

## 解説

## 電子ディスク\*

石井 治\*\*

## 1. まえがき

情報処理システム発展の歴史の中で、新しいハードウェア技術の導入がきっかけとなって、システム構成に影響を及ぼしたり、新しい応用分野が開拓されたりするのはしばしば見られるところである。古くはリレーや真空管にとって代わったトランジスタ、また最近ではそのトランジスタ技術の発展である LSI によるマイクロコンピュータの出現などが著しいものとして挙げられよう。また、記憶装置の分野ではきわめて多くの種類の技術が試みられ、互いに競合した<sup>1)</sup>。これら、コンピュータ・ハードウェア技術の発展を大づかみにみると、(1)機械的装置の電子化・固体素子化、(2)個別的素子にもとづく構成技術の一括生産化、集積化、という二つのことを主軸としてきたように思われる。そして本文が目的とする“電子ディスク”は、長い間磁気ドラム、ディスクなど、媒体回転形の磁気記録技術が君臨してきた補助記憶の分野の一角に、回転運動などの機械的部分を含まない技術で挑戦しようとするものである。それが成功して情報処理システムの一部に定着するものかどうかは将来の判定に待たねばならないが、現在はその可能性と、到達した技術レベルを比較検討すべき段階にきたものと考えられる。本文はこの方向を指向した解説である。

## 2. 電子ディスクとは

“電子ディスク”という言葉はあまり一般的であるとはいえないが、IEEE のコンピュータ・ソサエティが 1975 年 2 月の機関誌に“1980 年代の電子ディスク”<sup>2)</sup>という特集をしたことなどから、ある程度通用する用語となった。もっともそれ以前から“ソリッド・ステート・ディスク”という名称も一部には用いられており<sup>3)</sup>、内容は同じである。

コアまたは半導体 LSI による“内部メモリ”と、磁気ドラム、磁気ディスクなどによる“補助メモリ”の間に、アクセス時間の大きなギャップがあることは、メモリ・ハイアラーキを論ずる者のつねに指摘するところである。この分野にどのような新しいメモリのハードウェアが実用されるようになるかは長い間の疑問点で、それがはっきりしないために、一般的なメモリ分野の名称として“高速補助メモリ(Fast Auxiliary Memory, FAM)”という呼び方も行われている。また、この分野のメモリは完全なランダム・アクセスであるよりも、情報のブロックに対してランダムにアクセスして、そのブロック内の情報は逐次的に転送される形式が望ましいという考えから、そのような仮想的な装置に対して BORAM (Block Oriented Random Access Memory) という名前が用いられたりしてきたのである。

ところが最近になって、この分野における具体的な装置として、電荷転送デバイス (CTD, Charge Transfer Device, または CCD, Charge Coupled Device)、磁気バブル・デバイス (Magnetic Bubble Device)、電子ビーム・メモリ (Electron Beam Memory) の 3 種が実用化に近いものとしてクローズアップされてきた。これらはいずれも最近発明されたというようなものではなく、少なくとも 5 年以上前から研究されていたものである。その他にも、ある種の光メモリ、超電導メモリ、超音波メモリ、種々の形式の磁性体を素子とするメモリなどが実験され、その中のあるものは現在も継続研究されている。けれどもその大部分は、技術の実現性ということではかなり確実であるとしても、予想価格の点でいつも行き詰まった。実用のメモリ・ハイアラーキの中で存在し得るコスト・パフォーマンスの見通しが得られなかったのである。

それが、最近における技術の進歩により、前記の装置について、コスト・パフォーマンス的にも成立し得るのではないか、という見通しになってきた。図-1 (次頁参照)は最近における各種メモリの価格・性能領

\* Electronic Disk—A Critical Review, by Osamu ISHII (Electro-technical Laboratory)

\*\* 電子技術総合研究所

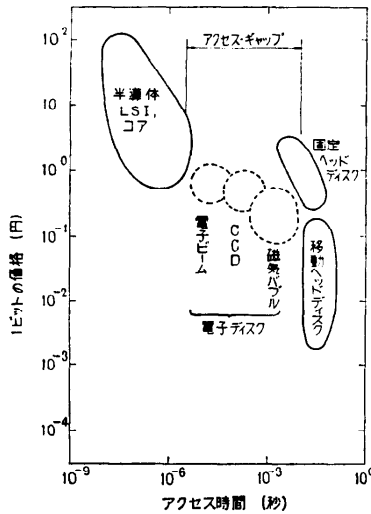


図-1 各種メモリの価格性能領域

域を示したものである。図には移動ヘッド・ディスクと、LSI・コアの間の“アクセス・ギャップ”も示してある。このギャップを少しでも小さくするために、現在は主として固定ヘッドディスクが用いられているが、図からわかるようにアクセス時間の改善度は小さく、価格へのね返りが大きい。すなわち、固定ヘッド・ディスク(磁気ドラムもこれと同等の装置である)は価格・性能的にみて、あまりよくない装置なのである。これに対して、CCD、磁気バブル、電子ビーム・メモリの予想領域は、図中に点線で示したように価格・性能的にも特徴のある位置を占めると考えられる。また、価格とアクセス時間だけでなく、信頼性、操作性、消費電力等にも電子的装置であるための利点が考えられる。

