

磁気ディスク媒体の現状と展望

高橋 伸幸 (たかはし のぶゆき)

大月 章弘 (おおつき あきひろ)

小笠原 友信 (おがさわら とも のぶ)

1 まえがき

コンピュータが企業・オフィスのメインフレームからいわゆるパソコンとして個人ベースの業務・私的用途に使われだした1980年代初めに、その外部記憶装置としてのハードディスク装置 (HDD) もまた、大きな技術的転換期を迎えた。富士電機は、その背景の中で新たなスパッタ法による連続薄膜型磁気ディスク媒体の製品化に成功し、その後の急速な HDD の記録密度の技術進展に、タイムリーに新製品を投入することで、一貫して寄与してきた。

近年では、年率 100 % の記録密度の進展を維持しており、これを通してビット単価は大幅に低減し、今や記録媒体として紙 (ペーパー) をも下回り、その処理機能の高さと相まって、パソコン以外にも多くの応用が期待されている。

本稿では、今後の市場拡大を支える HDD の技術動向を述べ、これに対応した富士電機の磁気ディスク媒体の技術について現状の到達点と今後の展望を概括する。

2 市場・技術動向

HDD は、その特徴である大容量・高速アクセス性に加えて、大幅な単位容量価格の低下により、従来のパソコン市場のほか、コンシューマーエレクトロニクスや IT (Information Technology) 関連の新たな市場でも、他のメモリ方式を抑えて最も期待されている記録方式の一つになっている。

これを支えてきたのがたゆまぬ記録密度の進展であり、図 1 に示すように、常に製品化に先行して、世界各研究機関で 1 ~ 2 年先の高い記録密度の検証がなされてきた。2001年には、富士電機が開発した 30 G ビット/in² 磁気ディスク媒体 (40 G バイト/枚, 95 mm サイズ) を搭載した HDD がいち早く製品化されるとともに、研究開発では富士通 (株) と Seagate Technology が 100 G ビット/in² の実証に成功した。2002年は、各社が 60 G ビット/in² クラスの製品化に向けて開発を推進中である。

さて、この高度な HDD 技術開発を実現するためのキー

テクノロジーは、磁気ヘッドと磁気ディスク媒体である。この中でも富士電機の製品である磁気ディスク媒体に目を向ければその技術課題は、

- 磁気特性として、熱安定性と低媒体ノイズ化
- HDI (ヘッドディスク界面) 特性として、磁気ヘッドの低浮上安定性と高信頼性 (高耐久・高耐環境) で整理され、図 2 に模式的に示すように、媒体の多くの因子と複雑に関連することになる。

③章で、その技術の進展を各要素技術に分けて概括する。

図 1 記録密度の年次トレンド

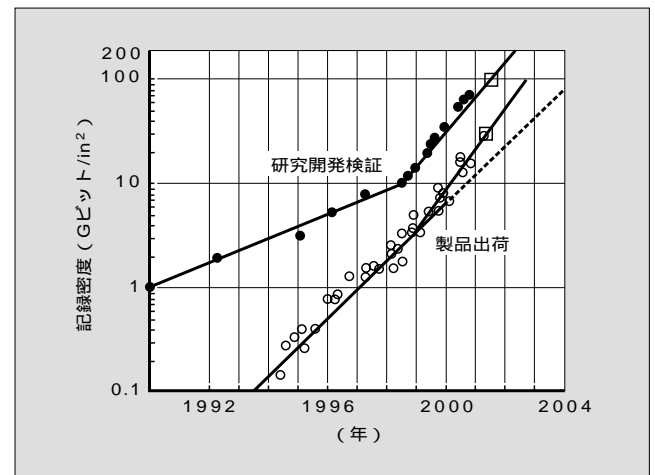
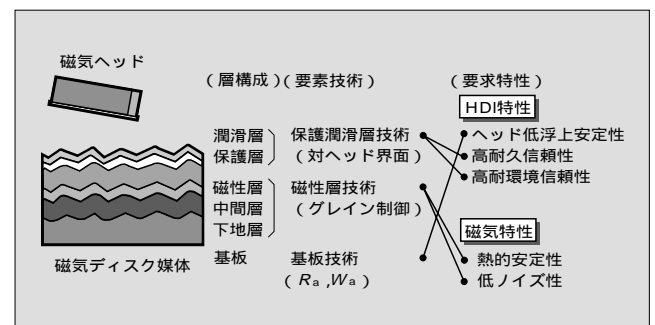


