

# 「磁気応用工学 (magnetics) について」

大阪大学基礎工学部 桜井良文\*

## 1. はしがき

磁気を応用したものという電気工学でもむかしから広く使われている強磁性材料を用いた機器、すなわち、変圧器、電動機、発電機、リレー、インダクタ・コイル、電磁石、永久磁石などを思いうかべる。また、近くは磁気増巾器のようなものを考える人もあろう。しかし、磁気の現象については電気よりはゆっくりではあるが、次第に基礎がはっきりしてきており、これに従って新しい機能をもつ素子としての応用も開発されていて、特に最近の磁性薄膜記憶素子の開発以後、その見方がマクロなものからミクロなものになりつつある。いまやわれわれはその着目する対象を磁束というようなマクロなものから、磁区(磁壁)やスピンの振舞いに向けようとしている。丁度半導体工学のれい明期のように。

磁気応用工学 (Magnetics) の名はまだ耳新しい。これは第2次大戦後に生じた磁気増巾器が角形ヒステリシス磁心の開発を促し、これから Non-linear Magnetics (非線形磁気応用) の名前が生れたが、これと電子計算機メモリから生れたフェライト→磁性薄膜の流れとの合流によって生れた名前であって、電子工学 (Electronics) や原子核工学 (Nucleonics) などに対応している。

ここでは Power Magnetics を主とした Non-linear Magnetics——これは磁心のスイッチング作用と  $\phi_s$  の一定性に基づく——と Information Magnetics (Computer Magnetics) ——主として記憶作用に基づく——とについてのべるが、それに先だち基礎となることがらにふれておこう。また、従来から広く使われている電磁機器については紙面の都合上省略する。

## 2. 強磁性体の基礎

### 2.1 スピンの配列と磁性体の分類

磁性は原子の磁気モーメントに起因するが、この原子磁気モーメントとしては (i) 原子核のまわりの電子の軌道運動に伴うものと (ii) 電子自身の自転に伴うもの (スピン) とあり、種々の実験によれば強磁性の磁気の担い手の大部分が (i) ではなく (ii) によるものであ

ることがわかっている。従って一般には原子磁気モーメントを略してスピンと呼んでいる。

磁性体を分類すると次のようになる。

強磁性 (ferromagnetism)	{	フェロ磁性 (ferromagnetism)
		フェリ磁性 (ferrimagnetism)
準強磁性 (metamagnetism)	{	寄生強磁性 (parasitic ferromagnetism)
		ferromagnetism)
常磁性 (paramagnetism)	{	反強磁性 (antiferromagnetism)
		常磁性 (paramagnetism)
反磁性 (diamagnetism)		

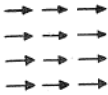
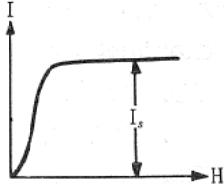
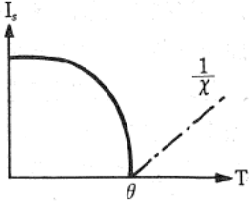
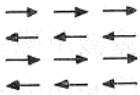
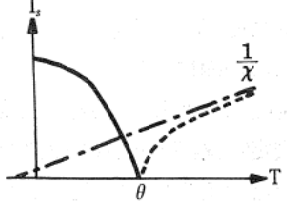
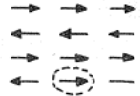
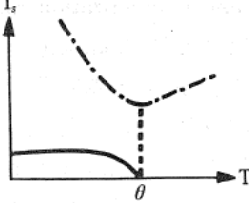