この3種のメモリはどれも機能的には多数のシフトレジスタをもっていて、各シフトレジスタにはランダムにアクセスされるが、シフトレジスタ内の情報は逐次に操作されるというものであって、前述した BOR-AM そのものである。この性質はディスクにも当てはまるものであるが、ディスクのように機械的回転部分をもたないことから“電子ディスク”とよばれるのである。

回転部分を含まないところから、ディスクの場合ハードウェア的に制限条件となっていたことが緩和される。たとえば、慣性質量がないからスタート、ストップが容易である。また、シフトレジスタのループ長(ディスクならばトラック1周の長さ)をかなり自由に

設定できるから、そのループ長を小さくすることによってアクセス時間を短縮できる。このようなことからこれらの装置が実用になった場合には、当然メモリ・ハイラーキの最適配分が変化する。さらにもっと広く、システム構成にもインパクトを与えることになるだろう。本文では次章にハードウェアの概要を述べ、そのあとで装置構成上の機能的特徴、応用分野等に触れる。

### 3. ハードウェアの概要と特徴

前述した数種のハードウェアについて、はじめに動作原理と特徴の概要を述べ、そのあとで特性項目の現状を比較する。

#### 3.1 CCD

CCD は 1970 年にベル研究所から発表された一種の半導体デバイスである<sup>4)</sup>。その構造と動作原理を図-2に示す。シリコン半導体基板の表面に酸化膜絶縁層を作り、その上に導体の電極を形成したもので、通常のLSI製造技術により作られる。けれども通常のLSIにくらべると、不純物拡散などの工程が不要であり、又構造的にも簡単なので、高い集積度と低い価格が実現し易いと考えられ、このためにメモリに有望とされているのである。動作原理としては、基板がn形半導体の場合、ある電極に負の電圧を加える。そうすると

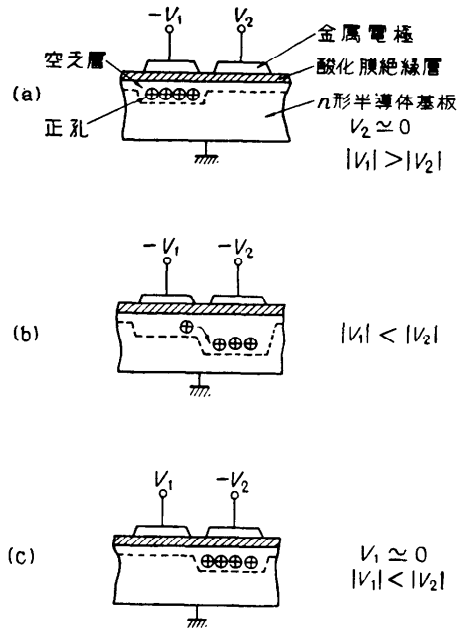


図-2 CCD の原理

その電極の下に空乏層 (depletion 領域) が出来る。この部分に電荷 (正孔) を蓄え、この電荷は散逸することなく保持される。つぎに隣接する電極にさらに高い負の電圧を加えると、蓄えられた電荷は隣の電極の下に移動する。これを繰り返すと電荷はつぎつぎに隣接する電極へ移動させられる。これが CCD によるシフトレジスタの原理で、情報はもちろんこの電荷の有無に対応させられる。

CCD の初段に電荷を注入する方法は幾つかあり、接合ダイオードによるもの、アバランシェ降服によるもの、光の照射によるもの等がある。光との組み合わせは映像デバイス<sup>5)</sup>として実用の段階に達しているが、メモリとしては電気的方法が主になっている。つぎに、最終段における電荷の検出にも数種があるが、同じ基板上にダイオードまたはトランジスタを作ることが出来るので、これらを介して電気的信号として取り出される。

このデバイスは基本的にシリコン半導体 LSI 技術で作られる点が強味であるとともに限界ともなっている。利点としては LSI 一般の膨大な蓄積技術が直ちに役立つことや、上にも述べた周辺回路との一体化が容易なことが挙げられる。限界としては、半導体 RAM との比較において主張できる利点は高集積ということに集約されるのだが、ほぼ同様の技術に立脚している以上決定的な優位を主張できるかどうか疑問である。また揮発性ということも RAM と同様で、用途上多少の制限要因となる。

現在、1 チップ 64k ビット集積したものが報告されており<sup>6)</sup>、16k ビットのものは商用の段階にある<sup>7)</sup>。

3.2 磁気バブル<sup>8)</sup>

強磁性体に外部から磁界を加えるとその方向に磁化される。すなわち、磁性体内部の磁化が全部一定の方向を向く。ところで、ある種の磁性体薄板ではその磁化が板の厚さ方向を向いているときに、その中で図-3 に示したように、ある部分だけ円筒状に磁化の向きが逆になっている区域を生ずる場合がある。このような磁区の形態は 1960 年頃、すでによく知られていた。けれどもこの円筒状の“磁区”がその形状、寸法を安

