媒体形態	固定	固定	交換
ビット価格	高	やや高	中
安全性	揮発	不揮発	消去不可能

メモリには一般的にいて、高速のものは小容量、大容量のものは低速という特性がある。図-1は、表-1のメモリにおける装置レベルのアクセス時間と容量の関係を示した図であり、そのような特性を図的に表わしている。ここでの問題は、それらのメモリが図中でアクセス時間のすべての領域をカバーするように分布せずに、電子のアクセスの半導体メモリと、機械的アクセスの磁気メモリや光メモリの2グループにはっきりと分けられ、両者の間に大きな空白が存在していることである。このような $10^4 \sim 10^5$ のオーダにも及ぶアクセス時間のギャップは、コンピュータのメモリシステムにおいて性能低下をもたらす原因になっている。したがって、このギャップを埋めるための新しいメモリ（たとえば、CCD、磁気バブル、表面波メモリなど）の研究開発が今までにも数多く試みられているが²⁰⁾、必ずしも成功しているとはいえない状況にあり、今後の課題として残されている。

2.1 高速化と高密度化における進歩

半導体メモリでは、高速化に重点を置くか大容量化に重点を置くかによって、デバイスの種類、回路構成などが異なる。高速化に重点を置いたSRAMでは、現在のところ、4KbのGaAsメモリで $2.4 \text{ ns}^{4)}$ 、16Kbのバイポーラメモリで $3.5 \text{ ns}^{5)}$ 、64KbのCMOSメモリで $13 \text{ ns}^{6)}$ のアクセス時間が報告されている。大容量化に重点を置いたDRAMでは、1MbのCMOSメモリで $65 \text{ ns}^{7)}$ 、4MbのCMOSメモリで $80 \text{ ns}^{8)}$ のアクセス時間が報告されている。

磁気ディスクでは、磁気ヘッドの電気機械的な移動とディスク円板の回転によって、参照すべき情報へのアクセスが行われるので、アクセス時間(シーク時間)の進歩はそれほど著しくなく、現在のところ、1981年に発表されたIBM社3380の 16 ms 程度どまりである⁹⁾。

アクセス時間はメモリの速度を表す代表的な尺度であるが、それと共に、データ転送レートも、メモリシステムとしての性能の観点から重要である。図-2は、半導体DRAMにおけるデータ転送レートと磁気ディスクにおけるデータ転送レートの進歩の様子を、

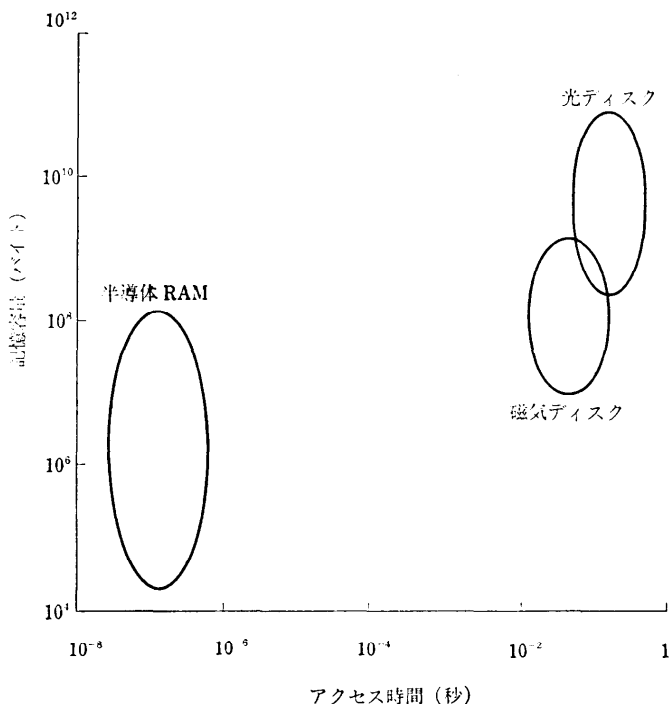


図-1 各種メモリシステムの記憶容量とアクセス時間

年次と共に示したものである。ここで、半導体DRAMにおけるデータ転送レートは、 $\times 1$ 構成のチップ1個の場合のサイクル時間から得られる値とそのチップを8個並列に接続する場合の値を示し、ニブルモードなどの高速アクセス機能は考慮していない。半導体DRAMではメモリセル段階の速度が向上しているにもかかわらず、集積度の向上がそれを打ち消すので、データ転送レートの向上がわずかであるという結果になっている。しかしながら最近では、それを改善して高解像度のフレームバッファへの応用を可能にするために、連続アドレスならば高速アクセスできるモードが、多くのDRAMに備えられるようになってきている。