図 2 磁気ディスク媒体の要素技術と要求特性の関連



高橋 伸幸
磁気記録媒体の研究開発に従事。
現在、富士電機ストレージデバイス(株)開発・製造統括部第一開発部長。IEEE 会員。



大月 章弘
磁気記録媒体の研究開発に従事。
現在、富士電機ストレージデバイス(株)取締役開発・製造統括部第二開発部長。日本応用磁気学会会員。



小笠原 友信
磁気記録媒体の開発に従事。現在、富士電機ストレージデバイス(株)取締役開発・製造統括部長。

③ 富士電機製磁気ディスク媒体の現状

3.1 基板技術

現在使用されているアルミニウム（アルミ）基板の性能は、記録密度の進展を支える基本的な技術の一つである磁気ヘッドの低浮上化に直接的にかかわり、かつ微小記録ビットの物理的欠陥を抑制するうえでの重要な要素である。

磁気ヘッドの低浮上化を決める物理的定数として、微小うねり (W_a) と表面粗さ (R_a) がある。改善のためのポイントは、 W_a に関しては、ポリッシュ基板におけるグランド加工技術と耐熱（変形）性のNiPめっき膜形成自体とその後の高精度のポリッシング技術である。また、そのさらに後工程のテクスチャプロセスは、 R_a に影響を与える重要な因子となる。

これら各条件のプロセスを最適化することで、現在は、図3に示すような表面特性 ($R_a = 0.25 \text{ nm}$, $W_a = 0.15 \text{ nm}$) を可能にし、結果として図4に示すような、現在開発中の

図3 磁気ディスク媒体の表面特性

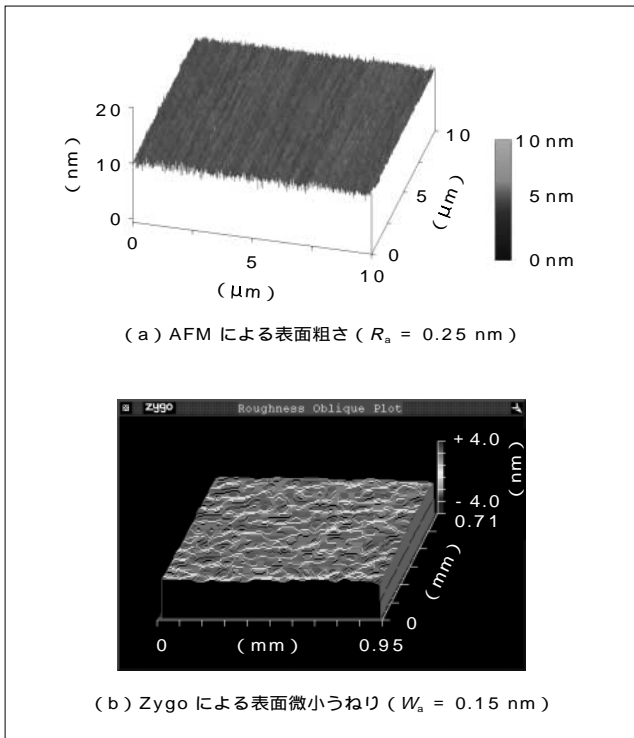
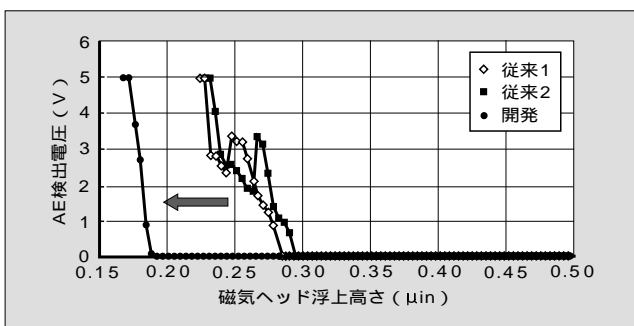


