

3. 記憶容量向上の歴史

商用のデータ記録用磁気テープ装置が世の中に現れてから約70年近くが経過している。その間、磁気テープの用途に変化はあるものの、記憶容量は増大し続けてきた。ここでは、テープの記憶容量が向上してきた歴史と動向を辿ると共に、それを可能にしてきたテクノロジーについて紹介していく。

3.1. テープ記憶容量増加の変遷

まず始めに、記憶容量の変遷を見ていく。磁気テープの形状・サイズは、規格によって異なるため、テープカートリッジの容積（1cm³）あたりのバイト数で以下にグラフを作成した。

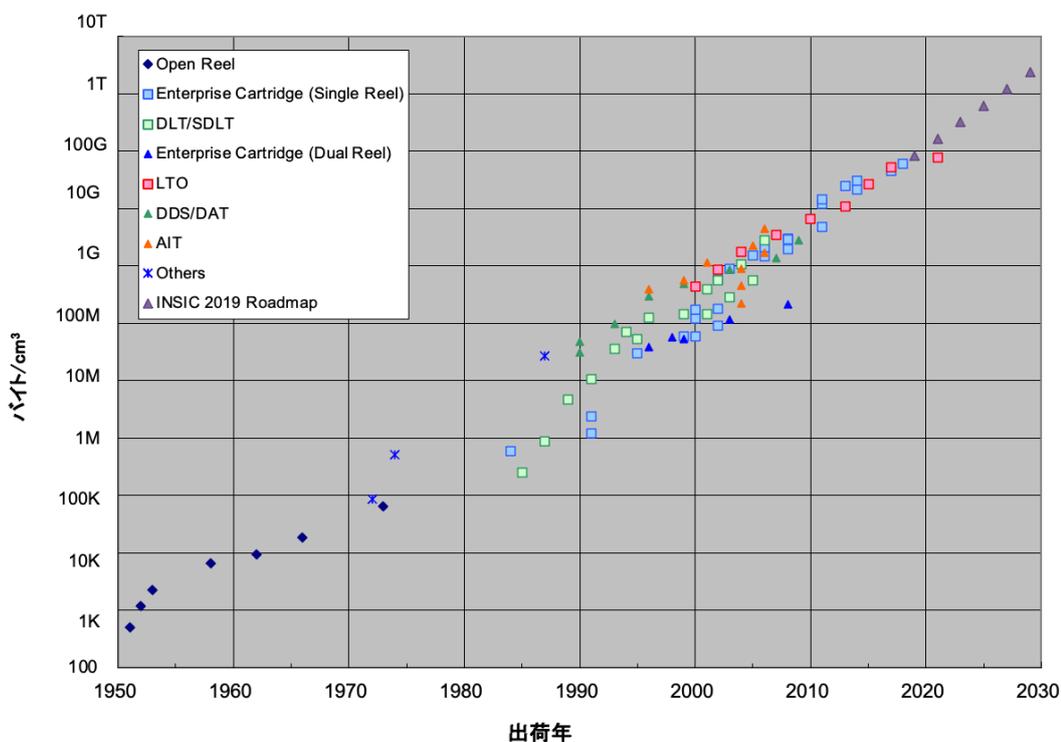


図1. テープカートリッジの容積（1cm³）あたりのバイト数（データ非圧縮時）

（注： オープンリールも直方体として計算）

一目でわかるように、（容積あたりの）記憶容量は右肩上がりで増加している。記憶容量の向上のための技術を語る前に、磁気テープの容量がどのように決まるかを解説する。

テープの記憶容量は「テープの表面積×面記録密度」で計算される。

テープの表面積は「テープ幅×テープ長」。テープ幅はそれぞれのテープの規格によって決まっている。例えば、オープンリール、DLT、LTO Ultrium（以下：LTO）なら1/2インチ（およそ12.7mm）。