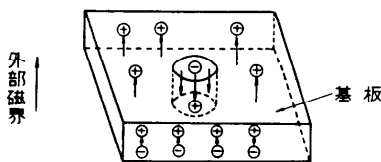


図-3 磁気バブル

定に保持したまま移動させられることに着目して、これを 2 値情報に対応させ、情報の記憶、処理に応用しようということは 1967 年のベル研究所の提案<sup>9)</sup>にもとづくものである。“磁気バブル”というのは、この磁区の形状によってつけられた名称である。

磁気バブルの直径は、薄板材料の物質定数、厚さ等と外部から加えられる磁界によって定まるが、実際には数 10 ミクロンから 1 ミクロン以下のものまでが得られている。磁気バブルは、その部分の磁化の方向が周囲と反対であるというだけで、物質的にその部分が周囲と異なるのではないが、その直径が安定であるため見かけ上は一つの小さな磁石であるかのように考えられる。それで、磁気バブルの近くに磁極を持って行けば、これに吸引されたり反撥させられたりして場所を移動する。磁気バブルの移動を制御する方法はこの原理にもとづいている。

図-4 は磁気バブル移動方法の例であって、基板上にはバブルの大きさと同程度の転送用パターンが磁性体 (パーマロイ) で作られている。これに基板の面の方向の回転磁界を加えると、転送パターンの端部に磁極が生じて、それが順次移動する。磁気バブルはこの磁極に吸引されて、つぎつぎとその位置を移動するので、パターンの形状を工夫することにより任意の場所にバブルを移動させることができる。これはシフトレジスタの機能に外ならない。

シフトループの組合せ方やアドレス・デコードの方法には多くの方式が可能であるが、図-5(次頁参照)に代表的な 2 例を示しておく。(a) は単一のシフトループであって、平均アクセス時間は記憶ビット数に比例

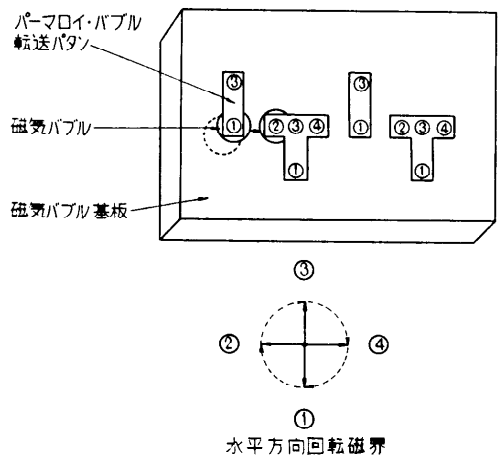


図-4 磁気バブルの移動

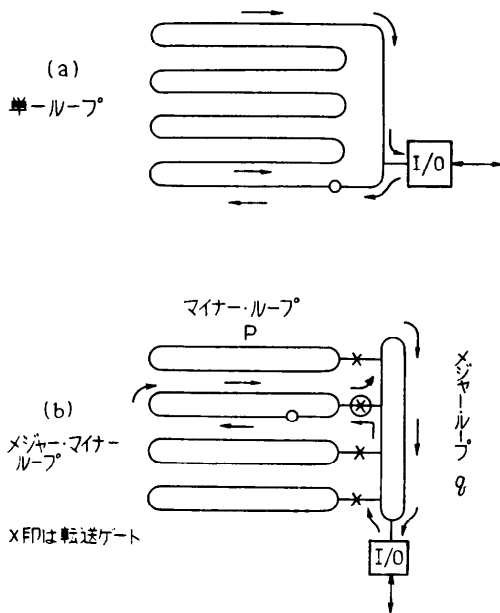


図-5 シフトループの構成

する。(b)は“メジャー・マイナー・ループ方式”とよばれるもので、多数のマイナー・ループ上の情報はゲートを介してメジャー・ループに移され、メジャー・ループを経由して読み出し、書き込みが行われる。この場合の平均アクセス時間は、ほぼ記憶ビット数の平方根に比例することになる。この種のシステム構成上の問題は次章でさらに述べる。

磁気バブルの集積度は現在、1チップ256kビットのものが報告されており<sup>10)</sup>、数10kビット程度のものの試作はアメリカおよび日本の数機関より発表されている。

### 3.3 電子ビーム・メモリ

ブラウン管をメモリに用いることは、コンピュータ開発のきわめて初期に行われた<sup>11)</sup>。そして一部の商用コンピュータに使用されたが、すぐにコアメモリにとって代わられた。それが再び開発試作に浮かび上がってきたのは主としてつぎの理由によるものである。すなわち、(1)電子光学系の進歩——このため初期のブラウン管メモリにくらべると記憶密度が桁違いに増大可能となった。(2)記憶面の革新——初期の装置は普通のブラウン管蛍光面に類するものの2次電子放出を利用していたのであるが、半導体を用いる等の方法により多くの利点が得られるようになった。