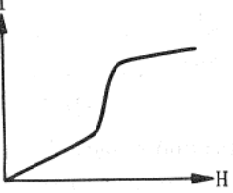

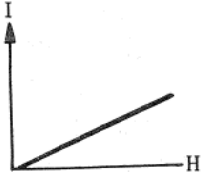
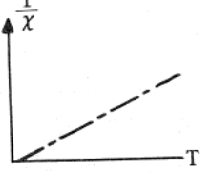
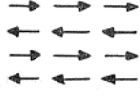
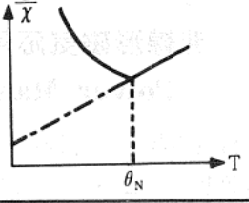


これらをスピンの配列および  $I-H$ ,  $I_s$  (飽和磁化)- $H$ , および  $x$  (磁化率)- $H$  特性によって示すと第1表のようになる。我々が主に利用するのは強磁性である。

### 2.2 磁区

強磁性体の磁化は巨視的にみると一様である場合もあるが、これを微視的に見ると決して一様なものであり得ない。すなわち磁化している磁性体の一部を、倍率100倍程度の顕微鏡によってその磁化の分布のようすを見ることができるとすれば (これは実際に可能であるが) 右または左へ磁化した領域に分かれているのが見られるであろう。そして全体として左向きに磁化している場合ならば、左向きの磁化をもった領域の方が右向きの磁化をもった領域よりも平均的にその体積が大きいにちがいない。このような領域のことを磁区 (magnetic domain) とよんでいる。1932年、Block は磁区と磁区との境界で、スピンの徐々に回転し、ある厚さの遷移層をつくっていることを計算し、これを磁壁 (domain wall) と名づけた。1926年、本多、茅両先生は、はじめて、鉄-ニッケル、コバルトの単結晶について磁化曲線を測定し、結晶方向によって、磁化曲線の形が非常に異なることを発見された。そして各結晶にはいくつかの磁化しやすい方向があることがわかった。この方向を磁化容易方向 (direction of easy magnetization) とよんでいる。たとえば鉄では「100」「010」「001」の3方向が磁化容易方向であることがわかった。これらの方向は自発磁化  $I_s$  が安定に向きやすい方向であり、従って、特に外部磁界の存在していないときには、これらの3方向に平行または逆平行に自発磁化を向けた6種類の磁区があることが予想されるよう

\*制御工学教室

表 1

分類	スピンの配列	I-H特性	$I_s, \frac{1}{\chi}$ -T特性
フェロ磁性			
フェリ磁性		同上	
寄生強磁性		同上	
準強磁性			
常磁性			
反強磁性		同上	
反磁性			

になった。このように自発磁化の結晶学的方向によって内部エネルギーが変化する現象を磁気異方性 (magnetic anisotropy) とよんでいる。

### 2.3 磁化機構

強磁性体を磁界中に入れ、磁界を強くしていくと、磁化はしだいに強くなり、遂に飽和に達する。このような磁化曲線であらわすことができるが、この間の各磁化過程が、どのような磁区構造の変化に対応し、またどのような磁化機構によるものかを考えてみよう。まず、消磁状態から出発してごく弱い磁界の範囲では、磁化の変化は可逆的で、この範囲を初透磁率範囲と称する。

さらに磁界を強くしていくと、磁化曲線は急に起上るが、この範囲に入ると、一度増した磁界を減じて磁化は可逆的にはもどらない。これはこの範囲では磁壁は一つの安定な位置から次の安定な位置へ不連続的に移動するためと考えられている。この範囲を不連続磁化範囲 (irreversible magnetization range) とよんでいる。この範囲ではまた Barkhausen 効果がいちじるしいが、これは個々の不連続な磁壁移動に伴って、磁化が細かく不連続的に増加するためである。また、磁化に伴う発熱効果もいちじるしい。これはやはり不連続磁化の際に磁界による仕事の一部分が熱となって消費されるためである。

不連続磁化範囲を越えると、磁化曲線は再びねて、磁化は可逆的になる。ここでは磁壁移動はすべて終っており、磁化は各容易軸からの回転磁化によって行なわれる。これを回転磁化範囲 (rotation magnetization range) とよんでいる。そして磁界が強くなるにつれて飽和磁化に近づいていく。