磁気ディスクのデータ転送レートは、ディスクの回転数が同じでも線密度の向上により、データ転送レートを上げざるを得ない状況があるが、センスアンプやヘッドの帯域による制限、チャネルあるいはディスクインタフェースの処理速度からくる制限によって、このような結果になっているものと考えられる。

メモリデバイスの高密度化は、システム段階での大容量化に直接的に貢献するので、高密度化への技術開

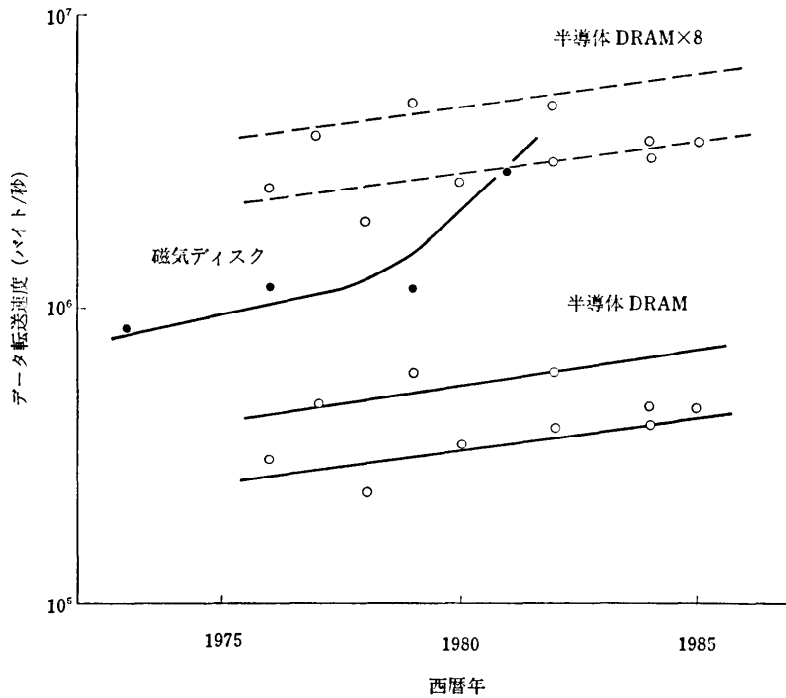


図-2 データ転送速度の向上

発努力は常に続けられている。図-3は、半導体、磁気、光の各メモリ技術における1ビット当たりの占有面積の縮小の様子を年次と共に示したものである。半導体 DRAM のビット占有面積が磁気ディスクに2~3年遅れて同様の縮小傾向を示していること、光ディスクのビット占有面積が一桁以上も半導体 DRAM や磁気ディスクより小さいこと、垂直磁気記録におけるビット占有面積が、研究開発努力によって光ディスクにおけるビット占有面積に近づきつつある様子が分かる¹⁰⁾。

高密度化は、当然のことながら媒体の小型化に貢献する。IBM社の3380磁気ディスクでは、直径36cmの媒体9枚のうち16面を用いて2600MBを記憶しているのに対して、高密度化が著しいRW形の光ディスクである光磁気ディスク¹¹⁾では、たとえば直径12cmの媒体両面を用いて、550MBを記憶する。したがって、寸法的にはパソコン程度の大きさの箱に、ギガバイト級のフェイル記憶を実現することができることになる。

2.2 メモリデバイスの多様化

最近のメモリにおいて目立つ点は、容量、速度、価

表-2 ROM デバイスの多様化

RO形	マスク ROM
WO形	PROM OTP
RW形	EPROM EEPROM

格の観点からの種々の要求をカバーするための多品種化であるが、それに加えて機能の多様化もある。もちろん、メモリの基本的機能としては、指定されたアドレスにおける情報の読み出しと書き込みしか存在しない。そこで、それらの機能を拡張する、新しい機能を加える、あるいは制限することにより新しい分類のメモリを誕生させている。