電子光学系の改良のうちで顕著なものは二重偏向系である。これは図-6にその概要を示すように、電子

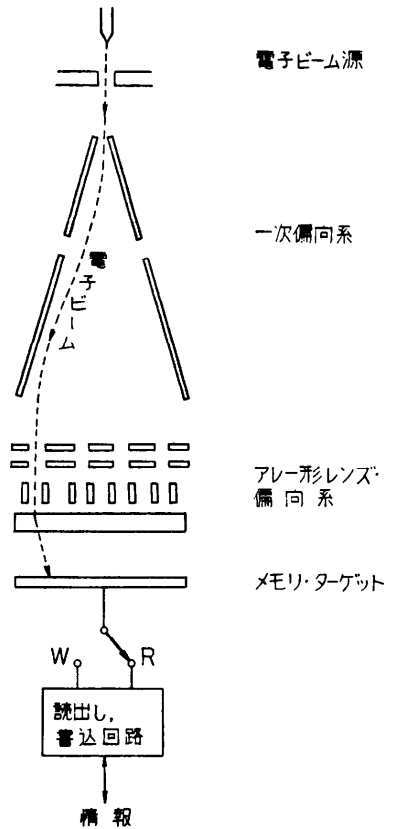


図-6 電子ビーム・メモリの概要

ビームに最初大まかな偏向を与え、そのつぎにターゲット面の近くに配置した多数のアレイ状偏向器によって精密な分解能を得るものである。これによってビーム偏向の不安定性にもとづく位置ぎめ密度の限界を飛躍的に増加させることが可能となった。

つぎに、記憶面を構成するターゲットについては、現在試作の進められているものの構造は二つに大別される。その一つは1ビットごとに分離した構造を有するもの<sup>12)</sup>であり、他の一つはターゲットとしては均一な連続的媒体であって離散的構造がなく、情報はその上に適宜電子ビームによって書込まれるものである<sup>13),14)</sup>。

装置を具体化する上での得失はそれぞれあるだろうが、後者の“無構造”ということとは高密度・大容量記憶媒体として一つの原理的な利点があると思われる。実際、図-1に示した各種メモリのうち、コアは完全な離散素子であり、LSIは連続的なシリコン基板と一括生産形態をもっているが1ビットごとに離散的なセル構造を固定的にもっている。これに対してディスクな

どの磁気記録面は、無構造・連続媒体であり、その間のアクセス・ギャップを埋める電子ディスクがその中間的性質をもつもので試作が進められていることは興味ある事実である。

このことを概括的にいうならば、1ビットごとに配線構造のあるものはこの配線を用いてアクセスすることが容易であり、したがって高速だが1ビットの価格を低くするには不利である。これに対して無構造の媒体は価格を低くできるけれども、その上の特定の場所を選択する方法が問題となり、アクセス時間が大となる。CCD と磁気バブルは、シフト機能を用いることにより RAM にくらべて構造の単純化をはかっており、電子ビーム・メモリはビームの偏向という手段でアクセス機能を具体化するものである。

メモリ・ターゲットの構造および情報読出し・書込み方法は幾つかあるが、無構造のものの一例を図-7に示す<sup>15)</sup>。ターゲットは半導体表面に絶縁層を距てて金属膜を形成したもので、図-2 の CCD と同様のものである。これに正のバイアス電圧を加えながら電子ビームを照射すればその部分に形成される空乏層に電荷が蓄えられ、負のバイアスでは電荷が消滅する。この電荷は不揮発的に保持される。読み出しはこの電荷を電子ビーム照射で取り出すことにより行われる。

試作されたものの一例では<sup>14)</sup>、電子ビーム管1本当たり記憶容量 32 M ビット、アクセス時間最大 30 マイクロ秒、データ・レートは 10 M ビット/秒である。

### 3.4 その他のハードウェア

電子ディスクとして現在実用化の可能性が最も大きいものは上述の3種であるが、その他研究段階にある二、三のメモリについて簡単にふれておこう。

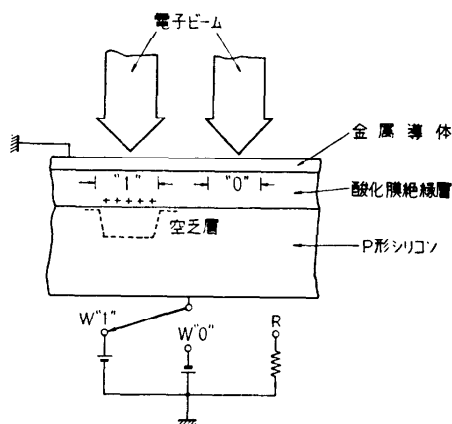


図-7 電子ビームメモリの記憶原理

### (a) 光メモリ

光メモリにはきわめて多くの種類がある。まず、記憶容量の面からみて超大容量を指向したものと、それほど大容量でなく動作の高速性を指向したものがある。記憶媒体に関しては、情報の書換え可能なものと、固定的なものがある。光学技術に関してはホログラフィによるものとそうでないもの(ビット・バイ・ビット方式とよばれる)がある。これらのうちで、これまで実用システムに用いられたのは、情報固定媒体のビット・バイ・ビット方式による超大容量メモリだけで、それも少数試用した程度に止まっている。