飽和に達した後にさらに磁界を強くしていくと、磁化は飽和磁化からさらに磁界に比例して増加していく、これは外部磁界によってスピンの平行性を増すことによって起るもので、普通の磁性体で比較的磁化しやすい物質の場合はこの効果は無視できる。

## 3. 非線形磁気応用 (Power Magnetics)

磁性材料のなかで新しく着目された性質はいわゆる角形ヒステリシスという図1に示すような磁化特性で、方

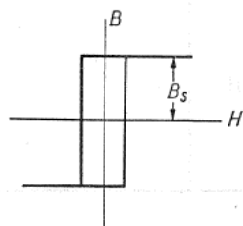


図1 磁化特性

向性 50 Ni-Fe 合金、フェライトをはじめいろいろの材料が開発されている。その特長とするところは次の3点である。

- (1) 傾斜 ( $\mu$ ) の非常に大きい領域 (不飽和領域) と非常に小さい領域 (飽和領域) とをもつ。
- (2) 飽和磁束レベル間の距離  $2\phi_s$  が一定である。
- (3) 磁束レベルを記憶する。

これらの性質は (i) 増幅, (ii) 発振, (iii) 周波数変換, (iv) 検出, 測定, (v) 標準, (vi) 無接点リレー, (vii) 演算, (viii) パルス回路, (ix) 記憶 (記録), (x) 計算機素子などに利用されている。

表2はこれらの素子を一覧表にして示したものである。

## 4. 計算機用磁気素子 (Computer Magnetics)

Computer Magnetics としては記憶素子が主であるが、最近では各種論理素子が開発されてきた。

### 4.1 記憶素子

- (1) フェライト記憶素子

2進メモリ用フェライトは現在電子計算機に最も広く用いられている記憶素子で、普通用いられるのは環状磁心である。これをマトリクスに組み、板状にしたものがコアマトリクスである。(図2) 磁心寸法は外径12~50ミルのものが用いられている。

