

ハードディスクとムーアの法則

2013年8月21日(11月6日改訂)

西村 二郎

1. まえがき

半導体の集積密度は18~24ヶ月毎に倍増する、というのが当初のムーアの法則である。集積回路のトランジスタの数という言い方もなされているが、本質は記録密度にある。ここでは記録密度が指数関数的に上昇することと定義する。1965年ゴードン・ムーアがこの経験則を発表して以来、半導体業界の技術進歩のロードマップ化した。

ハードディスクドライブ(HDD)は1956年、記録密度が2kbpシ(1平方インチ当りのbit数)のIBMのRAMACに始まり、幾多の技術革新を重ね2011年4月には記録密度が1平方インチ当たり744Gbpシに達した。ムーアの法則に従って記録密度が伸びている典型的な製品である。

半導体の場合、記録密度向上の手段を一言で言えば線幅の狭小化である。パターンを描くために波長の短い光が用いられる。半導体は基幹製品であり市場の拡大が見込めること、ハイテクでありながら開発の目標・手段が明確なので、参入する企業も多く競争が激しかった。

HDDも市場の成長性から多くの企業が参入した。とくに1980年代後半には顕著であった。日本においては基板兼業の2社を含めて計9社がハードディスク(HD)の製造に参入した。

ムーアの法則を維持するのは半導体もHDDも概ね技術の小改善によっていた。HDDの設計はHDDメーカー主導で、各部品の小改善をまとめ次期HDDが開発されていた。このような事情から、HDやヘッドなどの基幹部品を組立メーカーが内製するようになり、90年代末からはとくに顕著になってきた。独立系HD/ヘッドメーカーは2000年を挟むIT不況、そしてリーマンショック後の不況期は低操業に苦しんだ。組立メーカーの垂直統合の脅威に曝されてきた。

しかし、ムーアの法則を維持するため、時としてイノベーションが必要となる。1990年以降を例にとれば磁気抵抗を利用するMRヘッドの導入と垂直磁気記録方式への移行が該当する(図1参照)。後になって振り返ってみると、こういう時期には組立メーカーの主導性は弱まっている。

また過当競争である間は、市場環境の良い一時期を除いて、経営的に厳しい時期が続いた。しかし、表1のように業界の整理統合が進んだのでHDDメーカーの業績は顕著に改善されている(図2参照)。恩恵は部品メーカーにもおよび始めた。

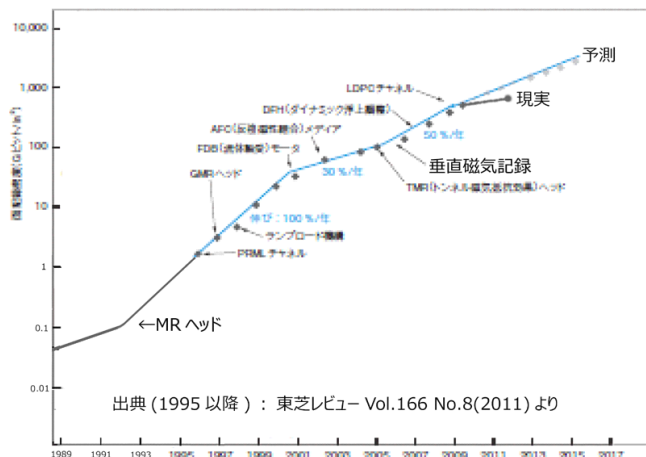


図1 HDDの記録密度の動向と技術革新

表1 HDD業界の変遷

	1990	1996	2004	2012
HDDメーカー	41	21	9	3
HDメーカー	21(6)	17(5)	8(4)	4(2)
ヘッドメーカー	14(4)	13(4)	6(4)	3(1)