表-2に示すように、半導体メモリにおいては、ROMと呼ばれるものの中に、RO形のメモリとしてマスクROM、WO形のメモリとしてPROM (Programmable ROM) とOTP (One Time PROM; チップはEPROMであり、紫外線照射により書き換えが可能であるが、窓無しのパッケージを用いているので、一度しか書き込みができない)、RW形のメモリとし

て EPROM (Erasable PROM) と EEPROM (Electrically EPROM) がある。ただし、ROM の RW 形メモリでは書き込み回数が多くても 10^6 回程度に制限されているので、さらにリードモストリ (Read Mostly) 形メモリという分類を作る必要があるが、ここでは便宜的に表-2 のように分類している。

RAM はすべて RW 形のメモリであるが、その中でも SRAM, DRAM, 内部は DRAM であるが外部からは SRAM に見えるように設計された PSRAM (Pseudo SRAM), EEPROM と SRAM を組み合わせて、元来は揮発性のメモリである SRAM に不揮発性の機能を持たせるようにした NVRAM (Non Volatile RAM) がある。

2.3 メモリの高機能化と知能化

コンピュータへの応用では、半導体、磁気、光の各メモリ技術は、速度、容量、価格の観点から、相補的に位置付けられている。すなわち、高速化と大容量化の両立は、技術的にも価格的にも困難であるので、種々のメモリ技術を各々単独で考えるのではなく、システム全体の中で階層的にとらえている。そのようなメモリ全体の効率的な使用のための構成が階層構成であり、そのための方式例がキャッシュ記憶方式である。

キャッシュ記憶は、CPU と主記憶の間に存在して、CPU から見たメモリのアクセス時間を上げることによって、性能を改善するためのものである。したがって、汎用大形コンピュータではキャッシュ記憶には、高速のバイポーラメモリが主として使用されており、近い将来には、GaAs メモリの使用が期待されている。主記憶には、DRAM が使用されるのが普通であるが、高速化のために SRAM を使用するシステムも発表されている¹²⁾。

主記憶とファイル記憶間にも、ファイル記憶の見掛け上の速度を上げるために、同様のものが存在し、それをディスクキャッシュと呼んでいる。ディスクキャッシュは、ディスクコントローラに内蔵されるのが普通である。ファイル記憶の高速化には、機械的アクセ

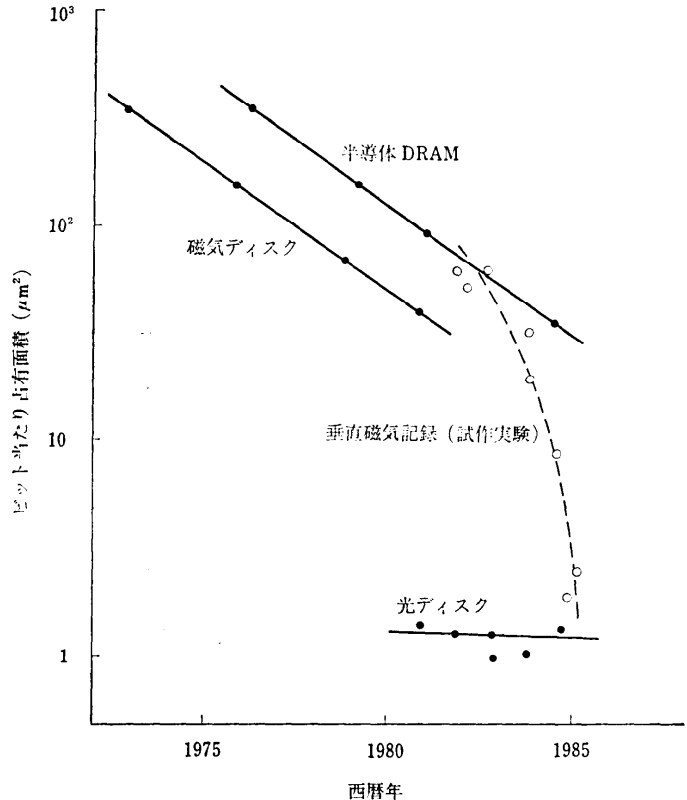
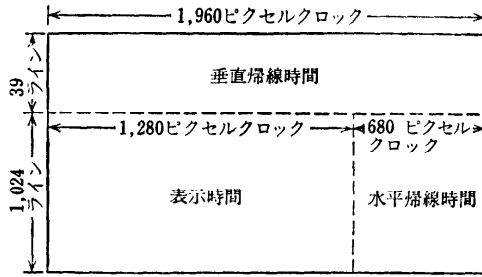