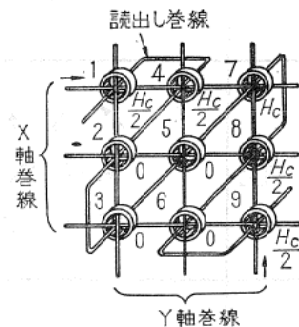


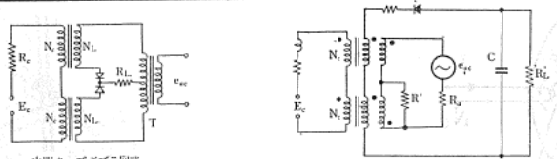
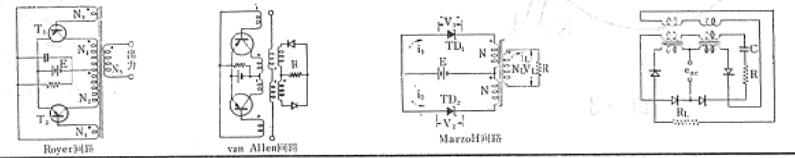
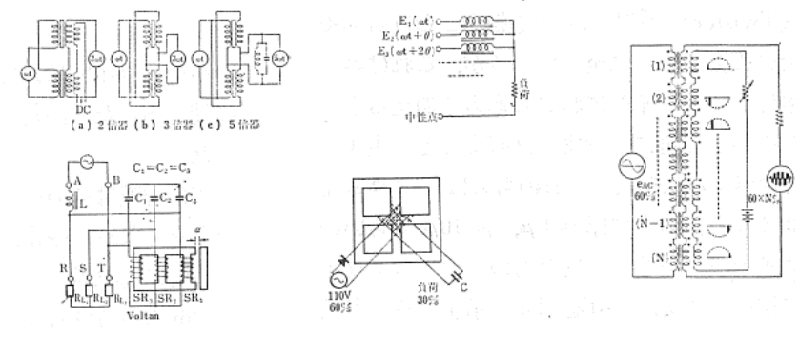
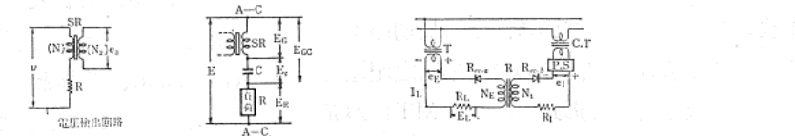
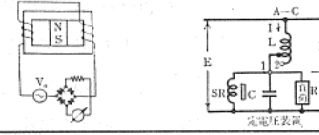
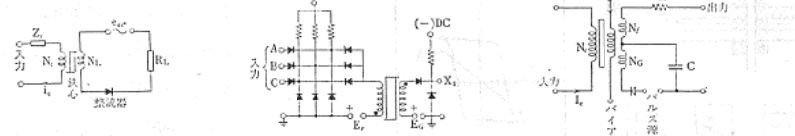
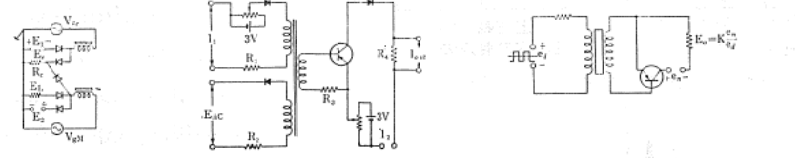
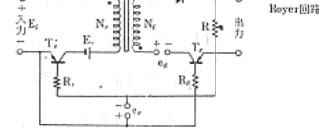
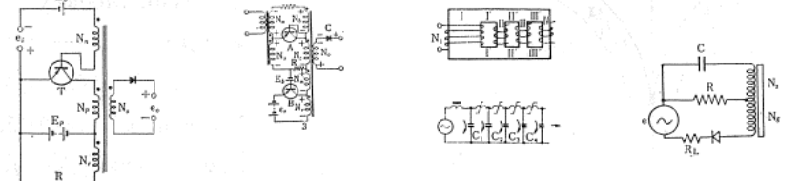
図 2

材質としては、Mn-Mg 系フェライトと Li 系フェライトが多く用いられ、Cu-M 系、Ni-Zn 系、Ni-Mn 系などもある。

コアマトリクス最大の欠点は配線 (巻線) のめんどうなことで、この見地からフェライトシートが開発された。

フェライトは焼結によって作られるので自由な形状を選ぶことができるが、この特長を生かしたものが多孔磁心 (multi-aperture-core) で、トランスフラクサ (transfluxer) を始め、いろいろなものを使用されている。図3はその代表的なトランスフラクサを示す。

表 2

機能	分類	
増幅	磁気増幅器 磁気変調器	 <p>中間タップ回路</p>
電源	発振	 <p>Boyer回路 van Allen回路 Marzoli回路</p>
	周波数変換 相変換	 <p>(a) 2倍器 (b) 3倍器 (c) 5倍器 中性点 Voltan</p>
検出 測定	電圧 周波数 位相	 <p>電圧検出回路</p>
標準	電流 電圧	 <p>電流標準装置</p>
無接点リレー		 <p>整流器 (-)DC (-)DC</p>
演算	乗算 除算	 <p><math>K_1 = K_2^2</math></p>
	A-D変換	 <p>Boyer回路</p>
パルス回路	整形 計数 発生	