書換え可能媒体による高速指向のものは、メモリ・ハイアラキー上で電子ディスクの占める位置を目的とすることになるが、価格・性能的に競争力のある装置の見通しは得られていない。その理由は主として媒体の性能(感光度、コントラスト等)が不十分なためで、そのつぎに周辺の電気・光学系の諸問題がある。光源としての半導体レーザをはじめ、周辺の光関連部品の進歩は顕著なものが期待できるので、媒体に一段と性能のよいものが得られるならば、急速に実用化が進展する可能性もないではない。現状の展望としては文献16)が詳しく、参考文献も完備している。

### (b) 超電導メモリ

超電導現象を利用したメモリの研究も早くから行われており、20年前まで遡ることができる<sup>17)</sup>。そして1960年代の中頃には実験装置の試作も行われたが、価格・性能的にみて実用されるには至らなかった。その後ジョセフソン効果を利用した新しい形式の提案があり、消費電力の小さいことと動作時間がきわめて小さいために新たに研究がはじめられ、現在も続けられている<sup>18)</sup>。これらは1ビットごとの配線構造をもつもので、多くはRAMとして研究されているものであるが、その低電力性により大容量の装置が実現すれば、電子ディスクの位置を占めることも考えられる。けれども、ヘリウム液化装置を必要とし、また、常温と極低温のインタフェースを少なくするためにはプロセッサも同種の素子で作る必要があるともいわれており、技術的ならびに経済的評価は今のところ未知に属する。

### 3.5 特性項目の比較

表-1(次頁参照)は上述した CCD、磁気バブル、電子ビーム・メモリと、これらに対する比較のため MOS・RAM ならびに磁気ディスクの、現時点における性能・特性を概括したものである。それぞれの種類につ

表-1 各種メモリの比較

メモリの種類		MOS・RAM	CCD	磁気バブル	電子ビーム	固定ヘッド・ディスク, ドラム	移動ヘッド・ディスク
性能	アクセス形式	ワード・ランダム	ブロック・ランダム			トラック・ランダム	
	媒体取外し	No	No	(No)	No	(No)	Yes
	不揮発性	No	No	Yes	(Yes)	Yes	Yes
	アクセス時間 (μs)	0.5	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	3×10	5×10 <sup>3</sup>	3×10 <sup>4</sup>
	転送速度 (MHz/チャンネル)	2.0	2.0	0.3	10	10	10
価格/ビット (円)	1.0	(3.0)	(0.1)	(0.3)	0.1	0.01	
デバイス技術	記憶媒体	シリコン		磁性ガーネット	シリコン	磁性面	
	記憶セル構成	単体, 拡散	導体	パーマロイ・パターン	無構造		
	セル面積 (μm <sup>2</sup> /ビット)	13×35	500	16×16	18	10 <sup>3</sup>	
	単位媒体上のビット数	16 K <sup>(19)</sup>	64 K <sup>(2)</sup>	256 K <sup>(10)</sup>	32 M <sup>(14)</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>
	消費電力/ビット (μW)	40	1	15	8	—	—
	電力・遅延時間積 (pJ)	20	0.5	50	—	—	—
	アクセス方法	電気的			電子ビーム偏向	電気機械式	
備考	メモリ階層の位置	メイン・メモリ	高速補助メモリ			ファイル	
	開発段階 (1976年)	商用	サンプル出荷	装置試作		商用	
問題点	大集積化, 揮発性			速度, 価格	ビーム技術, 価格	機 構 部	

いても種々の装置があるので、ここに挙げた数値はごく概略の目安というに過ぎない。

表について二、三の説明を加えよう。まず、アクセス形式がブロック・ランダムなことはすでに述べたように、電子ディスクの特徴である。媒体取外しは、大容量ファイルとしては必要な性質であるが、高速補助メモリとしては必ずしも必要ではない。磁気バブルが、実装形態によってはプリント基板単位で取外し可能な他は、CCD、電子ビーム共取外しできない。

アクセス時間は電子ディスクの評価に当たって重要な項目の一つであるが、次章に触れるように、装置構成による任意性が大きく、表の数字は一応の目安を示すものである。また、ビット価格についても現在の試作段階で予測することは困難なので括弧をつけておいた。

デバイス技術としては一つの媒体上の集積度ということが重要である。これは一括生産形態において、ビット価格に直接結びつくからである。表には1976年までの試作報告中、それぞれの種類において集積度の大きなものの例を示した。したがって備考欄における“開発段階”はこの集積度の素子のそれを示すものではなく、それぞれの種類のメモリの、使用者的見地からみた現状を示すものである。

#### 4. 装置構成と性能評価

システム技術者、ユーザーからみた場合、“電子デ

ィスク”は、新しい装置・デバイスであってその利点、欠点を多くの面から検討する必要がある。本章でははじめに評価指標の概要を述べ、そのあとで動作速度に関連して電子ディスクに特有な問題の一例をとりあげてみよう。

##### 4.1 特性項目

メモリの論理的な機能を表す項目は、記憶容量と動作速度であるが、この二つのことを実際面からみるといろいろの条件がからみ合っている。記憶容量をみても、技術開発の初期には大容量の装置が“技術的に構成できない”ということがあられるけれども、今日実用の情報処理システムでの得失を検討するようなものについて、そのような技術的問題は解決済でなければならない。大容量にできるかできないかは、第一にビット価格の問題であり、それに続いて、信頼性、大きさ、消費電力、操作性、等の問題なのである。図-1の縦軸にビット価格を示したのはこの理由による。