図4 グライドアバランシ特性の改善



60 G ビット/in² で要求される低浮上特性をほぼ満足しうるグライドアバランシ特性を確認できた。

また、記録ビットの欠落を引き起こさないための表面欠陥の許容レベルはますます微細化し、この欠陥抑制は、実際の媒体製造工程での歩留り確保とともに、HDD に組み込んだ際のより高い信頼性確保のためにも重要である。富士電機は2001年に 30 G ビット/in² の媒体量産化の際に、その改善のポイントに改めて焦点をあて、現在下記技術アイテムの高度化を推進中である。

- ポリッシュ基板工程におけるマイクロピットとポリッシュクラッチの低減
- テクスチャ工程におけるクラッチと洗浄マイクロコンタミネーションの低減

3.2 磁性膜技術

高記録密度を実現するうえで、安定した記録ビットをどこまで微細化できるかが第一義的に重要であり、記録用磁性膜はスパッタによる連続薄膜系が採用されて以来、幾つもの変遷を経てきた。またそれは従来から、信号の記録・再生を行う磁気ヘッドの組合せ最適化の中で進み、今後も磁気ヘッドの開発に合わせた磁性膜設計はますます重要となる。

磁性膜技術の詳細は、本特集号の別稿（長手磁気記録用磁性層技術）で詳細に展開されている。ここでは、ポイントの指摘にとどめ、今後の大きな流れとしてのロードマップを紹介する。

長手記録用磁性膜の開発のポイントは、いかに媒体ノイズを低減するかが重要であり、これを基軸に熱的安定性（サーマルディケイ）をどう確保するか、というバランス（あるいはトレードオフ）を実現することである。さらにこれに磁気ヘッドのライタリティの制約が絡んで媒体磁気特性の（特に、ダイナミックレンジでの）保磁力に歯止めをかけることになる。具体的には、低ノイズを実現するために磁性記録層の結晶グレインの磁気的分離と微細化の達成、および 30 G ビット/in² の実現でその重要性が認知され、今後の改善が要求されている熱的安定性確保のための手段を併用することである。従来磁気ヘッドの GMR (Giant Magnetoresistive) 素子で開発され媒体への転用が期待されている AFC (Anti-Ferromagnetic Coupling) 構造に注目が集まる由縁である。図5に示すロードマップの

図5 磁性膜開発のロードマップ

記録密度	30 Gビット/in ² → 60 Gビット/in ² → 120 Gビット/in ² → 240 Gビット/in ²			
記録層タイプ	<長手記録>			
	コンベンショナル構造		AFC (反強磁性結合) 構造	
	<垂直記録>			
	CoCr系		多層積層膜系、複合膜系	
グレインサイズ	8-9 nm	7-9 nm	5-6 nm	4.5-5 nm
保磁力	295 kA/m	334 kA/m	478 kA/m	637 kA/m
磁性層	CCPB系	CCPB/AFC	CCPB/軟磁性	(Co/M)n/軟磁性

図6 保護潤滑膜開発のロードマップ

記録密度	30 Gビット/in ² → 60 Gビット/in ² → 120 Gビット/in ² → 240 Gビット/in ²
ガイドアバランシ	6 nm → 5 nm → 4.5 nm → < 4 nm (ニアコンタクト)
保護膜	<CVD> 表面化学修飾 5 nm → 2.5 ~ 3 nm → 2 nm → < 2 nm (FCA)
潤滑膜	<PFPE> → 添加剤複合系 → 新塗布方式 分子量分布改善 → 分子量設計制御 → 分子構造制御

ように、60 G ビット/in² においてコンベンショナル構造と並行開発しながら、100 G ビット/in² での垂直記録とのオーバーラップを見極めつつ調査を進めている。