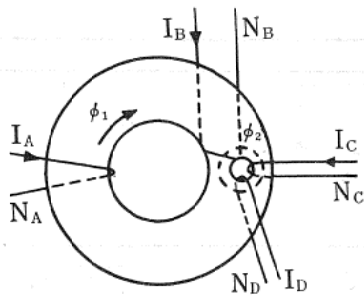


図 3

(2) ツイスタ

ツイスタ (Twister) は 現在電子交換機におけるメモリとして最大の規模をもつに至っているが、これはニッケルなどの強磁性体のワイヤにねじり応力を加えると磁気異方性がそのねじり角に平行または直交して発生することを応用したものである。実際のもものはニクロムまたは銅線 (3 ミル径) の上に厚み  $1 \mu$ 、幅  $10 \mu$  くらいの 4-79 パーマロイテープを巻きつけたもの (ツイスタワイヤ) をおもに用いている。これを図 4 に示すように多数本ならべ、語 (word) 用のソレノイドを共通に直交させたものを 1 枚の板として用いている。この最初のものは一時記憶用として作られたが、その後、半固定記憶として情報蓄積に磁石板を用いる形式 (略称 PMT) が発表された。図 4 は PMT を示す。

(3) 磁性薄膜

真空蒸着または電着により作られた厚さ約  $10^3 \sim 10^4 \text{ \AA}$

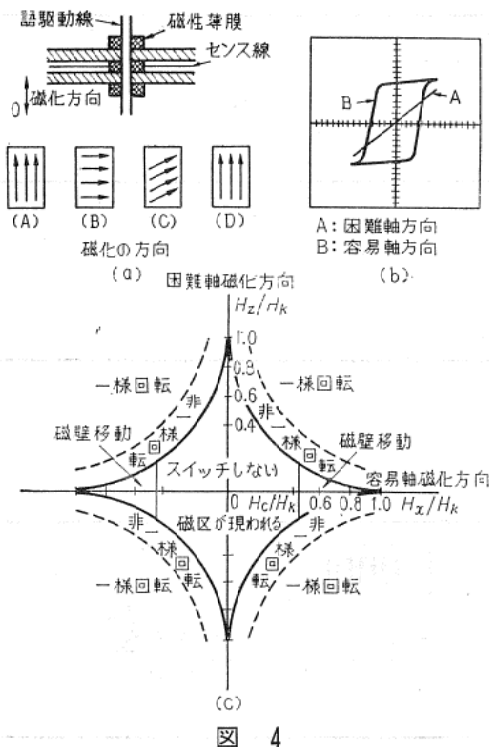


図 4

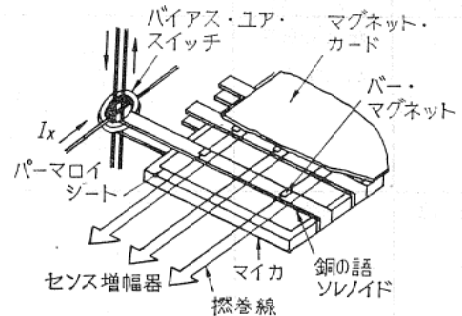


図 4

のパーマロイ膜は磁気特性が興味深く、スイッチングが高速であるため高速記憶素子として用いられるようになった。

磁性薄膜はその厚みの薄いため、膜厚の方向に反磁界が大きくなり、磁化が膜面の方向にしか向かないので、蒸着時に弱磁界をかけると強い異方性を示す。すなわち、図 5 (b) にみられるように、その磁界方向には角形ヒステリシスを示すが、それと直角の方向には線形磁化特性をもつ。それゆえ、蒸着時の磁界の方向を膜の容易軸 (easy axis)、それと直角の方向を困難軸 (hard axis) という。記憶には容易軸の角形性を利用するのであるが、その場合のスイッチングの特性は図 5 (c) に示されるようにアステロイド形であり、非破壊読み出しの可能性もっている。このような薄膜は  $1 \text{ mm}$  平方程度にして用いるので、基板上に  $16 \times 16$  個以上の格子状にして用いられ、その上に語駆動線、ディジット線、センス線を施す。図 5 (a) は 1 ビットについての動作を示す。いま膜が“1”の状態に磁化されていたとすると左端のような状態にある。これをディジット線のパルス電流により (B) のような磁界をかけると磁化は (C) のようになるが、パルス電流がなくなると (D) のようにもとにもどる。この過程の中で磁化の回転があるので、センス線にはパルス電圧が誘起するが、その極性は (A) の磁化方向 (すなわち“1”か“0”か) によって反転するので、読み出しが可能である。