信頼性の評価は広汎な使用実績を必要とする面があつてむづかしいが、試作段階でもこれを推定または実測する手法について最近の進歩は著しいものがある。メモリはきわめて多くのビット数を扱うので、平均故障間隔 (MTBF)、エラー・レート等の評価は重要である。ごく概括的にいって、電子ディスクは可動部分を含まぬ電子的装置であるので、回転形の磁気記録装置よりも高い信頼性が期待できる。とくにエラー・レー

トについては一般に、媒体運動を伴う磁気ディスク、ドラムは電子的装置よりエラー・レートが1桁は大きく、さらに媒体とヘッドの接触するものは接触しないものよりさらに1桁くらい大きいといわれる。

装置の寸法、消費電力が実用の形態に影響するところが大きいのはいうまでもない。この点でも電子ディスクは従来の対抗装置にくらべて利点が期待できる。

表-2 は磁気バブルの一例で、高速補助メモリを指向したものでなく、周辺機器用の比較的低速小容量なメモリについて、従来用いられていたカセット・テープおよびフレキシブル・ディスクと、諸元を比較したものである<sup>20)</sup>。

電子ディスクの実用分野を考えるとき無視できない一つの点は、高速回転部分がないことにもづくものである。すなわち、磁気ドラム、ディスクは高速回転部分をもつために、起動停止に時間がかかるだけでなく、ジャイロ効果があるために航空機、車両等の移動環境での使用に適さない。電子ディスクはそれがないので軍用その他この種環境でも応用に適している<sup>21)</sup>。

つぎにメモリ性能の主なものである動作速度について、本文ではこれまで主としてアクセス時間をとりあげてきた。けれどももう少し適確に評価するためにはそれ以外の性能項目も参照する必要がある。ブロック転送の場合、これに関連する時間要因を一般的に表せば図-8 のようになる。ここで、

$T_0$ : 読出し指令の与えられた時刻

$T_1$ : 情報の転送開始時刻

表-2 特性項目の比較例<sup>20)</sup>

項目	カセットテープ装置	フレキシブルディスク装置	磁気バブル装置
記憶容量 (10 <sup>6</sup> ビット)	2.4	2.0	0.8
転送レート (KHz)	10	250	800
平均アクセス時間 (秒)	20	0.46	0.5
重量 (kg)	1.35	4.55	2.31
消費電力 (W)	35 (平均)	150 (平均)	13.8 (ピーク)
大きさ (dm <sup>3</sup> )	2.05	8.2	0.82
媒体取外し	Yes	Yes	No
MTBF (時間)	—	5,000	9,720
ソフト・エラー・レート (リード回数/エラー)	—	10 <sup>9</sup>	10 <sup>12</sup>

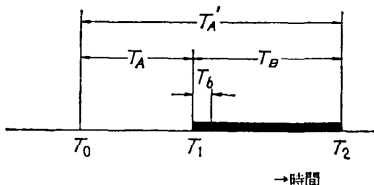


図-8 情報転送に関する時間の定義

$T_2$ : 情報の転送完了時刻

$T_A$ : アクセス時間

$T_B$ : ブロック転送時間

$T_b$ : ビット転送時間

を表す。動作としては時刻  $T_0$  に指令がメモリへ与えられると  $T_A$  だけ遅れて情報の転送がはじまり、1チャンネルについてみれば時間間隔  $T_b$  ごとに1ビットずつ逐次読み出され、時刻  $T_2$  にブロック転送が完了する。 $T_A$  は多くの場合分布をもっており、最小値、最大値、平均値、実効値などが用いられる (注意: JIS 情報処理用語では  $T_A$  をアクセス時間としているが<sup>22)</sup>、ISO<sup>23)</sup> では  $T_A' = T_A + T_B$  をアクセス時間とよんでいるなど、これに関連した用語法は一定していない)。また、実際の装置ではこのようなチャンネルを複数個並列にもっている場合も多く、同一時期に並列に扱われるビット数 (メイン・メモリではこれを“深さ” (デプス) とよぶことがかなり行われているが、一般的用語は確立していない) も重要な特性項目である。装置の外部仕様としての転送レートは  $1/T_b$  にこの並列性を乗じたものを表示することが多い。

これらの特性項目のうちには、その値が主としてハードウェアの性質で規定されるものと、設計者が比較的任意に設定できるものがある。例えば、上述の、並列に扱われるビット数を大きくすることは、技術よりも費用の問題であるのに対して、ビット転送時間  $T_b$  を小さくすることは装置技術・回路技術の問題であることが多い。