3.3 保護潤滑膜技術

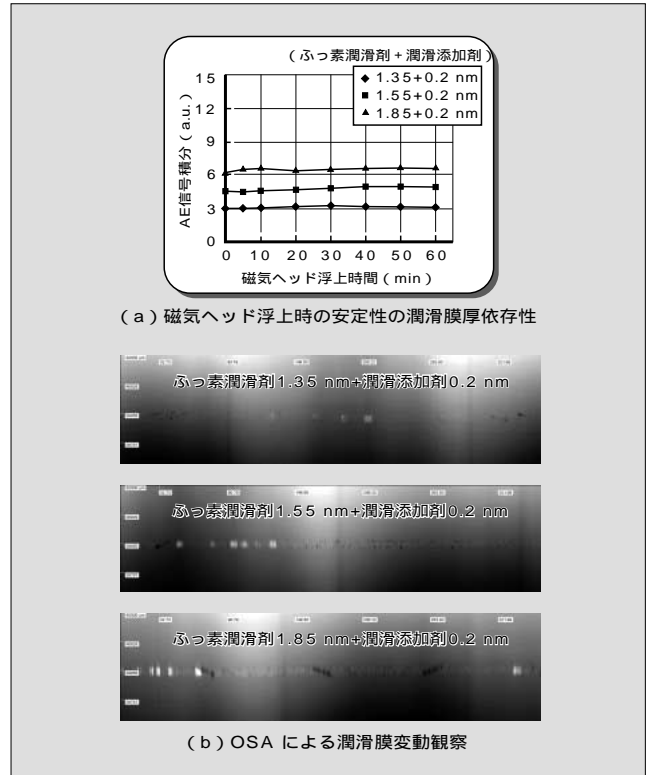
磁気記録における理想は媒体記録層と磁気ヘッド素子の間隔をミニマムに抑えることであり、先の基板技術で述べた、より平滑な媒体表面が重要であるとともに、媒体の保護潤滑膜をいかに薄層化するかもう一方で重要である。しかしながら、磁気ヘッドの極低浮上時に生じる磁気ヘッド-磁気ディスク間の相互作用に抗して安定浮上を確保し、従来からの磁気ヘッドが磁気ディスクに接触するときに生じる耐久性の確保と、薄層化故にクローズアップする、磁性層の耐食性の確保を同時に成立させなければならないという、今後一層困難になる課題を抱えている。

これら一連の技術は、やはり本特集号の別稿〔HDI (ヘッドディスク界面) 技術の進展〕で詳細に展開されている。ここでは、図6に示すロードマップの紹介にとどめたい。

保護膜技術に関しては、30 G ビット/in² で確立したCVD (Chemical Vapor Deposition) 方式による5 nm厚の確立以降、さらに薄層化を進めており、その中で、一層の均一性の確保と膜高硬度化により半減させた2.5 nmクラスまでの耐久・耐食性に見通しを得つつある。また、将来の極薄層化への可能性として新たな成膜手法であるFCA膜の可能性も探っている。

潤滑膜は、HDD デザインの特徴により個々に最適化を進めている。磁気ヘッド浮上の安定化のための基本コンセプトは、富士電機独自の処理を施して表面抵抗を制御した保護膜上にいかに薄い潤滑膜を形成しようかということになる。従来のCSS (Contact Start Stop) 方式からランブロード方式にすることで薄層潤滑膜の設計は有利になる。またサーバ応用の高速回転HDDにおいては、耐久性確保で重要な潤滑剤の自己修復力に加えて、スピンオフによる潤滑剤散逸を結合潤滑剤の設計でバランスさせなければならない。一方で磁気ヘッドの低浮上化は、浮上中の磁気ヘッド自体の自己振動 (不安定性) が増大するという現象をも生じさせる。これは、実用上の極端環境下で突発的な障害のリスクを増大させるという意味で今後の重要な信頼性特性と理解できる。富士電機の調査から、これらは媒体上の諸特性との関連が判明しており、表面の微小うねりや潤滑剤の厚さへの考慮が重要になる。一例を図7に示す。