(4) ワイヤ・メモリ

平面状の磁性薄膜はいろいろの利点があるが、磁路が閉じていないため反磁界が生ずる。これを改良したものが“Wire Memory”で、直径  $1/8 \text{ mm}$  の燐青銅線に厚み約  $1 \mu$  程度にパーマロイ膜を電鍍により付けたもので、普通は円周方向が容易軸になるようにして用いる。これでは磁路は閉じるので、出力電圧も大きく特性もよい。図 6 はその組立図を示す。このほか、ワイヤ・メモリと同じような特長をもつものに Chain-Memory がある。

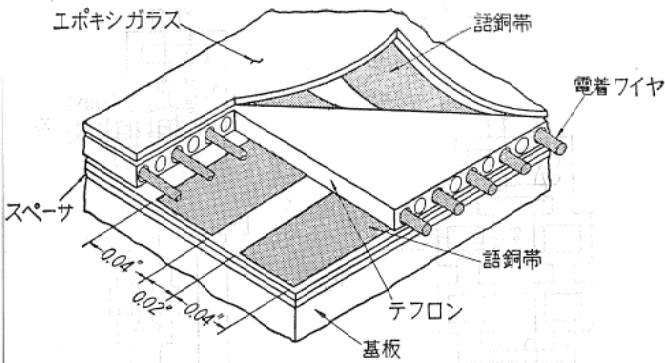


図 6

(5) その他

以上のべたほか、磁性線、磁性テープ、ドラム、ディスクあるいは超電導を利用したクライオトロンなどが記憶素子として用いられている。

磁気テープは磁気録音技術をそのまま記憶素子にもち込んだものであるが、記憶密度の上昇、高速化などの要求からドラムやディスクの形状をとる場合もあり、録音や録画とちがってデジタル量記憶では特に角形ヒステリシス特性の材料が望まれる。材料としては、 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$  (または  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 粉末を基板上に 0.01mm 程度に塗布したものが多く、磁気ドラムでは Ni-Co 合金をめっきしたものもある。これらは前節までにのべたものにくらべて、外部記憶装置として用いる点でことなっている。

磁性線は古くは磁気テープと同様な使い方をしたこともあるが、現在ではほとんど一時記憶としての遅延線に使われている。この場合は磁歪を利用して線にねじりを加え、これが線上を伝搬してゆく速度を利用してデジタル量を一時的に記憶する。線としてはニッケルが多く用いられる。

4.2 アナログメモリ

最近、適応回路などに用いられてきた磁心アナログメモリは非破壊読み出しが可能なので注目されている。代表的な構造としては磁気増幅器と同じく 2 磁心を一組として使い、一方の巻線には 100KC 程度の高周波を印加し、他方の巻線から 2f すなわち 200KC の出力を読み出すもので、図 7 に示すように 1000 個のパルスに対応

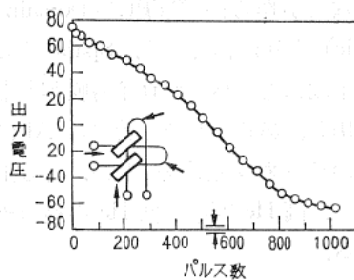


図 7

して比例出力電圧をだす。この場合 100KC 駆動電圧だけでは記憶磁束は変わらないが、これに書き込み電圧パルスを重ね合わせると磁束変化が生ずるようになる。

磁心 2 個ではその特性の不均衡が問題となるので、磁心 1 個にする試みがいろいろなされている。トランスフラクサ (前述) を用いるのも行なわれているが、非破壊読み出し可能な磁束レベルが半分なので、これを改良する方法として (i) 記憶用磁路は角形ヒステリシスだが、読み出し磁路には直線的磁化特性をもった材料を用いるもの、(ii) 普通の環状磁心 1 個で駆動電源を変調波にしたものなどがある。また、直交磁界を用いる方法も開発されている。