アクセス時間  $T_A$  について、磁気ドラム、ディスクのような回転形の装置では、媒体回転時間の1/2が平均アクセス時間となる。しかるに回転部分の機構的制約により、その回転速度が大幅に異なるものを得ることは困難であり、現用の装置は大部分毎分数千回の回転数である。これに対して電子ディスクではシフトループの構成に自由度が大きく、磁気バブルで例示したメジャー・マイナー・ループなどの構成方式によってかなり広い範囲の設計が可能である。このことは将来の電子ディスクの応用に対して重要な点の一つと考えられるので、次節にその具体例をあげさらに説明を加えよう。ただし、これは多くの可能性の中の1例であって、この種の分野に未開拓の部分が多いことを指摘するためであり、この分野の展望を意図するものではない。

#### 4.2 磁気バブルメモリの実効アクセス時間

磁気バブルメモリ構成については図-5 にその例

を示した。記憶容量を  $m$  とし、1ビットの転送時間を  $t$  とすれば、単一ループの場合平均アクセス時間  $t_a$  は  $m \cdot t/2$  となる。メジャー・マイナー・ループの場合、メジャー・ループのビット数を  $q$ 、マイナー・ループのビット数を  $p$  とし、図-5(b)のような構成における任意の1ビットに着目すれば

$$T_a = \frac{t}{2}(p+q)$$

となる。マイナー・ループの数を  $l$  とすれば

$$m = l \cdot p$$

であり、 $q$  はほぼ  $l$  に比例するので、

$$T_a \propto \sqrt{m}$$

となるのである<sup>24)</sup>。

ところで磁気バブル・デバイス (CCD においても可能性は同様である) は磁気ディスク、ドラムと異なって、シフト・ループ上のバブルを任意の時期にスタート、ストップさせ、またシフト方向を逆にすることが可能である。この性質を利用すると、情報のアクセスに関して上に述べたものと全く原理的に異なるメモリが考えられることになる<sup>25)</sup>。

いま、無限に長いシフト・ループ (両方向シフト可能) を考えると、すべてのプログラムおよびデータはその一部分に収容される。その範囲の情報を左右にシフトさせながら、特定の R/W 位置で情報の読出し、書込みを行うことによってプログラムを実行することができる (図-9)。この場合、ループ長の 1/2 で定義される平均アクセス時間は無限大となって意味をもたないが、実際にはプログラムが実行可能なのであって、実効アクセス時間はそれとは別に定義されなければならない。それは、ある場所の情報が利用された場合、その次に必要な情報を R/W 位置にもってくるには、平均どれだけのシフト数が必要かということで決まる。これはプログラムの構造やデータの配置によって異なり、一般的に確定できる問題ではないが、記憶領域全体にわたって均一な確率をもつものではなく、直前に利用した情報から遠い位置にある情報の必要となる確率は低いのが普通である。バーチャル・メモリやキャッシュ・メモリはこの性質を利用したメモリ操作方式であって、この確率が均一であったら利点を発揮

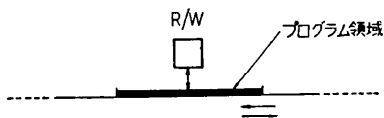


図-9 無限に長いシフト・ループ

することができない。

メジャー・マイナー・ループ構成にこの考え方をとり入れた一例では<sup>26)</sup>、前述したような1方向シフトの場合にくらべて両方向シフトの場合の実効アクセス時間は 1/10 以下となっている。

さらにシフト・ループ内の情報の配列を、アクセスごとに動的に変更する方式も提案されており、これだと制御はやや複雑となるが、実効アクセス時間はさらに短縮される<sup>27)</sup>。

## 5. あとがき

今後の情報処理システムに独自の位置を占めようとする新しいメモリ装置“電子ディスク”について、その動作原理と特徴、ならびに現在の開発・試作が到達したレベルを展望した。この種の装置が実用になったときには、コンピュータのメモリ階層に当然影響を与えることになるだろう。メモリ階層の選定、評価についてはこれまでも多くの研究、発表がなされている。キャッシュ・メモリ方式やバーチャル・メモリなどはその具体例である。電子ディスクの場合にこれらの問題がどうなるかということについては、本文で触れる余裕がなかったので、二、三の解説的文献を挙げておく<sup>28)~30)</sup>。これらは大体において電子ディスクを想定して論じられているものであり、興味のある読者はそれらから更に原論文にさかのぼられることをおすすめしたい。

電子ディスクの実用化によって、コンピュータのメモリ階層だけでなく、広汎な周辺装置の分野や、さらにコンピュータ以外の分野にも多くの応用を見出すことになるだろう。すでに航空機のフライト・レコーダ、電話の短縮ダイヤル、等の応用が提案されているが、これらはごく初歩的なものに過ぎない。本格的な応用分野の開拓は、ハードウェアの実用実績と並行して拡大されるであろう。その際、それぞれの装置の特質を知るのに本文が役立つことがあれば幸である。

## 参考文献

- 1) 石井 治: メイン・メモリの動向, 情報処理, Vol. 16, No. 4, pp. 258~274 (1975).
- 2) R. R. Martin and H. D. Frankel: Electronic Disks in the 1980's, Computer, Vol. 8, No. 2 pp. 24~30 (1975).
- 3) 石井 治: “Solid-state disk memory”としての磁気バブルの特質, 電子通信学会電子計算機研究会資料, EC 70-31, pp. 1~8 (1970-12).
- 4) W. S. Boyle and G. E. Smith: Charge Coup-