AIT、VXAは8mm、DDS/DATは3.8mm（DAT160以降は8mmに変わった）。同様にテープ長もそれ

ぞれの規格によって決まっている。このテープ長を決める際の大きな要因の一つが、リール、カートリッジの大きさである。

テープはリムーバブルメディアであり、リール（カートリッジ内蔵の場合も）、カートリッジの大きさも規格によって決まる。また、トイレットペーパーの芯と同様にリールの内径も決まっている。つまりテープの占める容積は決まっているわけである。これをテープの断面積（幅×厚さ）で割れば、長さが決まる。テープを薄くしてテープを長くすれば、記憶容量が増えることになる。

	オープンリール (セルフローディングカートリッジ)	カートリッジ MT (18トラック)	LTO-9
外形寸法(cm)	φ27.44×2.858	12.5×10.9×2.45	10.2×10.54×2.15
体積(cm ³)	2152 (直方体として計算)	334	231
テープ幅(cm)	1.27	1.27	1.27
テープ長(m)	732	165	1035
テープ厚(μm)	48	25~33	5.2
トラック数	9	18	8960
容量(MB)	4.8	200	18000000
出荷開始時期	1953年 (セルフローディングカートリッジは後年になってから)	1984年	2021年

表 1. テープリール、テープカートリッジの規格値の例

一方、面記録密度は、単位面積あたりに記録されるビット数である。テープでは面記録密度は「トラック密度（テープ幅方向の密度）×線記録密度（テープの長手方向の密度）」となる(※)。トラックとは、1つの磁気ヘッド（正確には磁気ヘッドに設けられた間隙（ギャップ））がテープ上に記録するビット列をいう。このトラックが単位長当たり何本あるかがトラック密度。線記録密度は単位長当たり何ビット記録するかを表す。

※リニア記録方式の場合。ヘリカル記録方式の場合は、トラックがテープの長手方向に対して傾いているため、トラック密度はトラックに対して垂直方向の密度、線記録密度はトラックに対して並行方向の密度になる

多くのオープンリールテープではトラックは9本（8ビットのデータ+1ビットのパリティ）あり、9個のヘッドで同時に1バイト分を書き込んでいた。当然、書き込みは片道である。1984年に始めてカートリッジ式のテープが使われるようになり、トラック数が18に増えた。トラック数が倍になったことで、それだけでも容量は倍になる（線記録密度も増えたため倍どころではないが）。書き込みはまだ片道である。1991年になり往復記録が始まり、トラック数は36となった。その後もトラック数は増え続け、LTO-9のトラッ

ク数は（テープ幅は1/2インチで変わっていないのに）8960本にもなっている。ちなみに、同時に書き込むトラック数は32本であるため、全部書くのに140往復することになる。

まとめると、テープの記憶容積を増やす方法は、大きく分類すると次の3種類となる。

- (1) テープ厚の削減によるテープ長の増加
- (2) トラック密度の増加
- (3) 線記録密度の増加

3.2. 1巻580TBの実現が見えた。まだまだ伸びるテープの記憶容量

(1) こんなに薄く強いテープのベースフィルム

テープを薄くし、長くすることで容量の拡大を図ることは、HDDには絶対にまねができない芸当である。テープの厚さの70~80%はベースフィルムの厚さなので、ここを薄くできれば、簡単に記録面積を大きくでき、記憶容量や体積あたりの記録密度を高められる。

例えば、ディスク（HDD）の記憶容量は「円板の表面積×面記録密度×枚数（面数）」で計算される。円板の直径により、3.5インチHDDとか2.5インチHDDとか呼ばれており、最近の傾向としてHDDは小型化する傾向にある。つまり記録できる面積は減少する傾向にある。また、HDDが厚くなるのを避けるために、むやみに円板の枚数も増やせない。そこで容量を増やすためには、面記録密度を上げ続けなければならない。（現在のHDDの面密度は1Tb/in²くらいだが、テープのそれはまだ12Gb/in²くらいでしかない）。直径の決まった円板の面積が増やせないディスクに対し、テープは媒体を薄くすることで記録面積を増やせ、まだ面記録密度の向上に余裕があり、今後さらなる容量増加が期待できる。