上記のものは金属磁心またはフェライト磁心を用いているが、最近、磁性薄膜を用いるアナログ・メモリが研究されている。その 1 つはワイヤ・メモリを用いたもので、他は平板状磁性膜上に  $H_0$  の小さいチャンネルを作り、その磁区の伸長特性を利用するものである。これらのアナログ・メモリで問題となっているのは乗算特性と線形性 (ヒステリシスのないこと) である。

4.3 MAD

多孔磁心 (multi-aperture-core) に注目すれば、その機能としては 2 値メモリに制限されることなく、いろいろのものが作れるはずだし、情報を磁束として内部構造で処理できるので、配線も入力と出力の場所だけですすという利点も生ずる。

多孔磁心で Morris らは、いろいろな論理機能を実現しているが、図 8 はシフトレジスタ、OR 回路の場合の接続図で、シフトレジスタの場合のパルスおよび磁化の

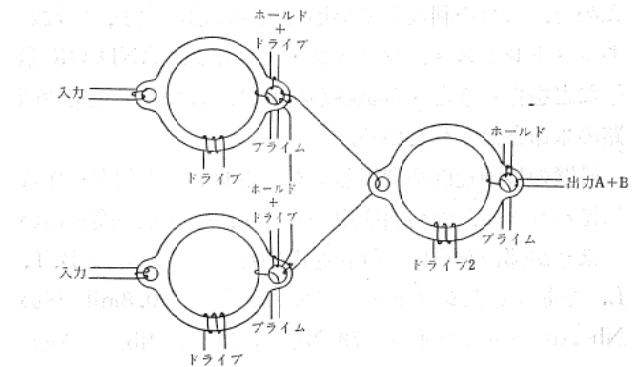
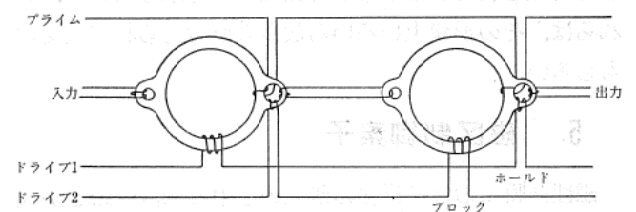


図 8

タイミング図を図9に示す。これでは全磁気化とはいえず配線が沢山必要である。全磁気化論理素子では図10のLaddicが興味深い。図は各脚が同じ断面積をもち、AND機能をもつ場合を示しているが磁路パターンとしてはもっと複雑なものもある。

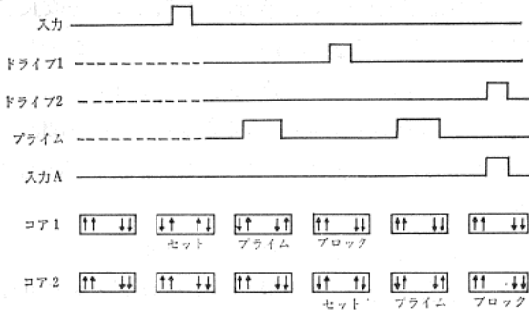


図 9

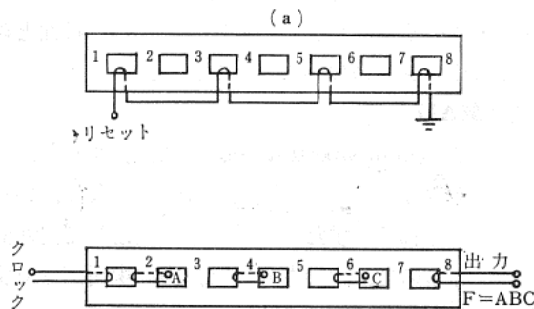


図 10

図11は Bell Tel. Lab. や Stanford Research Inst.などで研究されている小形多孔論理磁心を示している。これらは、その形状上いろいろなものが考えられて大変おもしろい。