()内は独立系メーカーの数

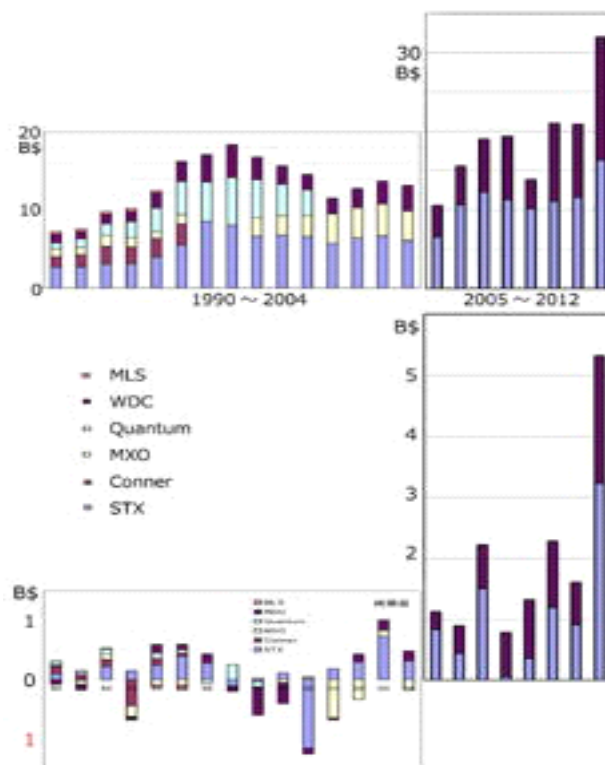


図2 上場HDDメーカーの業績の推移

図2は米国Nasdaq市場に上場されているHDD専門メーカーの業績である。

ここでは1990年台を振り返り、ムーアの法則を維持するために必要な新たなイノベーションが業界に与えた微妙な影響について紹介するとともにムーアの法則が末期的症状を示し始めたことに加えて、フラッシュメモリの追い上げに苦しむHDD業界の現状と将来について考えてみたい。

2. MRヘッドの出現

磁気記録の書き込みおよび読み出しは薄膜ヘッドにより行われていた。1992年頃から読み出しにはMRヘッド使われるようになり記録密度の向上に大きく貢献した。初期はIBMの独走状態であり、競合するHDDメーカー、ヘッドメーカーは対策に苦慮していた。Western Digital社は、90年台半ばには、ワンポイントリリーフとして擬似接触記録を採用して苦境を凌いでいた。今思うと、当時のHDDは家電に採用されていなかったことなどにより、ハイエンド以外は一般的に短寿命であったのでこのようなトリッキーな手が採用可能であったのであろう。

MRヘッドは1997年、飛躍的に感度を高められるGMR (Giant MR) ヘッド、さらにTMR (Tunnel MR) ヘッドへと発展していった。蛇足だがGMR効果はスピンの方向を保存するMRAMの開発を誘発した。スピントロニクス誕生である。量子工学の幕開けでもある。GMR効果の発見者 (Peter Gruenberg : 独と Albert Fert : 仏) は2007年のノーベル物理学賞に輝いた。

なお、GMRヘッドでもIBMが先行した。しかし、それ以降は、ヘッドの技術者の大量流出に加えて競合他社の技術進歩もありIBMの優位性は次第に崩れていった。そして1999年の基板全面ガラス化という技術経営上の誤りから、ドル箱であったハイエンドのシェアを低下させ、2003年にはHDD事業を日立製作所に譲渡した。全面ガラス化の決定の背景には低フライングハイト化狙いの他、スパッターのみの工夫による磁気異方性の付与技術の確立があったようである。時を同じくして同様な技術を開発していた昭和電工の経験から言えば、磁気異方性が内(外)径を取れば外(内)径が不十分であった。

そのことはさておき、学会をも凌ぐ技術王国を築き上げていたIBMについて経営工学的検討がなされることを期待したい。

読み出しヘッドの高感度化に対応して、HDのビットの微細化が進み、磁気記録方式は面内から垂直へと移行すべき必然性が生じたのである。

3. 垂直磁気記録への移行

垂直磁気記録方式は、概念としては、1975年東北大岩崎教授によって提唱された。HDDにおいては1990年台の初め頃から米国のCenstor社がこの方式の製品を市場に出していたと言われている。実際は

ヘッドが接触式で磁力線がより深く浸透するようになっていただけで本質的には面内記録であった。記録密度も競合他社に比して高いわけではなく1994年には業界から姿を消した。提携先の電気化学 (HD)、大同製鋼 (ヘッド) も撤退した。

現在の垂直磁気記録方式への移行は2005年、世界に先駆けて東芝-TDK-昭和電工連合軍の手によって先鞭が付けられた。最近、その重要性が叫ばれているが、筆者が体験した数少ないOpen Innovationの成功例の陰には強固な信頼関係があった。磁性膜の開発自体は本質的に化学系技術者向きの仕事だが、化学会社の化学系技術者の足らざるを電機会社の電子工学系技術者とのコラボが補ったのである。