図7 AE センサによる磁気ヘッド浮上安定性評価



AE (Acoustic Emission) センサで定量した磁気ヘッドの浮上安定性は、表面の潤滑剤の厚さとともに阻害され、しかも潤滑膜自体のモーグル化 (凹凸化) 現象を引き起こしており、この抑制は、今後の潤滑膜開発へのガイドラインともなる。

その中で、富士電機では、独自の潤滑剤精製技術〔SFE (Supercritical Fluid Extraction) 手法〕を開発し、これを通して、個々のHDDプログラムに合わせたきめ細かな分子量設計に対応している。さらに、これらを踏まえて、基礎検討の段階ながらも将来のニアコンタクトやコンタクト方式に向けての調査も併せて推進中である。

4 将来技術への展開

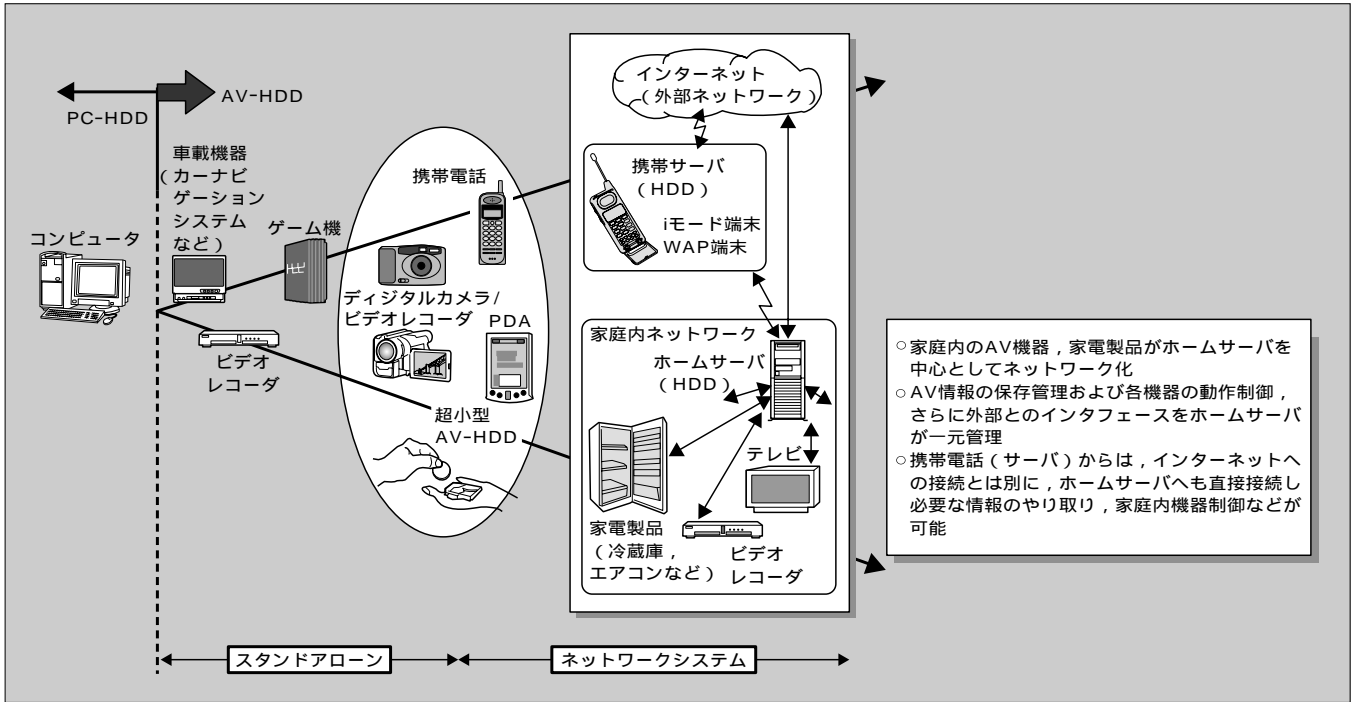
前章では、富士電機製磁気ディスク媒体の技術の現状と課題を展望した。しかしながら最初にも述べたように、記録密度の進展は、あらゆる観点からのコスト低減の技術開発行為とも相まって、HDDに新たな市場形成を実現させつつある。