図-3 ビット当たり占有面積の縮小化

スのディスクが存在する限り限界があるので、見掛け上はディスクであるが、内部は半導体 DRAM を用いた半導体ディスクや、ファイル記憶へのアクセスに伴うソフトウェアのオーバーヘッドを減らして、さらに高速化するために、主記憶に直結した拡張記憶が出現している。ファイル記憶を高機能化して、高性能化を実現しようとする方向もある¹³⁾。

メモリ技術の進歩は、CPU 中心主義ともいべき従来の方向の延長線上で階層構成をさらに追求していくか、機能分散して全体として性能を上げる方向に転じるかなどの点で、今後もコンピュータアーキテクチャに非常に大きな影響を及ぼしていくであろう。

最近の小型システムでは、メモリを分散化させて、各々に異なる仕事を分担させる構成が増えてきている。そのようなメモリの例として、ラスタ走査形ディスプレイの表示内容を記憶するフレームバッファがある。ラスタ走査形ディスプレイでは、図-4 に示すように、フレーム (表示画面) の中での時間配分が、表示時間、水平帰線時間、垂直帰線時間に分けられてい



(a) フレームの時間配分

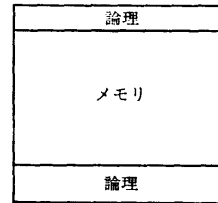
表示ライン数	ライン当たり表示ピクセル数	垂直掃線時間	水平掃線時間	表示時間	掃線時間の計	ピクセル時間
384	512	900 μ s	7.0 μ s	13.08 ms	3.58 ms	66.5 ns
512	640	800 μ s	6.5 μ s	12.54 ms	4.12 ms	38.3 ns
768	1,024	700 μ s	6.0 μ s	11.36 ms	5.30 ms	14.4 ns
1,024	1,280	650 μ s	5.4 μ s	10.49 ms	6.17 ms	8.0 ns

(b) ラスタ走査の仕様

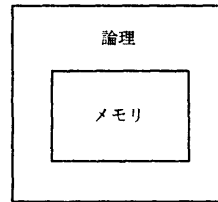
図-4 フレームの時間配分とラスタ走査の仕様

る。図-4中の表は、縦横比が3:4で60Hzノンインタレースモードにおける4種類のディスプレイ装置のラスタ走査仕様を示している¹⁴⁾。高機能ワークステーションで使用される1280ピクセル×1024ラインのフレームバッファの場合、カラー表示をするために赤緑青(RGB)の各々に8ビットを割り当てるとピクセル当たり24ビットになるので、全体として256KbのDRAMで120個必要となり、速度がピクセル時間で8nsなので、4ビットピクセルにつき64Kb×4構成のチップを20個並列動作させるようにしている。そこでは今後、DRAMにおける高速アクセスモードの活用も期待されている。フレームバッファ用のデュアルポートメモリは、普通のDRAMとしてのアクセスポートのほかに、フレームバッファ専用のシリアルポートを備え、両者のアクセスが重なっても良いように構成されたメモリである。

最近では、上述のような段階にとどまらず、より応用に密着した新しい機能を内蔵させることによって、高付加価値化を目指す傾向が出てきている。そのような応用指向メモリを分類すると、図-5のようになる。すなわち応用指向メモリは、メモリの一部に論理を付加した論理付きメモリの形式と、論理ICの一部にメモリを付加したメモリ付き論理の形式に分けられ、どちらも今までプロセッサで行ってきた機能の一部を受け持たせるように考えられている。現在までのところ、応用指向メモリは、既存のメモリにわずかの論理を付加することによって表現されるビデオDRAMの