それでは、テープの話に戻る。実は昔と比べて、テープの構造はあまり変わっていない。ベースフィルムというプラスチックの帯に、磁性体といわれる細かい磁石の層を載せてある。記録面積を増やすために、単純にベースフィルムを薄くすれば強度が弱くなり変形しやすくなる。また、テープを動かす時に、伸びたり切れたりしないように優しく動かす必要が出てくる。

現在のテープのベースフィルムには、PET、PEN、PAのいずれかの素材が使われている。これらの素材に共通して、引っ張った時に伸びにくい、高温・高湿に耐え水分を吸収しにくい、表面を滑らかに加工しやすい、などの特性があり、環境に対する耐性を持っている。LTO-9のベースフィルムの厚みは5μm程度とオープンリールのベースフィルムから1/8程度に薄くなっている。テープの厚みのもうひとつの要素が磁性層である。磁性層をベースフィルム上に形成する方法には、磁性体を接着・粘着性のある物質と混ぜ合わせてベースフィルムに塗る方法（塗布）と、磁性体を気化させてベースフィルムに付着させる方法（蒸着）の2種類がある。後述の記録密度とも関係するが、磁性体の改良や製造工程の改良により、磁性

層の厚みもどんどん薄くなってきている。最近の塗布によるテープでは、磁性体を含まない下層と磁性体を含んだ上層の2層構造となっている。ベースフィルム上に磁性層を作る方法は、メーカー各社の機密となっており、工場見学をさせてもらう場合でも、細部が見えない場所からしか見学できない工程である。この製造には、高度な技術と精密な作業が求められ、現状、日本でしか製造ができない。

(2) 幅13mmに8960トラックの驚異。サーボで正確にトラックを追従

皆さんは想像できるだろうか。1950年代のオープンリールのテープは幅約12.7mmの中に9トラックを記録していたが、最新のLTO-9では同じく幅12.7mmの中に8960本のデータトラックとさらにサーボ制御のための信号を記録している。つまり1mmあたり705本以上のトラックがある。「HDDと比べたら少ないでしょう？」という声も聞こえてきそうだが、テープはHDDのディスクのように軌道が安定しているわけではない。HDDの速度には遠く及ばないが、毎秒10mのスピードでテープが送り出されている。HDDと比べ、はるかに不安定な軌道を描くテープに、これだけ高密度にトラックを刻んでいるところが驚きである。

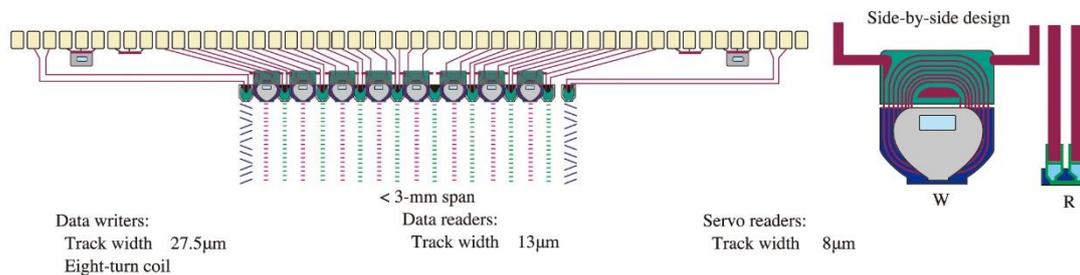
ただ、HDDと異なり、情報を記録するテープとヘッドが分離するように作られているため、他所で書いたテープを（規格が同じなら）読めなければならない（可換性と互換性）。一定の規格の範囲内で製造されているとは言え、特性が多少異なるドライブ間（あるいはテープ間）の互換性を維持しながら記録密度を上げていくことが、HDDとは異なる難しさなのである。