その流れの中で、富士電機が独自のオリジナリティを持って未開のテーマに取り組み、個々に一定の成果を示しつつある技術の一端を紹介する。詳細は、やはり本特集号の別稿 (「ガラス磁気ディスク媒体の開発」、「垂直磁気記録用磁性層技術」、「磁気転写技術」) に譲るが、ここでは今後に広がる可能性に焦点をあてて概要を述べる。

4.1 ガラス基板媒体

その材料の特徴である、耐衝撃性と耐 TMR (Track

図8 AV-HDDの用途展開



Miss Registration) 特性の優位で、ポータブル市場やサーバ市場にてガラス基板の実用化がなされている。しかしながら、従来の等方的表面の特性上、形成される磁性膜は等方性磁性を持ち、アルミ基板媒体で実現している配向性磁性膜と比較したとき、電磁変換特性に優位を保てず今後のガラス基板媒体においても配向性磁性の志向が強まっている。NiPをガラス基板に形成後、アルミ基板同様のテクスチャ加工を施して配向性磁性を確保する手法も存在するが、ガラス本来の特徴を阻害し、しかもコストアップの要因となる。富士電機は、ガラスに直接アルミ基板同様のテクスチャラインを安定に加工するプロセスと、その上に真空中での独自のシード層形成プロセスの最適組合せを開発することで、アルミ媒体に遜色(そんしょく)のない磁気ヘッド浮上特性と電磁変換特性の実現を達成した。

今後は、パソコン市場を超えて、ガラスの耐衝撃性を生かしながら一層の小径化の方向性の中に、モバイル系の各種HDDアプリケーションへの適用が期待できる。

4.2 垂直記録媒体

垂直記録用磁性膜は、前述長手記録の、より高密度になったときのバランス(媒体低ノイズ化、熱安定性、磁気ヘッドのライタビリティ)の破たんが予測されることから、近年、実用化研究に一層の拍車がかかっている。将来的には、100Gビット/in²を超えたところからの実現性が注目されるが、生産性はもとより、現在並行開発が進められている各種媒体構成のどれが本命になるか、今後の技術ブレークスルーにかかっている部分がある。富士電機においても、垂直磁性膜のあらゆる可能性を(適用分野も含めて)

検討しており、先のロードマップに示すように100Gビット/in²での検証を第一目標に、長手記録用の開発と競いながら、両記録方式において、並行開発を進めている。

ここでもパソコンにおけるデジタル情報からコンシューマユースのAV(Audio-Visual)情報へと用途が広がる時、より大容量メモリが必要となり、特に垂直記録への動機づけは高く、適用への期待は大きい。

4.3 転写サーバ媒体

磁気ディスク媒体は、HDDに組み立てられた後、適性な記録・再生特性実現のために、あらかじめ磁気ヘッドを制御するサーボ情報を媒体上に書き込まねばならない。しかしながら、記録密度の進展に従ってこのサーボの書込みはサーボライタ装置の高度な更新と、より長時間のプロセスを要し、コストアップの要因となる。今回富士電機は、HDDメーカーのご協力も得て、コンタクト方式によるプリサーボ情報の書込みプロセスを確立し、実際に15Gビット/in²と30Gビット/in²の媒体のプリサーボ組込み媒体の量産を世界で最初に実現した。今後の高記録媒体にも十分適用できる技術であり、かつ垂直記録媒体においてもそのサーボ転写方式の有効性が検証できている。さらに、AV応用を想定したとき、本技術は従来パソコン用HDDではあまり考慮されなかったセキュリティの情報をディスク媒体自体に確保させたい場合に、一つの可能性のある手法として新たな発展性をも示唆している。