(a) 論理付きメモリ



(b) メモリ付き論理

図-5 応用指向メモリの分類

ような専用メモリしか実用化されていないが、今後は、集中論理付きメモリ、集中メモリ付き論理の二つの流れの中で大きく発展することが期待されている。しかし、部品点数が減少すること以外の点でメリットがどこまで出せるかは、今後の課題である。たとえば、応用指向メモリによって、システムとしての性能改善がどの程度まで行われうるのである。

メモリの高機能化をさらに進めると、知能化と呼ばれる段階に到達すると考えられる。すなわち、知能メ

メモリと呼ばれるメモリが出現することになる。高性能メモリと知能メモリの間は連続的であって、明確に知能メモリという区分が存在するわけではない。連想メモリや機能メモリは、最近では、人工知能分野における応用が期待されており、そのような観点からそれらを知能メモリと呼ぶことはできるかもしれないが、これにとどまらず、すでに提案されているコンピュータグラフィックス用のスマートメモリ¹⁵⁾のように、分散論理付きメモリ、分散メモリ付き論理の構成の中で、さらに機能レベルの高いメモリがいろいろと提案されても良いように思われる。

3. 将来のための考察

メモリは、今後も大容量で高速で低価格であることが望まれ続けるであろう。図-6は、パーソナルな使用環境において、予想される用途別にメモリ容量を示したものである¹⁶⁾。図から、容量的に現在の技術水準ですでに足りている用途が多くある一方で、長時間の動画のように、今後のメモリ技術開発に期待しなければならない用途があることも分かる。パーソナルな使用環境においては、メモリが高速になれば、快適さが増すであろうことは一般的に想像できることであるし、もちろん低価格であることが非常に重要である。

メモリ技術分野において、近い将来に解決をせまられている課題がいくつかある。次の二つをあげておきたい。第1はメモリ技術が先行し、需要が十分でないか応用が明確でないために、新応用を創出する必要があること、第2は応用が先行してしまい、メモリ技術は未完成なので、対応する技術開発を早急に行う必要があることである。

3.1 新メモリ応用への期待

メモリ技術が先行し、新応用が待たれる例として、半導体メモリを大量使用する応用、光ディスクを有効利用する応用をあげることができる。

半導体メモリは、大量消費を前提として研究開発が盛んになり、生産が大規模化されてきた。その結果、消費が伸びなければ、産業として困難に直面する状況が生じている。半導体メモリを大量消費する応用として、人工知能応用が最も期待されている。そこでは、当面は各種の辞書的な用途、将来は知識ベースの用途

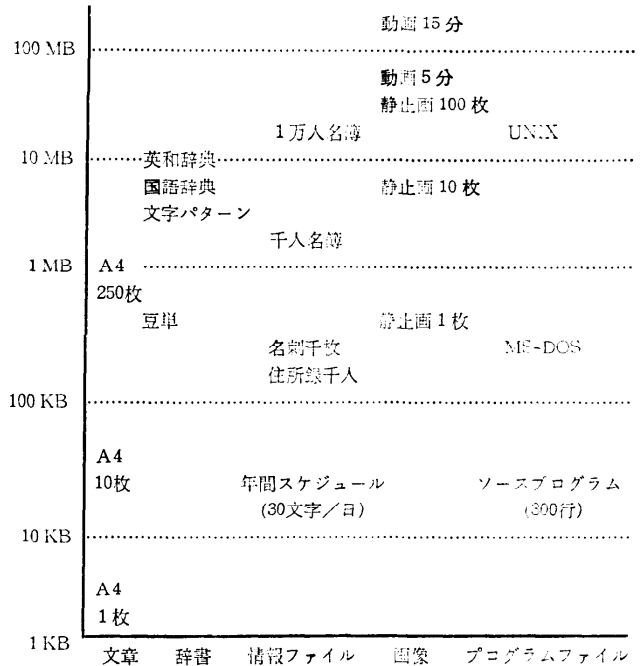


図-6 パーソナルな使用環境における用途別メモリ容量 (Bはバイトを表す)

が考えられる。知識ベースの用途としては、知識情報処理システムというようなコンピュータ応用の観点のほか、たとえば、知識と規則の辞書を備えたデジタルフィルタなどのようにコンピュータ以外の新しい用途もありうるであろう。