トラック密度を増加させるためには、記録トラックの幅を狭くする必要がある。このため次のような工夫が行われている。

- ◆ 高密度化されたトラックに対応するため、記録ヘッド、再生ヘッドの幅を狭くする
- ◆ 磁気テープ面とヘッドの位置が正確になるようにするため、テープ、ヘッド、ヘッドを支持している機構、テープの走行路などの寸法精度（製造精度、組立精度）を上げる。
- ◆ それでも、ヘッドとテープ（あるいはトラック）がずれた場合に、テープの位置に追従するため、ヘッド位置を制御するためのサーボ方式の改良

IBMの第1世代LTOテープドライブで使われたヘッドの図を掲載する。このヘッドは半導体製造の技術を用いており、8個の書き込みヘッド、8個の読み出しヘッド、2個のサーボ用ヘッドが1枚のウェハー上で同時に作られ、切り出されたものである。図では、両端のサーボヘッドでハの字形のサーボ信号を読み出しながら、その内側の書き込みヘッドでデータの書き込み、あるいは、読み出しヘッドでデータの読み出しを行っている様子をイメージしている。両端のサーボヘッドの間隔は2.86ミリメートルなので、それほど小さくないとの印象を持つかもしれないが、書き込みヘッドが書き込むトラックの幅は27.5マイクロメートル。磁界を作り出すためのコイルの大きさが目立っているが、その先端で書き込みを行う部分（図の下端）の幅は、かなり狭くなっている。読み出しヘッドの幅は14マイクロメートル。サーボヘッドの幅は8マイクロメートルとさらに狭くなっている。2つの書き込みヘッド、あるいは、読み出しヘッドの間

隔は 333 マイクロメートルである。



Ultrim I chip image schematic showing writers, readers, servo elements, and tracks. A 5-in. wafer contains 476 modules (238 heads). Each module is 22.5 mm × 0.75 mm (two per row). There are 16 interleaved write and read elements on a 166.5-μm pitch.

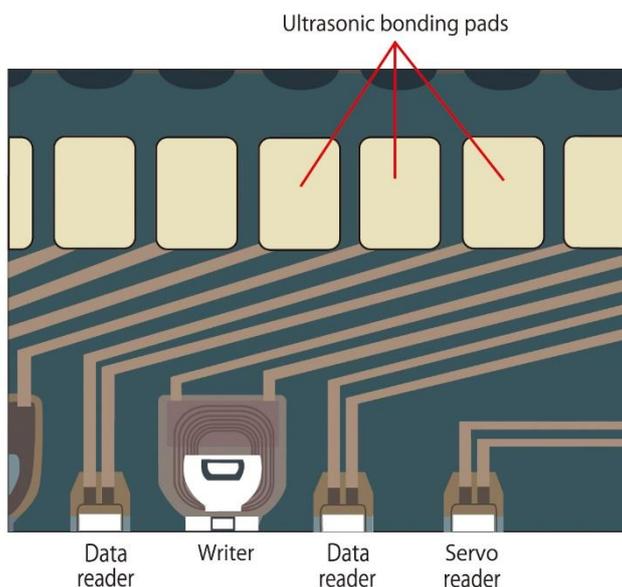


図2. ヘッド構造

(上記図 2 点とも出典 : ”Hard-disk-drive technology flat heads for linear tape recording,” R. G. Biskeborn and J. H. Eaton, IBM Journal of Research and Development, Vol.47 No.4, July 2003)

初期のテープドライブではトラック幅が広がったので、製造・組立精度だけでヘッドとテープの位置関係は十分に保てていたが、最近のテープドライブでは、サーボを行って、ヘッドがテープの所定の位置に所定の精度で追従していることを確認しながら、記録・再生を行っている。

LTO では、ヘッドを所定のトラック位置に追従させるために、テープ製造時に記録されたサーボ信号を用いて制御を行っている。サーボ信号とはハの字形のデータパターンの繰り返しであり、サーボ信号の記録されている部分をサーボバンドという。このサーボバンドは 186 マイクロメートルの幅がある。／＼のパターンが繰り返されているので、(例えば) ／の部分の繰り返しからテープの速度がわかる。次に／と＼