本章で述べた新技術は、図8に示すように今後に広がる新たなAV応用を具体的に展開する際の重要な因子(低価格、大容量、セキュリティ)の具体的な解決策として提

案できるものである。

⑤ あとがき

以上、富士電機の技術開発の成果を概括しながら、磁気ディスク媒体の現状を見てきた。詳細は、本特集号の別稿を参照していただきたい。近年の年率 100 % の記録密度を確保する技術開発は、年を追うごとに困難性を増してきている。それでも、2002年に 60 G ビット/in² を立ち上げる見通しは各方面の努力で確実性を一層増してきている。

30 G ビット/in² の開発・量産がそうであったように、ここにおいても富士電機の業界における確かな足跡を残すべく、社内外の一層の開発協力を進めていき、HDD の発展に寄与していく所存である。その中で、市場自体の広がりにも結びつくことを期待したい。

参考文献

- (1) 加藤忠臣ほか．スバッタ法 Co 合金系磁気ディスク媒体．富士時報．vol.59，no.11，1986，p.741-745．
- (2) 磁気記録媒体特集．富士時報．vol.65，no.9，1992，p.599-635．
- (3) 磁気ディスク媒体特集．富士時報．vol.72，no.11，1999，p.578-608．
- (4) Abarra, E. et al. Longitudinal magnetic recording media with thermal stabilization layers. Appl. Phys. Lett. vol.77, 2000, p.2581．
- (5) Fullerton, E. et al. Antiferromagnetically coupled magnetic media layers for thermally stable high-density recording. Appl. Phys. Lett. vol.77, 2000, p.3806．

解説 磁気ディスク媒体の記録密度

磁気ディスク媒体に用いられる記録容量の表現方法には、G ビット/in² と G バイト/枚がある。これらの言葉の意味は、次のとおりである。

- G ビット/in² : 単位面積あたりの記録容量を表す。単位としては 1 平方インチの面積に記録できるビット数 (ビット/in²) が使われる。
- G バイト/枚 : 媒体 1 枚あたりの記録容量を表す。単位としては媒体 1 枚に記録できるバイト数 (バイト/枚) が使われる。

なお、1 バイトは 8 ビットで G (ギガ) は 10 億を表す。

記録密度は、図のように媒体の周方向に記録する密度 (線記録密度) と半径方向に記録する密度 (トラック密度) に分けて考えることができる。

- トラック密度 : 単位長さ (インチ) あたりのトラック本数
- 線記録密度 : 記録トラック上の単位長さ (インチ) あたりに記録できるビット数

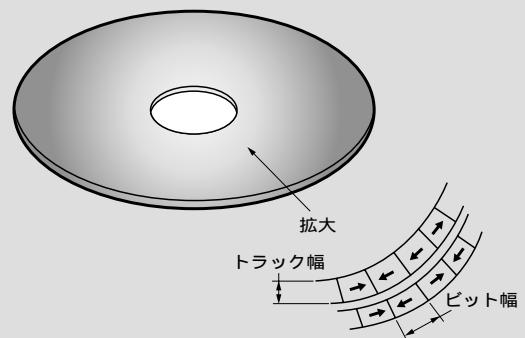
線記録密度とトラック密度を掛け合わせた数値が面記録密度になる。

現在製品化されている媒体の記録密度は、30 G ビット/in² であるので、3.5 インチディスクでそのまま単純に計算すると 60 G バイト/枚程度の記録容量になるが、実際にはサーボ信号やトラック間のスペースがあり、

40 G バイト/枚程度が利用可能な容量になる。

100 G バイト容量のハードディスクではおおよそ以下の量のデータが記録可能となる。

- 1. 現行テレビ放送なみの画質の場合 : 約 40 時間映画約 20 本
NHK 大河ドラマ 1 年分
- 2. MP3 で圧縮して約 25,000 曲 (CD アルバム約 1,300 枚)
- 3. 新聞 : 約 600 年分
- 4. 単行本 : 約 10 万冊





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。