光ディスクについては、実用化の方向として¹⁷⁾、次の三つがあげられる。第1は大容量であるという特長を生かして、既存メモリと併用する方向であり、WO形のディスクではすでに汎用大型コンピュータの記憶階層において磁気テープと同レベルの位置で使われ始めているが、そのような方向が広く普及するかどうかは現在のところ必ずしも明らかではない。第2は磁気ディスクに取って代わる方向であり、大きな需要が見込まれるが、そのためには研究開発段階のRW形ディスクにおいて、アクセス時間、データ転送レート、エラーレート、オーバーライト特性などの点でさらに性能の改善が必要になる。第3は、新応用の創出の方向である。第3の方向では、RO形ではCAI、ゲームなどの画像を用いるインタラクティブなシステムへの使用が期待されており、WO形では内容の書き換えができない点を積極的に利用する応用、たとえばファイルのバックアップが非常に大切な応用、書き換えができ

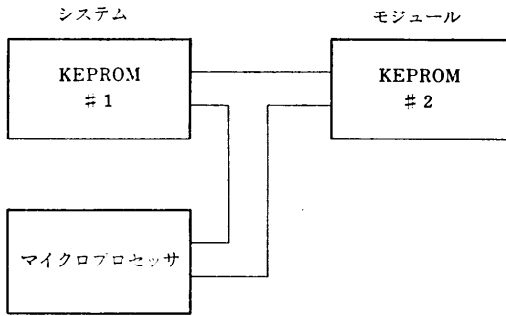


図-7 暗号付き EPROM の構成

ないことが要求される応用（たとえばコンピュータ会計帳簿の監査側からの要請）なども考えられている。それらの応用を可能にするためのファイル管理やアクセス方法¹⁸⁾など、光ディスクにおけるシステムの考察が今後必要となるであろう。

3.2 新機能メモリの必要性

応用が先行してしまい、メモリ技術は未完成の例として、情報保護の問題をあげることができる。知的財産としてのプログラムやデータは、従来のようにソフトウェア的に保護されるのみならず、メモリのハードウェアで強力に保護されることが望ましい。

半導体メモリでは、情報保護のために、128 K ビットの KEPROM (暗号付き EPROM) が開発されている¹⁹⁾。KEPROM の原理は、次の通りである。図-7 に示すように、ロックがかけられてデータの読みだしができない2個の EPROM があり、それらの内部にキー情報とそれに基づく暗号化アルゴリズムが内蔵されている。ロックをはずして読みだしができるようにするには、ロックをはずされようとしている EPROM が他方の EPROM に疑似乱数を送ると共に、両方の EPROM は内蔵キーと暗号化アルゴリズムに基づいて、その乱数を暗号化する。それが終了すると、他方の EPROM は暗号化された乱数を、ロックをはずされようとしている EPROM に送り返す。内部で作られた乱数と送り返された乱数を比較し、同じならば、その EPROM はロックを自分ではずし読みだしができるようにする。他方の EPROM についても同様にしてロックがはずされる。このチップでは、疑似乱数の初期値が、チップ内蔵発振回路の周波数変動によって決められるので、どのような乱数が送り出されるかの予測が困難な点に特長があり、これによって無権利者による複写から記憶内容が保護されるようになっている。

4. むすび

この解説では、メモリ技術の背景、現状、課題をマクロな立場から展望した。

メモリ技術の発展を歴史的にみれば、外挿曲線に乗った予測を上回る量的拡大による進歩の連続であった。このことは、今後もメモリ技術は量的に常に進歩し続けるという期待を人々に与えている。しかしながら、いくら進歩が著しいと言っても、将来のメモリの総生産額が、世界の国民総生産額を越えることはないという事実も認識すべきである²⁾。

半導体メモリでは、現在は、標準品を大量生産する時代から、多様化の時代に入ろうとしており、新しい試みが生かせるようになりつつある。連想メモリや機能メモリも単なる提案に止まらず、現実のものとしてとらえられるようになりつつある。磁気メモリや光メモリでも多様化が始まっている。ともすれば、量的拡大のみととられがちなメモリにも、質的転換が起きる可能性が出てきているのではなかろうか。