- led Semiconductor Devices, B. S. T. J., Vol. 49, pp. 587~593 (1970).
- 5) Hiroshi Tanigawa, et al: 228 by 248 Cell Charge-Coupled Image Sensor with Two-Level Overlapping Polysilicon Electrodes, Proc. 7th Conf. on Solid State Devices, Tokyo, '75, pp. 241~245 (1975).
  - 6) A. M. Mohsen et al: A 64 K-Bit Block-Addressed Charged-Coupled Memory Device, Digest of Tech. Papers 1976 IEEE Int. Solid-State Circuit Conf., pp. 180~181 (1976).
  - 7) Intel 社カタログ: Charge Coupled Device 2416—16,384 Bit CCD Serial Memory, (1975).
  - 8) A. H. Bobeck, P. I. Bonyhard, and J. E. Geusic: Magnetic Bubbles—An Emerging New Memory Technology, Proc. IEEE, Vol. 63, No. 8, pp. 1176~1195 (1975)—磁気バブルに関する総合的展望, 文献表も整っている。
  - 9) A. H. Bobeck: Properties and Device Applications of Magnetic Domains in Orthoferrites, B. S. T. J., Vol. 46, pp. 1901~1925 (1967).
  - 10) M. Takahashi et al: Fabrication of 256 kBit Chips using 3-4 $\mu$ m Bubbles, Int. Conf. on Magnetic Bubbles, Eindhoven, (1976).
  - 11) F. C. Williams and T. Kilburn: A Storage System for Use with Binary-Digital Computing Machines, Proc. IEE (London), Vol. 96, pp. 81~100 (1949).
  - 12) J. Kelly: The Development of an Experimental Electron-Beam-Addressed Memory Module, Computer, Vol. 8, No. 2, pp. 32~42 (1975).
  - 13) E. E. Huber, Jr., M. S. Cohen and D. O. Smith: Electron Beam Detection of Charge Storage in MOS Capacitors, Applied Physics Letters, Vol. 16, No. 4, pp. 147~149 (1970).
  - 14) W. C. Hughs et al: BEAMOS—A new electronic digital memory, Proc. National Computer Conf. 1975, pp. 541~548 (1975).
  - 15) D. E. Speliots: Bridging the memory access gap, Proc. National Computer Conf. 1975, pp. 501~508 (1975).
  - 16) D. Chen and J. D. Zook: An Overview of Optical Data Storage Technology, Proc. IEEE, Vol. 63, No. 8, pp. 1207~1230 (1975).
  - 17) A. E. Slade and H. O. McMahon: Cryotron Catalog Memory System, Proc. Eastern Joint Computer Conf. 1956, pp. 115~119 (1956).
  - 18) W. Anacker: Potential of Superconducting Josephson Tunneling Technology for Ultra-high Performance Memories and Processors, IEEE Trans., Vol. MAG-5, No. 4, pp. 968~975 (1969).
  - 19) C. N. Ahlquist et al: A 16K Dynamic RAM. Digest of Tech. Papers 1976 IEEE Int. Solid-State Circuit Conf., pp. 123~129 (1976).
  - 20) Rockwell International 社カタログ: POS-8, (1976).
  - 21) E. J. Hoffman et al: Designing a Magnetic Bubble Data Recorder, Computer Design, Vol. 15, No. 3, pp. 77~85 (1976).
  - 22) JIS: 情報処理用語, JIS C 6230-1970 (1970).
  - 23) ISO, 審議中。
  - 24) W. Anacker: Possible Uses of Charge-Transfer Devices and Magnetic-Domain Devices in Memory Hierarchy, IEEE Trans., Vol. MAG-7, No. 3, pp. 410~415 (1971).
  - 25) 石井 治, 吉広誠一: 磁気バブルメモリの構成方式と実効アクセス時間について, 電気学会, 電子装置研究会資料, EDD-74-31 (1974).
  - 26) 石井 治: 記憶階層における磁気バブルメモリ, 学振第131委員会, 磁気バブルドメイン講演会資料, pp. 19~23, 昭 49.12.3.
  - 27) P. I. Bonyhard and T. J. Nelson: Dynamic Data Reallocation in Bubble Memories, B. S. T. J., Vol. 52, No. 3, pp. 307~317 (1973).
  - 28) A. V. Pohm: Electronic Replacements for Head-per-Track Drums or Disks, Computer, Vol. 9, No. 3, pp. 16~20 (1976).
  - 29) G. Panigrahi: Charge-Coupled Memories for Computer Systems, Computer, Vol. 9, No. 3, pp. 33~42 (1976).
  - 30) S. L. Rege: Cost, Performance and Size Tradeoffs for Different Levels in a Memory Hierarchy, Computer, Vol. 9, No. 3, pp. 43~51.

(昭和51年9月24日受付)

## 訂 正

12月号掲載の石井治君の解説「電子ディスク」の中で1165ページの表-1中 CCD の欄の6段目の価格1ビット（円）が(3.0)とありますが、(0.3)の誤りでしたので訂正いたします。