の間隔を調べる。(サーボバンドの幅と比べてサーボヘッドの幅を狭いので) /と/の間隔に比べて/と\の間隔が短い場合にはハの字の上側に位置していることがわかり、/と\の間隔が長い場合にはハの字の下側に位置していることがわかる。この測定をテープ走行中に繰り返しながら、ヘッドの位置を所定の位置に制御している。



図3. トラッキング精度

秒速16キロメートル、左右のブレ幅1ミリメートルで、鹿児島ー札幌間1600キロメートルをバイクが一直線に疾走している姿を想像してほしい。ロケットの打ち上げ速度よりも速く走るバイクはありえないが、速度・距離に対するブレ幅の小ささから、高精度でテープとヘッドの位置の関係が保たれている(サーボ制御されている)のがわかるはずである。

(3) 面記録密度は2桁アップの余地もある

これはHDDと同じ容量向上の手法である。だが、テープの面記録密度はHDDと比べてまだ2桁低い。つまり、その気になれば、テープには面記録密度を高める余地が非常に多く残されているとも言える。

線記録密度を増加させるためには、記録単位に相当する磁区(磁場の方向が揃っている区域)の大きさ(長さ)を小さく(短く)する必要がある。別の言い方をすると、磁性体の粒を小さくすることに加え、高い周波数で記録を行う必要がある。このためには、次のような工夫が行われてきている。

研究・試作レベルではあるが、従来の記録密度をはるかに上回る技術の発表が続いている。

2017年8月 ソニー(株)

「業界最高の面記録密度 201Gbit/inch² を達成した磁気テープストレージ技術を開発」

「従来比 220 倍の密度により 330 テラバイトの大容量記録を実現」

<https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201708/17-070/>

2020年12月 富士フイルム

「世界最大容量 1 巻当たり 580TB 磁気テープの高容量化技術を開発」

<https://www.fujifilm.com/jp/ja/news/list/5822>

それぞれアプローチは異なっているが、磁性体の微粒化・高配向化、磁性層の薄膜化などによって磁区を小さく、つまり、記録密度を大きくしている。

また、小さい磁性体、薄い磁性層で確実に磁気を記録・保持するために、磁性体の磁気特性を（ヘッドの性能などとのバランスを取りながら）向上させる（単純に保磁力を大きくしてしまうと磁化させにくいというジレンマが生じてしまう）ことも研究されている。

もちろん、データが記録される磁性体・磁性層の進化だけでは記録密度は向上しない。磁区を小さくすることが可能であっても、小さい磁区を実際に記録し、小さい磁区から再生も行う必要がある。このため、

- ◆ 記録ヘッドが作り出す磁界の大きさを小さくするために、（記録のための）漏れ磁界を作り出すギャップを小さくする
- ◆ 小さい磁性体、薄い磁性層からの微小な磁気の変化を読み出すための再生ヘッドの感度を上げる
- ◆ 小さい磁界で確実に記録・再生を行うために、磁性面の平滑度を上げて、ヘッドと磁性面の距離を微小・一定に保つ

などの研究開発も合わせて行われている。

線記録密度の増加、トラック密度の増加の両者に関係するのがヘッドの小型化の技術である。最近は、半導体の製造プロセスと同様なプロセスで製造される、薄膜ヘッドが使われている。薄膜ヘッド以前は、機械加工、巻線加工でヘッドを製造していた。最初期の薄膜ヘッドは記録用、再生用ともに巻線（コイル）などを微細化していたが、ほどなくして磁気抵抗素子（MR 素子）が実用化されたことにより、再生用ヘッドは MR 素子を利用した薄膜ヘッドが利用されている。磁気抵抗効果（MR 効果）には AMR、GMR、TMR などの原理があるが、テープドライブでは AMR から GMR、そして LTO-8 で TMR が採用されている。