参考文献

- 1) Noyce, R.: マイクロエレクトロニクス: 今後100年の展望, Solutions, 9-2, pp. 8-15 (1985).
- 2) O'Conner, K. et al.: Application-Specific Memory Designs and Their Reality, Digest of Technical Papers, ISSCC, pp. 222-223 (1986).
- 3) Rodriguez, J.: A Comparison of Optical and Magnetic Storage Devices, Digest of Papers, Comcon 84, Spring, pp. 508-511 (1984).
- 4) Takahashi, K., Maeda, T., Katano, F., Furutsuka, T. and Higashisaka, A.: "A CML GaAs 4Kb SRAM," Digest of Technical Papers, ISSCC, pp. 68-69 (1985).
- 5) Yamaguchi, K., Nambu, H., Kanetani, K., Honma, N., Nishioka, Y., Uchida, A. and Ogiue, K.: A 3.5 ns, 2W, 20mm² 16Kb ECL Bipolar RAM, Digest of Technical Papers, ISSCC, pp. 214-215 (1986).
- 6) Flannagan, S.T., Read, P.A., Voss, P., Nogle, S., Simon, B., Sheng, D., Kung, R. and Barnes, J.J.: Two 64K CMOS SRAMs with 13ns Access Time, Digest of Technical Papers, ISSCC, pp. 208-209 (1986).
- 7) Webb, C., Creek, R., Holt, W., King, G. and Young, I.: A 65 ns CMOS 1Mb DRAM, Digest of Technical Papers, ISSCC, pp. 262-263 (1986).
- 8) Furuyama, T., Ohsawa, T., Watanabe, Y., Ishiuchi, H. and Tanaka, T.: An Experimental

- 4 Mb CMOS DRAM, Digest of Technical Papers, ISSCC, pp. 272-273 (1986).
- 9) 金子 俊, 橋 誠, 内蔵英明: ディスク装置
日本応用磁気学会, 第 18 回研究会資料, pp. 15-24 (1981).
 - 10) 岩崎俊一: 垂直磁気記録の開発の現状と将来,
日本応用磁気学会, 応用磁気セミナー「垂直磁気記録方式」, pp. 1-6 (1985).
 - 11) Ojima, M., Saito, A., Kaku, T., Ito, M., Tsunoda, S. and Sugita, Y.: Magneto-optical Disk for Coded Data Storage, Proceedings of Third International Conference on Optical Mass Data Storage, pp. 12-18 (1985).
 - 12) NE レポート, 処理速度が M-380 の約 2.2 倍の M シリーズ最上位機種 M-780, 日経エレクトロニクス, No. 383, pp. 92-94 (1985).
 - 13) 喜連川優, 原田リリアン, 高木幹雄: 機能ディスクシステム, 情報処理学会第 31 回 (昭和 60 年後期) 全国大会講演論文集, pp. 153-154 (1985).
 - 14) Finke, D.L.: Dynamic RAM Architecture for Graphic Applications, AFIPS Conference Proceedings (National Computer Conference), pp. 479-485 (1983).
 - 15) Fuchs, H. and Poulton, J.: PIXEL-PLANES: A VLSI-Oriented Design for a Raster Graphics Engine, VLSI Design, Vol. 2, No. 3, pp. 20-28 (1981).
 - 16) 磁気記録交換媒体動向調査報告書, 日本電子工業振興協会 61-C-553 (Mar. 1986).
 - 17) Dan Bloomberg, S. and Connell, G. A. N.: Prospects for Magneto-Optic Recording, Digest of Papers, Compcon 85, Spring, pp. 32-38 (1985).
 - 18) Viter, J.S.: An Efficient I/O Interface for Optical Disk, ACM Trans. Database Syst., Vol. 2, No. 2, pp. 129-162 (1985).
 - 19) Folmsbee, A., Hoff, D. and Letham, L.: A 128K EPROM with Encrypted Read Access, Digest of Technical Papers, ISSCC, pp. 46-47 (1985).
 - 20) Matick, R.E.: Review of Current Proposed Technologies for Mass Storage Systems, Proc. IEEE, Vol. 60, No. 3, pp. 266-289 (1972).
-