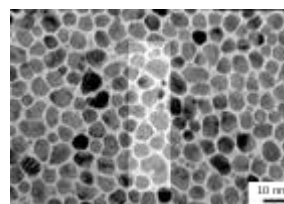
岩崎教授の提案は概念的なものなので、HDDに直接役立つものではなかったが、伝統の強みと言うべきか、日本では、早くから、水面下で研究が行われていた。垂直磁気記録への移行が不可避となったとき、この分野では遅れていたHDD業界の雄、米国のSeagate社はCarnegie Mellon大学の教授をスカウトし、Pittsburgh研究所を設立した。Doctorだけの数で100名集めると言われた研究所の構想は当時、業界に大きな波紋を投げかけた。なお、この研究所は垂直磁気記録移行後は目的は果たしたとして解散になっている。物量作戦が経営を圧迫したとも言われている。

二つの大きなイノベーションを経て、HDDの主役であった組立メーカーの役割に変化が出てきた。

4. 現行技術の限界

記録密度744Gbps (Gbit/inch²) (→500GB/2.5インチディスク1枚)のHDDが上市された2011年4月以来、業界は記録密度向上に関しては鳴りを潜めていた。最近になって1枚で640GB相当のHDDも姿を現したが、記録密度の上昇ペースは明らかに鈍化している。

ビットサイズが小さくなると、熱擾乱の影響が問題となる。これを防ぐにはHDの磁性膜の保磁力を上げる必要がある。保磁力を上げれば、書き込みが困難となる。つまり、高記録密度、熱安定性、書き込み易さは3スクミの関係にあり、磁気記録のトリレンマとして問題になっている。しかし、記録密度が上がらない最大の理由は連続媒体中に分散している磁性粒子のサイズを小さくすることが困難になったからである。図2はディスクの水平断面のEPMA写真



である。記録密度を上げるには磁気粒子の磁気絶縁性を保ちながらビット(左図の明るい部分)中に如何に多く存在させることができるかが鍵である。

図3 ビットイメージ

このような特性の探求は化学系技術者が得意としている。744Gbpsの記録密度を可能ならしめるHD

の量産に一番乗りを果たしたのは、やはり化学会社(昭和電工)であった。

ただし、この先、瓦状記録(Shingle Write)やほどほどのレベルの熱アシストに助けられるとしても、現行技術の延長線上に記録密度の向上余地はあまりない。

これらの解決策として現在喧伝されている技術がBPM(Bit Patterened Media)と熱アシスト(またはマイクロ波アシスト)との組合せである。筆者は下記の理由により、BPMは本命ではなく、スピンドットなどの磁気記録に代るイノベーションが必要と考えている。スピンドットの基盤となる学問は物理学であるが、重要なのは物質の探索である。化学系企業が主導的役割を果たすべきである。

5. 半導体メモリーに対するHDDの優位性

記録密度744 Gbpsのディスクのビット長は15nmであった。この時期のフラッシュメモリーの線幅(30nm程度)に比して明らかに小さい。位置決め技術はサスペンションメーカーが担当している。最近ではアクチュエーターの他、ピエゾで微細制御をするダブルサスペンション方式が採用されている。位置決め技術は今やヘッドやHDと共にHDDの基幹技術となっている。

一方、半導体メモリーの線幅は、現在極紫外線リソグラフィによっている。理論的限界が迫っているわけではないが、装置コスト等の問題があり、現実的な限界が迫っていると言わざるを得ない。

半導体対HDDの戦いはpatterningとpositioningの争いとも言える。そしてpositioningは連続媒体と結びつくことで生きる技術なのだ。これは、近年、ビット長が半導体の線幅を下回るようになって初めて知る人ぞ知るようになった事柄である。

BPMの問題点は他にもある。まずは、信頼性のある技術の確立だ。書いたはずの信号が消えてしまうなんて論外だ。アバタ面(イオンプレーティングを採用したとしても)上を飛行するヘッドの飛行安定性も問題であろう。

熱アシストはヘッド系にもディスク(潤滑剤)にもダメージを与える悩み多い技術である。使用可能な温度はキュリー点よりかなり低い温度に止まるのではなかろうか。それでも書き込みは少し楽になる。