### 5. 磁区制御素子

磁性薄膜における磁化の研究の途中で磁区の動きが観察され、それを制御することができることがわかってきたので、これを利用して小形で高速の論理素子、すなわちシフトレジスタ、フリップ・フロップ、AND, OR 素子などを作ろうとする試みが現われ、これが磁気集積回路の本命と目されている。

磁壁の移動速度を利用してシフトレジスタなどを作るにはバルクの磁性材料を用いるより、細線や薄膜を用いるほうが都合が良い。細線を用いたものとしては B. T. L. で開発したシフト・レジスタがある。0.8mil 径の Nb-Ag パーマロイ線 (79-Ni, 17-Fe, 3-Nb, 1-Ag) を図12のように長さ方向 (容易軸方向) に磁化し、その局所的磁区をパルス電流により一方向に移動させるもの

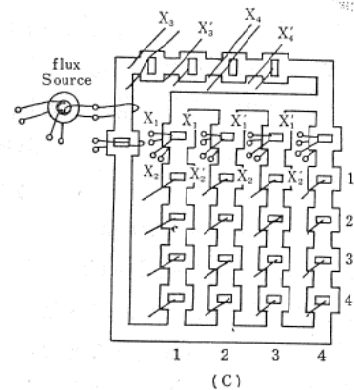
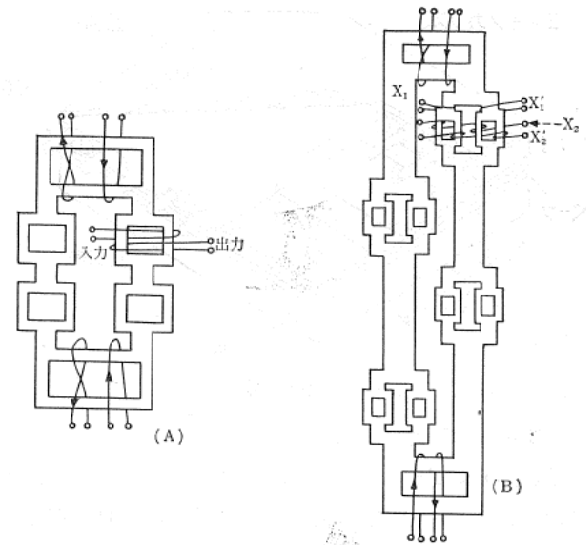


図 11

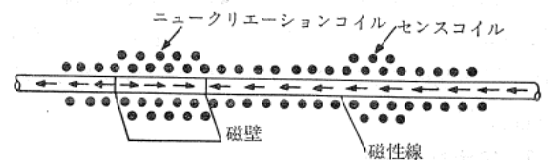


図 12

で、Nucleation 磁界が磁壁の Propagation 磁界に比べ3倍くらいになるよう Re-entrant 特性を持たせてある。

磁性薄膜にパルス磁界を印加して磁区の振舞いを観察してみると磁区のとがり (Domain Tip) が興味深い動きをするのがわかる。これを利用して超小形の論理素子やダイオードなどが作られ DTPL (Domain Tip Propagation Logic) と呼ばれている。Spain らの開発したものは Al を下地にもつパーマロイ薄膜が大きい Hc をもつことを利用し、あらかじめ蒸着する Al によって任意のパターンのチャンネルを形成せしめ、その上にパーマロイ膜を付けて、高 Hc 膜中に低 Hc の膜のチャンネルを作るものである。

B. T. L. の P. C. Michaelis は磁性薄膜に磁化困難軸

以下40頁に続く