BPMは半導体的プロセスを必要とするため、プロセス変更が必要となる。コストアップが問題だ。本質的問題として、ビットが磁性を失う大きさの限界があるということもある。記録密度向上余地が少ない技術に多額の設備投資をすることはHDメーカーには悩ましい。BPMはDTM(Discrete Track Media)同様、不発に終わると予想する。

記録密度を上げずに容量を上げる当面の対策は、半導体、HDDとも3次元化(HDDは多数枚化というべきか)である。1990年頃、ハイエンドHDDでは5.25

インチで14枚組というのが一般的であった。3次元化のコストは半導体の方が有利であると言われている。しかし、発熱のため多くは望めないだろう。

スマホがノートパソコンの需要を喰い始めた。そしてスマホにはHDDではなく、フラッシュメモリーで構成されているSSD(Solid State Disk)が搭載される。このため、2012年はHDDの出荷台数が停滞した。2013年も多くは望めない。しかし、指数関数的に増加する情報を記録するために、大容量記録媒体は欠かせない。もっとも、この市場もやがてSSDが席捲するという見方も根強い。くどいが、半導体メモリーもムーアの法則が守れなくて四苦八苦している。現在、NAND型フラッシュメモリーの生産量は記録容量としてHDDの10%程度である。SSDが市場規模300億\$のHDDを置き換えるには7500億\$の設備投資が必要であるという(2011/12のSeagateの見解)。この数字はSSDがHDDを駆逐することは殆どあり得ないということの意味している。ただしSSDは低容量の記録媒体として使われているので、出荷台数は一般的な予想以上に速く伸びるだろう。ノートブックにおけるSSDの搭載は今のところ、ウルトラブックに止まっているが、やがてノートブック全体に波及し、さらにデスクトップの一部に及ぶ可能性がある。その分HDDの出荷台数は伸び悩む。しかしHDDによる記録容量自体は伸びていく。

6. まとめ

筆者がHD事業に関与したのは、1988年9月から2001年3月まで。その後も業界ウォッチングを続けているので、通算では四半世紀となる。その間、抱いた疑問は、①いわゆるハイテク産業は何故薄利なのか、②化学系企業はハイテクにおいて何故主役足り得ないか、という問題である。

①については、ムーアの法則の副産物として技術開発のロードマップが決まっていることである。現行技術の小改善によってロードマップが達成可能である限り、ハイテクとは見掛けだけの話。実質はローテクなのだ。ローテクで過当競争では儲かるわけがない。

技術の拡散に寄与している要因にJob Hoppingとクロスライセンス網、それに研究組合がある。ハイテク産業(とくに米国)では、人の出入りが激しい。かつてIBMはHDD業界において技術的に圧倒的な優位性を有していた。米国系のどのメーカーを訪問しても技術の中核にIBM出身者がいた時期があった。それも新たなイノベーションの立上がりとともに希薄になっていった。

クロスライセンスといえば、Seagate社がディスクのスタート・ストップに関する重要な特許：レーザーテクチャーを公開したのもそのせいと解釈される。また研究組合は弱者に有利に作用する。

②については、新しい材料開発、処理方法など、

化学を基盤とする技術はハイテクにおいて重要な役割を担っていることが多い。しかも化学系企業には化学系の研究者・技術者が多い。それにも拘らず、化学系企業はHDDを含むハイテク業界において組立メーカーの下請け的地位に甘んじていた。それどころか組立メーカーの垂直統合の脅威にさらされてきた。主な理由は製品を作る上でのニーズを組立メーカーが握っていたかである。当該ハイテクビジネスにおいて何をなすべきか、化学系企業自身が問題意識を持ち対策を講じれば主導権を握るチャンスがあるはずだ。

HDDに関してはその時期が到来した。1990年以降MRヘッドの導入、垂直磁気記録への移行という大きなイノベーションを経て、新たなる記録方式への転換期を迎えている。そこで活躍すると期待されている基盤技術はやはり”化学”なのだ。明確な問題意識のなかで固有技術を先鋭的に研ぎ澄ましてイノベーションを成し遂げて欲しい。その後は生産技術を含めた技術のリーダーとなりHDメーカーとして、方向性としてはスピンドルモーターの日本電産の地位を目指すことだろう。

以上